



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
DR VICTOR HUGO GARDUÑO MONROY



**Magmatismo del ensamble plutónico de San Diego  
Curucupatzco, Michoacán: Geología, Petrología y  
Geoquímica**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de  
**Maestro en Geociencias y Planificación del Territorio**

**P R E S E N T A**  
**Ing. en Geociencias Elesbaan Resendiz Zarco**

Director de tesis:  
**Dr. Pedro Corona Chávez**

Morelia, Mich., marzo de 2024.



## *Dedicatoria*

*A la memoria de Odilón, Alonso y Polín....†*

*A mi madre Teresa Zarco, por siempre creer en mí y ser un ejemplo a seguir.  
Gracias por darme la vida y por demostrar que todo se puede lograr con amor  
y dedicación.*

*A Vian, Yuri y Odil. Por todas las vivencias compartidas y por compartir,  
por su motivación y por todo su apoyo.*

*A mi motor de vida, Cristel, Marian y Jesu, por cada momento que nos  
regala la vida.*

*A mi familia Resendiz Zarco y Morales-Zarco.*

*A todos los que sin saberlo formaron parte de este proyecto, por cada uno, y  
para cada uno de los que comparten energía y alimentan al espíritu.*

## *Agradecimientos*

*Agradezco de manera especial al Dr Pedro Corona Chávez, gracias por ser un guía y amigo durante este proceso, por su apoyo incondicional, por su tiempo y dedicación a este trabajo, por todos los conocimientos compartidos, por inculcarme el "proceso", por los tecto-viajes a través de millones de años, por prestarme a la "paloma" para las salidas de campo, por los recursos para las salidas a campo y a los congresos, por los consejos y calidez en momentos complicados, por los téis negros y los jugos del valle.*

*A la Dra. Sol, por compartir su pasión desenfrenada por las geociencias, por su amistad su calidez humana, por todos los momentos compartidos. Gracias por presentarme al Mesoproterozoico y los complejos de la costa. Por los recursos para el congreso, por prestarme su laboratorio y por todo su apoyo durante este proceso.*

*Infinitas gracias a los dos...*

*Al M. C José E. Montiel, por sembrar en mí el mal de la "piedra" y adentrarme al mundo de la investigación, porque conocer personas como usted pueden cambiar el rumbo...*

*Al Dr. Peter Schaaf, por parte del financiamiento para este proyecto, por las revisiones y sugerencias durante los seminarios, todo el apoyo en el laboratorio LUGIS y por las competencias en campo.*

*A mi mesa de sinodales: Dra. María del Sol, Dra. Isabel Istrate, Dra. Gabriela Gómez, Dr. Peter Schaaf, Dr. Boris Chako por el tiempo dedicado a la revisión de este documento, realizar comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar este trabajo.*

*A mis colegas geocientistas: Itza, Memo, Néstor, Circe, Karla, Chava, Kary, Santiago, Lucy, Miranda, Ruth y Estrella. Por las vivencias y aventuras en campo, de manera especial a Itza y Karla por el apoyo y motivación durante esta travesía. Y un agradecimiento particular al Memo por el acompañamiento durante las campañas de campo y el apoyo brindado durante nuestra etapa formativa sin y post cubos metalurgia.*

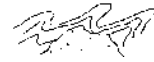
*A Beto, por las buenas charlas medicinales, geológicas, geoquímicas, vivencias y aventuras. Por tantas aventuras y cambios de latitud, pero sobre todo por su amistad.*

*A todo el personal académico del instituto, por sus aportes a esta institución y a la formación de profesionistas. De manera muy especial a la Dra. Isa por todas sus atenciones y aportes, gracias por darle vida al MCIT durante su cargo como directiva.*

*Agradecimientos al personal del LUGIS que intervinieron en la obtención de datos: A Teodoro Hernández Treviño por ayuda en la preparación de las muestras. A Gabriela Solís Pichardo por realizar los trabajos analíticos isotópicos en el laboratorio de química ultrapura y la reducción de los datos. A Gerardo Arrieta García por las mediciones isotópicas. Agradecimiento al LUGIS por el financiamiento parcial de los análisis.*

*Al M.C. Felipe García Tenorio por el apoyo durante el proceso de montado de los especímenes petrográficos, en el laboratorio de Petrografía de la UNAM, IGUM, campus Morelia.*

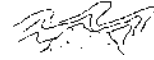
*Al Dr. Carlos Ortega Obregón por la atención y el buen trato durante la estadía en las instalaciones del Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI), UNAM, campus Juriquilla.*



## Resumen

Las rocas plutónicas auríferas del Jurásico Medio-Tardío como aquellas que se encuentran en las localidades de: Cuale, San Diego Curucupatzeo y Macías-Tumbiscatío constituyen uno de los principales rasgos tectónicos del suroeste de México, además de proveer información relevante para conocer la evolución del Terreno Guerrero durante el Jurásico. El objetivo de este estudio es determinar la evolución y naturaleza de emplazamiento del Ensamble Plutónico San Diego Curucupatzeo (EPSD) mediante un análisis petrológico, geoquímico y geocronológico. Esta región contiene afloramientos bien expuestos, pero han sido poco estudiados. El EPSD se extiende en un área aflorante de 63.8 km<sup>2</sup> del cual se extrajeron muestras que revelan litologías heterogéneas con variaciones de granitoide que van de granito, sienogranito-monzogranito, granodiorita y tonalita, las cuales son relativamente coetáneas con el emplazamiento de una unidad máfica de variación diorita-norita y diques dioríticos tardi-magmáticos. El EPSD alberga gran cantidad de xenolitos de rocas metamórficas del Complejo Arteaga del Triásico que están parcialmente asimilados y que corresponden a las Litarenitas de San Diego (Formación Varales) y basaltos tipo MORB correlacionables con la Formación Charapo. Sin embargo, la estructura regional y distribución del EPSD se relaciona con las estructuras y texturas de deformación asociadas con plegamiento y zonas de cizalla tipo dúplex NNE-SSW de edad laramídica. El análisis petrográfico muestra que la composición del EPSD es esencialmente plagioclasa-cuarzo-feldespato potásico-biotita  $\pm$  moscovita con variaciones en sus contenidos principales de plagioclasa cálcica y feldespato asociadas a la cercanía con la unidad máfica (Plg-Cpx-Hbl), puesto que se han identificado enclaves máficos que evidencian una mezcla mecánica y química de estructuras tipo “mingling” y “mixing” que sugieren una hibridación relativa en el EPSD.

La composición geoquímica muestra firmas tipo calciálcicas con variaciones de 60 a 70,6 wt% de SiO<sub>2</sub> y una relativa peraluminosidad con valores normativos de corindón  $\sim 2 - 4$ , sugiriendo que el EPSD podría clasificarse como granito de tipo S. Los elementos traza y los patrones de los elementos ligeros de tierras raras (LREE) enriquecidos y las ratios Y+Nb/Rb grafican con un sistema de tipo arco magmático, sin embargo, muestran también firmas de tipo intraplaca. Las relaciones de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$  varían entre 0.7053 y 0.7065 y  $\epsilon\text{Nd}_i$  -3.23 a -1.79 que sugieren una fuente relacionada con el manto superior con una importante componente cortical.



En relación con las condiciones de emplazamiento, de acuerdo con la clasificación de Pupin (1980; 1988), la tipología de los circones sugiere un predominio de circones tipo  $G_1$  y  $S_5$  con temperaturas de cristalización entre 600 – 700 °C. Así mismo, por medio de cálculos de termometría *Ti-in* en circones, se obtuvieron temperaturas promedio de 773.6 °C  $\pm$  65.02. Esta temperatura parece ser consistente con las relaciones de contacto observadas en campo, así como con una aureola de contacto con una asociación de andalucita, biotita, plagioclasa y cuarzo que además indica baja presión <4 kbar y definitivamente un emplazamiento en corteza superior.

Por medio del análisis isotópico de U-Pb en circones se obtuvo una edad promedio de 163.12  $\pm$  0.64 Ma que se considera como la edad de cristalización del EPSD.

Considerando las características de un emplazamiento cortical superficial, así como las firmas geoquímicas peraluminosas y de tipo S que varía de tipo arco magmático a sin-orogénicas, el EPSD se correlaciona con otros cuerpos plutónicos jurásicos de la Cordillera del margen occidental de México: Tumbiscatío, Cuale, Sonora e Islas Marías, sugiriendo un evento de subducción rápida asociado con un proceso colisional de plegamiento dúctil-frágil y zonas de cizalla que fungen como rampas de ascenso en el momento de acreción durante el Jurásico Tardío en el Terreno Guerrero.

Palabras clave: magmatismo sin-orogénico, granito peraluminoso, hibridación, subducción.

# Abstract

The auriferous plutonic rocks of the Middle-Late Jurassic such as those found in the localities of: Cuale, San Diego Curucupatzco and Macias-Tumbiscatio constitute one of the main tectonic features of southwestern Mexico, as well as they provide relevant information to know the evolution of the Guerrero Terrane during the Jurassic time. The objective of this study is to determine the evolution and emplacement and of the San Diego Curucupatzco Plutonic Assemblage (SDPA) based on petrological, geochemical and geochronological analysis. This region contains well-exposed outcrops, but they have been little studied. The SDPA extends over an outcropping area of 63.8 km<sup>2</sup> from which samples were sampled revealing heterogeneous lithologies with granitoid variations ranging from granite, syenogranite-monzogranite, granodiorite and tonalite, which are relatively coeval with the emplacement of a mafic unit of diorite-norite variation and late dioritic-magmatic dioritic dykes. The SDPA hosts a large number of partially assimilated xenoliths of metamorphic rocks of the Triassic Arteaga Complex corresponding to the San Diego Litarenites (Varales Formation) and MORB-type basalts correlated with the Charapo Formation. However, the regional structure and distribution of the SDPA is mainly related to deformation structures and textures associated with folding and NNE-SSW duplex shear zones of Laramide age. Petrographic analysis shows that the composition of the SDPA is essentially plagioclase-quartz-potassium feldspar-biotite- ± muscovite with variations in its main contents of calcic plagioclase and feldspar associated with proximity to the mafic unit (Plg-Cpx-Hbl), associated with mafic enclaves and mechanical and chemical structures, suggesting relative hybridization processes in SDPA.

The geochemical composition shows calc-alkaline type signatures with variations of 60 to 70.6 wt% SiO<sub>2</sub> and relative peraluminosity with normative corundum values ~2 - 4.5 suggesting the SDPA could be classified as S-type granite. Enriched trace element and light rare earth element (LREE) patterns and Y+Nb/Rb ratios fit with magmatic arc-type system, however, they also show relatively an intraplate-type signatures. The <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios range from 0.7053 to 0.7065 and εNdi - 3.23 to -1.79 suggest an upper mantle related source with a significant cortical component.

According to Pupin's classification (1980; 1988), the zircon typology suggests a predominance of G<sub>1</sub> and S<sub>5</sub> type zircons with crystallization temperatures between 600 - 700 °C, as well as Ti-in thermometry calculations in zircons suggest an average temperatures of 773.6 °C ± 65.02. This temperature seems to be consistent with the contact field relationships observed, as well as with

contact aureole with andalusite, biotite, plagioclase and quartz low pressure assemblage (<4 kbar) and an upper crustal emplacement.

Based on U-Pb isotopic analysis in zircons, an average age of  $163.12 \pm 0.64$  Ma was obtained, which is considered as the age of crystallization of the SDPA.

Considering the characteristics of a shallow cortical emplacement, as well as the peraluminous and S-type geochemical signatures that vary from arc magmatic to syn-orogenic, the SDPA correlates well with other Jurassic plutonic bodies of the Cordillera of the western margin of Mexico: Tumbiscatío, Cuale, Sonora and Islas Marías, suggesting a rapid subduction event associated with a collisional process of ductile-fragile folding and shear zones that function as uplift ramps at the time of accretion during the Late Jurassic in the Guerrero Terrane.

Keywords: syn-orogenic magmatism, peraluminous granite, hybridation, subduction.

# ÍNDICE

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Dedicatoria, agradecimientos.....                                        | i         |
| Resumen .....                                                            | ii        |
| Abstract.....                                                            | iii       |
| <br>                                                                     |           |
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                                             | <b>1</b>  |
| <b>2.- GENERALIDADES .....</b>                                           | <b>5</b>  |
| 2.1. Área de estudio .....                                               | 5         |
| 2.1.1 Localización.....                                                  | 5         |
| 2.1.2 Vías de acceso .....                                               | 6         |
| 2.1.3 Hidrografía, clima y vegetación .....                              | 7         |
| 2.2 Planteamiento del problema .....                                     | 9         |
| 2.3 Justificación .....                                                  | 10        |
| 2.4 Hipótesis .....                                                      | 10        |
| 2.5 Objetivos .....                                                      | 10        |
| 2.5.1 Objetivo general .....                                             | 10        |
| 2.5.2 Objetivos particulares .....                                       | 10        |
| <b>3.-MARCO TECTÓNICO: El Terreno Guerrero y El Complejo Arteaga ...</b> | <b>11</b> |
| <b>4.-GEOLOGÍA REGIONAL DEL ENSAMBLE PLUTÓNICO DE SAN</b>                |           |
| <b>DIEGO CURUCUPATZEO .....</b>                                          | <b>17</b> |
| 4.1 Magmatismo Jurásico Occidental (FPJ) .....                           | 17        |
| 4.1.1 Granito Cubampo .....                                              | 18        |
| 4.2.2 Isla María Madre .....                                             | 18        |
| 4.1.3 Cuale .....                                                        | 18        |
| 4.1.4 Ensamble plutónico de Tumbiscatío .....                            | 19        |
| 4.2 Geología local del EPSD .....                                        | 20        |
| 4.2.1 Complejo Metamórfico de Carácuaro (Complejo Arteaga)..             | 20        |
| 4.2.2 Secuencia volcánico-sedimentaria cretácica .....                   | 22        |
| 4.2.2.1 Arco Amengarícuaro Ki (?) B-A Formación                          |           |
| Zihuatanejo .....                                                        | 22        |
| 4.2.2.2 Conglomerado Polimíctico-Arenisca Acuyo                          |           |
| (Formación Playitas) Ki. ....                                            | 23        |
| 4.2.2.3 Diorita La Noria .....                                           | 23        |
| 4.2.3 Unidades volcánicas terciarias de cobertura .....                  | 24        |
| 4.2.3.1 Sierra de Mil Cumbres .....                                      | 24        |
| 4.2.3.2 Caldera de Villa Madero .....                                    | 24        |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.3.3 Pórfido Riolítico La Conquista (To PR)                          | 24 |
| 4.3 El Ensamble Plutónico de San Diego: trabajos previos                | 25 |
| <b>5.-METODOLOGÍA</b>                                                   | 27 |
| 5.1 Trabajo de gabinete (estudios previos, material cartográfico)       | 27 |
| 5.2 Análisis morfoestructural                                           | 28 |
| 5.3 Trabajo de campo                                                    | 28 |
| 5.4 Petrografía                                                         | 29 |
| 5.5 Geoquímica                                                          | 30 |
| 5.5.1 Fluorescencia de Rayos X (FRX) para análisis de Elementos mayores | 30 |
| 5.5.2 ICP-MS para análisis de elementos traza                           | 30 |
| 5.6 Geocronometría, tipología de circones e isotopía                    | 31 |
| 5.6.1 Montado de circones                                               | 32 |
| 5.6.2 Isotopía U/Pb en circones                                         | 33 |
| 5.6.3 Espectrometría de masas para isotopía Rb, Sr, Sm y Nd             | 34 |
| 5.7 Termometría y condiciones de emplazamiento                          | 34 |
| <b>6.- RESULTADOS</b>                                                   | 35 |
| 6.1 Análisis morfoestructural                                           | 35 |
| 6.1.1 Dominios morfoestructurales                                       | 35 |
| 6.1.1.1 Depresión Sur                                                   | 35 |
| 6.1.1.2 Dominio Nocupétaro                                              | 35 |
| 6.1.1.3 Dominio Carácuaro                                               | 37 |
| 6.1.1.4 Dominio Sierra Central                                          | 37 |
| 6.1.1.4.1 Sierra Central                                                | 37 |
| 6.1.1.4.2 Subdominio Agua Fría                                          | 37 |
| 6.1.1.4.3 Subdominio El Pílon                                           | 38 |
| 6.1.1.4.4 Subdominio San Juan                                           | 38 |
| 6.1.1.5 Dominio San Diego                                               | 38 |
| 6.1.1.6 Dominio Lomas La Tortuga                                        | 39 |
| 6.1.1.7 Dominio Las Trojes                                              | 39 |
| 6.1.1.8 Dominio El Balcón                                               | 39 |
| 6.1.1.9 Dominio Tizate                                                  | 40 |
| 6.1.1.10 Complejo El Capulín                                            | 40 |
| 6.1.1.10.1 Subdominio Cerritos                                          | 40 |
| 6.1.1.10.2 Subdominio La Soleadita                                      | 41 |
| 6.1.1.10.3 Subdominio Llanitos                                          | 41 |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1.1.11 Dominio Platanillo.....                                                                     | 41 |
| 6.1.1.12 Dominio El Águila .....                                                                     | 42 |
| 6.1.1.13 Conos El Anono .....                                                                        | 42 |
| 6.1.1.14 Arco San Rafael.....                                                                        | 42 |
| 6.1.1.15 Sierra Los Tepetates .....                                                                  | 42 |
| 6.1.1.16 Complejo Volcánico Moreno .....                                                             | 43 |
| 6.1.1.17 Dominio Los Puertos .....                                                                   | 43 |
| 6.1.1.18 Dominio La Mina .....                                                                       | 43 |
| 6.1.1.19 Dominio Las Mesas .....                                                                     | 44 |
| 6.1.1.20 Flujo La Escondida.....                                                                     | 44 |
| 6.1.1.21 Avalancha Caldera de Villa Madero .....                                                     | 44 |
| 6.1.1.22 Flujo El Caracol.....                                                                       | 45 |
| 6.1.2 Lineamientos morfoestructurales .....                                                          | 45 |
| 6.1.2 Estructuras discontinuas .....                                                                 | 45 |
| 6.1.2.1 Sistema Patambo-San Diego NNW-SSE....                                                        | 45 |
| 6.1.2.2 Sistema El Anono NE-SW.....                                                                  | 46 |
| 6.1.2.3 Sistema La Soleadita NW-SE.....                                                              | 46 |
| 6.2.- Unidades del Ensamble Plutónico de San Diego y sus relaciones de<br>contacto y cobertura ..... | 47 |
| 6.2.1 Complejo Arteaga .....                                                                         | 47 |
| 6.2.1.1 Litarenitas San Diego (LSD) .....                                                            | 48 |
| 6.2.1.2 Pillow lavas El Puente (PLP) Formación Charapo.                                              | 52 |
| 6.2.2 Ensamble plutónico San Diego Curucupatzee (EPSD).<br>.....                                     | 54 |
| 6.2.2.1 Unidad Diorita-Norita El Salitre (UDNS) ..                                                   | 55 |
| 6.2.2.2 Unidad Granito San Diego (UGSD) .....                                                        | 56 |
| 6.2.2.3 Unidad Tonalita Frontera (UTF) .....                                                         | 58 |
| 6.2.2.4 Unidad Nocupétaro (UN) .....                                                                 | 59 |
| 6.2.3 Unidades de cobertura del Terreno Guerrero (Arco<br>Amengarícuaro).....                        | 61 |
| 6.2.3.1 Formación las Anonas .....                                                                   | 61 |
| 6.2.3.2 Formación Playitas .....                                                                     | 61 |
| 6.2.4. Unidades de Cobertura Terciaria y Plio-Cuaternaria                                            | 63 |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2.4.1 Secuencia andesítica Etúcuaro-El Limoncito (SAEL).....                  | 63  |
| 6.2.4.2 Vulcanismo Plio-Cuaternario .....                                       | 63  |
| 6.2.4.2.1 Andesita-Basalto: El Sauz (ABS).....                                  | 63  |
| 6.2.4.2.2 Basaltos Tererio (BT) .....                                           | 64  |
| 6.2.4.2.3 Avalancha de escombros: Villa Madero (AEVM).....                      | 64  |
| 6.2.5 Eventos de Deformación del EPSD.....                                      | 64  |
| 6.2.5.1 Deformación D1 .....                                                    | 65  |
| 6.2.5.1 Deformación D2 .....                                                    | 67  |
| 6.3 Petrografía.....                                                            | 68  |
| 6.3.1 Complejo Arteaga .....                                                    | 68  |
| 6.3.1.1 Litarenitas de San Diego (LSD) .....                                    | 68  |
| 6.3.1.2 Pillow-lavas El Puente (Formación Charapo) .....                        | 69  |
| 6.3.2 Ensamble Plutónico de San Diego .....                                     | 71  |
| 6.3.2.1 Unidad Granito - San Diego .....                                        | 71  |
| 6.3.2.2 Unidad Tonalita - Frontera .....                                        | 73  |
| 6.3.2.3 Unidad Granodiorita - Nocupétaro .....                                  | 75  |
| 6.3.2.4 Unidad de Diorita-Norita “El Salitre” .....                             | 77  |
| 6.3.2.5 Diques-Dioríticos Tardomagmáticos .....                                 | 79  |
| 6.4.- Geoquímica.....                                                           | 81  |
| 6.4.1 Elementos mayores .....                                                   | 81  |
| 6.4.2 Elementos traza .....                                                     | 86  |
| 6.4.3 Geoquímica isotópica Sr y Nd .....                                        | 91  |
| 6.5 Geocronometría U/Pb en circones .....                                       | 94  |
| 6.5.1 Tipología de circones .....                                               | 94  |
| 6.6 Isotopía y edad U-Pb en circones .....                                      | 97  |
| 6.6.1 Edad de la Unidad del Granito de San Diego (UGSD) .....                   | 98  |
| 6.6.2 Edad de Unidad Tonalita Frontera (UTF) .....                              | 99  |
| 6.6.3 Edad de Unidad del Granito de Nocupétaro (UN) .....                       | 99  |
| 6.6.4 Edad de Unidad Diorita-Norita Salitre (UDNS) .....                        | 100 |
| 6.6.5 Edades de procedencia de la Unidad de Litarenitas de San Diego (LSD)..... | 101 |
| 7.- DISCUSIÓN .....                                                             | 103 |
| 7.1 Distribución espacial y estructura regional del EPSD .....                  | 103 |
| 7.2 Deformación post-magmática y estructura regional del EPSD.....              | 104 |

|                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.3 Variaciones petrológicas y geoquímicas del EPSD .....                 | 104        |
| 7.4 Edad del emplazamiento del EPSD.....                                  | 106        |
| 7.5 Mecanismo y condiciones físicas de emplazamiento del EPSD .....       | 108        |
| 7.6 Modelo de emplazamiento sin-orogénico (D <sub>1</sub> ) del EPSD..... | 110        |
| 7.7 Implicaciones tectónicas .....                                        | 112        |
| <b>8.- Conclusiones .....</b>                                             | <b>118</b> |
| <b>9.- Referencias .....</b>                                              | <b>120</b> |
| <b>Anexos .....</b>                                                       | <b>124</b> |

## Índice de figuras

*Figura 1: Modelo de emplazamiento de cuerpos magmáticos de tipo: A) pre- orogénico; B) sin- orogénico) post- orogénico. (Modificado de Ferré et al., 2012).*

*Figura 2: Mapa de la distribución de unidades físico-geográficas en la región de Michoacán y parte del Estado de México Guerrero y Jalisco (Después de Espinoza-Maya y Bollo-Manent 2017; consultar simbología). Notar el área de estudio en recuadro amarillo.*

*Figura 3: Mapa de localización y accesos al área de estudio; a) orografía, ríos y accesos principales; b) carreteras principales y municipales. Notar en rosa el polígono del área de estudio.*

*Figura 4: Distribución de los climas del área de estudio (después de García (1987) y CONABIO 1998).*

*Figura 5: Terrenos Tectonoestratigráficos de México, modificado de Centeno-García et al. (2016).*

*Figura 6: Magmatismo plutónico en el occidente de México (Sarmiento-Villagrana et al. (2017); Schaaf et al. (2020).*

*Figura 7: Importancia del Terreno Guerrero como encajonante de más del 60% de los yacimientos de Au y Ag en el país. Tomado de Resendiz-Zarco (2020) (modificado de Montiel-Escobar et al., 2015; Campa y Coney, 1983).*

*Figura 8: Mapa de la distribución del arco magmático cordillerano en el occidente de la República Mexicana durante el Jurásico Medio-Tardío (150 a 170 Ma.). Basado en datos de Schaaf et al. (2020).*

*Figura 9: Columna estratigráfica representativa de la región de San Diego Curucupatzeo (Después de las cartas geológico mineras E14-A43 y E14-A33 propuestas por el SGM).*

*Figura 10: Cartografía geológica de la región de San Diego Curucupatzeo, propuesta realizada por el Servicio Geológico Mexicano, en las cartas Villa Madero y Carácuaro.*

*Figura 12: Portadas y mapas principales del área de estudio.*

*Figura 13: Equipos utilizados durante la realización del trabajo petrográfico: A) máquina de corte tipo banco; B) sección delgada aglutinada destinada a cortadora de precisión Petrothin-Buehler (C); D) sección delgada pulida destinada al análisis microscópico utilizando equipo Olympus bx50 (E).*

*Figura 14: Procesos realizados en cada una de las muestras para la preparación de análisis geoquímicos e isotópicos.*

*Figura 14: Proceso de separación de circones. A) Secado de resina con luz infrarroja con circones montados en cilindros de baquelita; B y C fotomicrografía de la búsqueda y colecta de circones (B) y montado de circones en filas correspondientes a tamaños similares, nótese los círculos negros corresponden a burbujas de aire atrapado en la resina (C).*

*Figura 15: Equipo de Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI).*

*Figura 56: Dominios morfoestructurales en la región de Villa Madero-San Diego-Nocupétaro-Carácuaro.*

*Figura 67: Columna estratigráfica de la zona de estudio. Notar las relaciones temporales del basamento o roca encajonante, así como las unidades de cobertura del EPSD. Se indican además las etapas de deformación y la temporalidad de cada evento que dio lugar a los eventos geológicos de la zona de estudio.*

*Figura 18: Mapa geológico de la región de San Diego Curucupatzeo.*

*Figura 19: Fotografías de campo del Complejo Metamórfico de Carácuaro. A1) Detalle de plegamiento de la unidad LSD; A2) contacto por intrusión de la unidad EPSD a la unidad LSD en la localidad El Real; A3; A4 y A6 detalle del afloramiento de hornfels con abundante andalucita, localidad el Cuitzillo; A5) estructura disarmónico de la unidad metamorfizada, cerca del arroyo Patambo.*

*Figura 20: Fotografías de campo de la Unidad de pillow lavas El puente (PLP). B1) Localidad tipo, aflorante de las pillow-lavas en la zona de cizalla con el EPSD muestra el contraste de colores entre ambas unidades en afloramientos discontinuos; B2-B4 estructura almohadillada en bloques bien expuestos a lo largo del Río San Diego.*

Figura 36: Diagrama de índice de saturación de alúmina de Shand's (Maniar-Piccoli 1989), las muestras presentes corresponden al EPSD y la UDNS. Valores  $>1$  considerados como campo peraluminoso y valores  $<1$  correspondientes al campo metaluminoso en la relación  $Al/(Ca+Na+K)$ .

Figura 37: Diagrama ternario de clasificación normativa de Barker (1979) Ab-An-Or.

Figura 38: Diagrama multielemental normalizado con N-MORB (Sun y McDonough 1989) graficadas las muestras del EPSD y la UDNS.

Figura 39: Diagrama de elementos de Tierras Raras normalizado con Condrita (Sun y McDonough 1989) graficadas las muestras del EPSD y la UDNS (a); b) mismo diagrama multielemental con la gráfica de las PLP.

Figura 40: Diagrama de discriminación tectónica para basaltos de Meschede (1982) donde se grafican las muestras de la unidad de PLP considerando la relación  $Zr/4-Nb*2-Y$ .

Figura 41: Diagrama de discriminación tectónica de Pearce et al. (1984) considerado para rocas graníticas. (VAG = granitos de arco volcánico; ORG = granitos orogénicos; WPG = granitos intraplaca; syn-COLG = granitos sinorogénicos).

Figura 42: Diagrama De Paolo y Wasseburg (1979), se grafican las relaciones iniciales de  $\epsilon Nd_i$  vs  $^{87}Sr/^{86}Sr_{init}$  para las muestras del EPSD y la unidad de Diorita-Norita.

Figura 43: Fotografías de los concentrados de circones para dar continuidad con el proceso de montado y pulido, se hace notar la diversidad de tamaños obtenidos en cada muestra.

Figura 44: Clasificación morfológica Pupin (1980), de los circones del EPSD.

Figura 45: Tabla de clasificación morfológica propuesta por Pupin (1980) donde se considera el desarrollo de pirámides y prismas asociadas a temperatura de cristalización en los magmas. Las tipologías identificadas en el EPSD se señalan en las dos imágenes, las unidades félsicas con recuadros en color café en la imagen izquierda y en color marrón (lado derecho) las tipologías identificadas en la UDNS.

Figura 46: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la Unidad San Diego.

Figura 47: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la Unidad Frontera.

Figura 48: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la Unidad Nocupétaro.

Figura 49: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la UDNS.

Figura 50: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la LSD.

Figura 51: Modelos de Miller et al., 2007 a) posible origen de los circones en un sistema magmático compuesto en un sistema típico de arco continental maduro; b) modelo idealizado del reciclado de circones a medida que se inyectan pulsos magmáticos sucesivos acumulando circones que crecen desde un fundido inicial, reciclando antecristales y posiblemente xenocristales (roca caja), que podrán generar rangos de edades distintas asociadas a un componente de edad más joven como se muestra en el diagrama de concordia.

Figura 52: Esquema de perfil realizado en campo; afloramiento de la evidencia del metamorfismo de contacto (hornfels) con la generación de porfidoblastos alargados 2 y 4 con la sobresaturación de andalucita 1 y 3 al igual que la evidencia de los clastos rotados en todo el afloramiento como evidencia de un emplazamiento en zona compresiva. Las líneas amarillas representan el trayecto que sigue la carretera, para mayor detalle consultar el apartado de anexos.

Figura 53. Resultado de termometría (Ti-in-circón & Zircón-in-rutilo de Ferry & Watson (2007) para el EPSD y la UDN.

Figura 54: Modelo de emplazamiento del EPSD: Etapa 1- modelo de depósito de la secuencia de intercalación de areniscas, lutitas y horizontes de pedernal correspondiente a la Formación Varales, mientras se desarrolla el vulcanismo de dorsal meso-oceánica que da origen a las lavas almohadilladas; Etapa 2- inicio de la subducción, prisma de acreción e inicio del ascenso de los cuerpos magmáticos; Etapa 3- emplazamiento de los cuerpos magmáticos en una corteza relativamente delgada con un rápido ascenso de la unidad máfica, la acreción del TG genera cabalgaduras y zonas de cizalla; Etapa 4- emplazamiento de la unidad máfica en corteza superior dentro de estructuras compresivas que lo alojan en el anticlinal, a

## Índice de figuras

*Figura 1: Modelo de emplazamiento de cuerpos magmáticos de tipo: A) pre- orogénico; B) sin- orogénico) post- orogénico. (Modificado de Ferré et al., 2012).*

*Figura 2: Mapa de la distribución de unidades físico-geográficas en la región de Michoacán y parte del Estado de México Guerrero y Jalisco (Después de Espinoza-Maya y Bollo-Manent 2017; consultar simbología). Notar el área de estudio en recuadro amarillo.*

*Figura 3: Mapa de localización y accesos al área de estudio; a) orografía, ríos y accesos principales; b) carreteras principales y municipales. Notar en rosa el polígono del área de estudio.*

*Figura 4: Distribución de los climas del área de estudio (después de García (1987) y CONABIO 1998).*

*Figura 5: Terrenos Tectonoestratigráficos de México, modificado de Centeno-García et al. (2016).*

*Figura 6: Magmatismo plutónico en el occidente de México (Sarmiento-Villagrana et al. (2017); Schaaf et al. (2020).*

*Figura 7: Importancia del Terreno Guerrero como encajonante de más del 60% de los yacimientos de Au y Ag en el país. Tomado de Resendiz-Zarco (2020) (modificado de Montiel-Escobar et al., 2015; Campa y Coney, 1983).*

*Figura 8: Mapa de la distribución del arco magmático cordillerano en el occidente de la República Mexicana durante el Jurásico Medio-Tardío (150 a 170 Ma.). Basado en datos de Schaaf et al. (2020).*

*Figura 9: Columna estratigráfica representativa de la región de San Diego Curucupatzeo (Después de las cartas geológico mineras E14-A43 y E14-A33 propuestas por el SGM).*

*Figura 10: Cartografía geológica de la región de San Diego Curucupatzeo, propuesta realizada por el Servicio Geológico Mexicano, en las cartas Villa Madero y Carácuaro.*

*Figura 12: Portadas y mapas principales del área de estudio.*

*Figura 13: Equipos utilizados durante la realización del trabajo petrográfico: A) máquina de corte tipo banco; B) sección delgada aglutinada destinada a cortadora de precisión Petrothin-Buehler (C); D) sección delgada pulida destinada al análisis microscópico utilizando equipo Olympus bx50 (E).*

*Figura 14: Procesos realizados en cada una de las muestras para la preparación de análisis geoquímicos e isotópicos.*

*Figura 14: Proceso de separación de circones. A) Secado de resina con luz infrarroja con circones montados en cilindros de baquelita; B y C fotomicrografía de la búsqueda y colecta de circones (B) y montado de circones en filas correspondientes a tamaños similares, nótese los círculos negros corresponden a burbujas de aire atrapado en la resina (C).*

*Figura 15: Equipo de Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI).*

*Figura 56: Dominios morfoestructurales en la región de Villa Madero-San Diego-Nocupétaro-Carácuaro.*

*Figura 67: Columna estratigráfica de la zona de estudio. Notar las relaciones temporales del basamento o roca encajonante, así como las unidades de cobertura del EPSD. Se indican además las etapas de deformación y la temporalidad de cada evento que dio lugar a los eventos geológicos de la zona de estudio.*

*Figura 18: Mapa geológico de la región de San Diego Curucupatzeo.*

*Figura 19: Fotografías de campo del Complejo Metamórfico de Carácuaro. A1) Detalle de plegamiento de la unidad LSD; A2) contacto por intrusión de la unidad EPSD a la unidad LSD en la localidad El Real; A3; A4 y A6 detalle del afloramiento de hornfels con abundante andalucita, localidad el Cuitzillo; A5) estructura disarmónico de la unidad metamorfizada, cerca del arroyo Patambo.*

*Figura 20: Fotografías de campo de la Unidad de pillow lavas El puente (PLP). B1) Localidad tipo, aflorante de las pillow-lavas en la zona de cizalla con el EPSD muestra el contraste de colores entre ambas unidades en afloramientos discontinuos; B2-B4 estructura almohadillada en bloques bien expuestos a lo largo del Río San Diego.*

Figura 36: Diagrama de índice de saturación de alúmina de Shand's (Maniar-Piccoli 1989), las muestras presentes corresponden al EPSD y la UDNS. Valores  $>1$  considerados como campo peraluminoso y valores  $<1$  correspondientes al campo metaluminoso en la relación  $Al/(Ca+Na+K)$ .

Figura 37: Diagrama ternario de clasificación normativa de Barker (1979) Ab-An-Or.

Figura 38: Diagrama multielemental normalizado con N-MORB (Sun y McDonough 1989) graficadas las muestras del EPSD y la UDNS.

Figura 39: Diagrama de elementos de Tierras Raras normalizado con Condrita (Sun y McDonough 1989) graficadas las muestras del EPSD y la UDNS (a); b) mismo diagrama multielemental con la gráfica de las PLP.

Figura 40: Diagrama de discriminación tectónica para basaltos de Meschede (1982) donde se grafican las muestras de la unidad de PLP considerando la relación  $Zr/4-Nb*2-Y$ .

Figura 41: Diagrama de discriminación tectónica de Pearce et al. (1984) considerado para rocas graníticas. (VAG = granitos de arco volcánico; ORG = granitos orogénicos; WPG = granitos intraplaca; syn-COLG = granitos sinorogénicos).

Figura 42: Diagrama De Paolo y Wasseburg (1979), se grafican las relaciones iniciales de  $\epsilon Nd_i$  vs  $^{87}Sr/^{86}Sr_{init}$  para las muestras del EPSD y la unidad de Diorita-Norita.

Figura 43: Fotografías de los concentrados de circones para dar continuidad con el proceso de montado y pulido, se hace notar la diversidad de tamaños obtenidos en cada muestra.

Figura 44: Clasificación morfológica Pupin (1980), de los circones del EPSD.

Figura 45: Tabla de clasificación morfológica propuesta por Pupin (1980) donde se considera el desarrollo de pirámides y prismas asociadas a temperatura de cristalización en los magmas. Las tipologías identificadas en el EPSD se señalan en las dos imágenes, las unidades félsicas con recuadros en color café en la imagen izquierda y en color marrón (lado derecho) las tipologías identificadas en la UDNS.

Figura 46: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la Unidad San Diego.

Figura 47: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la Unidad Frontera.

Figura 48: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la Unidad Nocupétaro.

Figura 49: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la UDNS.

Figura 50: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la LSD.

Figura 51: Modelos de Miller et al., 2007 a) posible origen de los circones en un sistema magmático compuesto en un sistema típico de arco continental maduro; b) modelo idealizado del reciclado de circones a medida que se inyectan pulsos magmáticos sucesivos acumulando circones que crecen desde un fundido inicial, reciclando antecristales y posiblemente xenocristales (roca caja), que podrán generar rangos de edades distintas asociadas a un componente de edad más joven como se muestra en el diagrama de concordia.

Figura 52: Esquema de perfil realizado en campo; afloramiento de la evidencia del metamorfismo de contacto (hornfels) con la generación de porfidoblastos alargados 2 y 4 con la sobresaturación de andalucita 1 y 3 al igual que la evidencia de los clastos rotados en todo el afloramiento como evidencia de un emplazamiento en zona compresiva. Las líneas amarillas representan el trayecto que sigue la carretera, para mayor detalle consultar el apartado de anexos.

Figura 53. Resultado de termometría (Ti-in-circón & Zircón-in-rutilo de Ferry & Watson (2007) para el EPSD y la UDN.

Figura 54: Modelo de emplazamiento del EPSD: Etapa 1- modelo de depósito de la secuencia de intercalación de areniscas, lutitas y horizontes de pedernal correspondiente a la Formación Varales, mientras se desarrolla el vulcanismo de dorsal meso-oceánica que da origen a las lavas almohadilladas; Etapa 2- inicio de la subducción, prisma de acreción e inicio del ascenso de los cuerpos magmáticos; Etapa 3- emplazamiento de los cuerpos magmáticos en una corteza relativamente delgada con un rápido ascenso de la unidad máfica, la acreción del TG genera cabalgaduras y zonas de cizalla; Etapa 4- emplazamiento de la unidad máfica en corteza superior dentro de estructuras compresivas que lo alojan en el anticlinal, a

su vez el granitoide asciende con mayor diferenciación, en superficie se generan nuevas estructuras e inicia la erosión; Etapa 5- emplazamiento del granitoide (unidad félsica) por medio de las estructuras de cizalla que fungen como rampas de ascenso, mixing y mingling con la UDN, alojamiento en el anticlinal, levantamiento y erosión de la Formación Varales.

Figura 55: Diagrama TAS modificado por Wilson (1989) para rocas plutónicas del EPSD comparadas con la franja plutónica jurásica (FPJ): Complejo Sonobari (Sarmiento-Villagrana et al., 2017; Vega-Granillo et al., (2012); el ensamble plutónico de Tumbiscatío (Guevara-Alday 2020); Isla María (Pompa-Mera et al., 2013) y Cuale (Valencia et al., 2013).

Figura 96: B) Diagramas de clasificación geoquímica; A) Índice de saturación de alúmina o Shand's index de Maniar & Piccoli (1989) para rocas plutónicas del EPSD comparadas con la franja plutónica jurásica (FPJ). Simbología como en Figura 55. Patrones normalizados con condritas para REE Sun y McDonough (1989). La simbología corresponde con la figura 54.

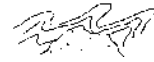
Figura 57: Diagrama de discriminación tectónica para granitoides de Pearse et al. (1984) relación Rb vs Y+Nb. Parámetros iniciales de  $\epsilon Nd_i$  vs  $^{87}Sr/^{86}Sr_i$ . Las bases de datos corresponden con las antes mencionadas en la figura 55.

Tabla 1: Unidades geológicas del Ensamble Plutónico de San Diego Curucupatzeo (EPSD) que muestra las relaciones temporales de su roca encajonante (Complejo Arteaga), así como las unidades de cobertura cretácica (Terreno Guerrero) y terciarias (Sierra de Mil Cumbres y Faja Volcánica Transmexicana). Notar la distribución temporal de dos fases de deformación orogénicas D1 y D2 que afectan al EPSD.

Tabla 2: Elementos mayores y traza del EPSD y las unidades de roca encajonante descritas como: LSD (Litarenitas San Diego) y PLP (Pillow Lavas el Puente).

Tabla 3: Tabla de resultados de elementos traza del EPSD y las unidades de roca encajonante descritas como: LSD (Litarenitas San Diego) y PLP (Pillow Lavas el Puente).

Tabla 4: Resultados y relaciones isotópicas de  $^{87}Rb/^{86}Sr$ ,  $^{87}Sr/^{86}Sr$ ,  $^{147}Sm/^{144}Nd$  y  $^{143}Nd/^{144}Nd$  de los análisis de roca total de las unidades félsicas y máficas del EPSD.



## 1.- Introducción

El emplazamiento de los cuerpos magmáticos graníticos se ha relacionado con ambientes de subducción o procesos de anatexis. Con base en su composición geoquímica e isotópica, es posible interpretar su afinidad tectónica y cortical y por consiguiente plantear un mecanismo de emplazamiento en la litósfera.

Los cuerpos magmáticos, además de su composición química, dependen en gran medida de la cantidad de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y otros volátiles que determinan su grado de viscosidad. Invariablemente tienden a migrar hacia la superficie y emplazarse en las rocas preexistentes afectadas por procesos de deformación con un mecanismo generalmente de tipo extensional post-orogénico, permitiendo un rápido ascenso hacia la superficie. Sin embargo, diversos estudios han establecido que la migración de los magmas puede también asociarse a sistemas tectónicos de tipo acrecionales o de transpresión, asistido por sistemas de cabalgamientos y zonas de cizalla en ambientes convergentes (Ferré et al., 2012; figura 1). En realidad, se esperaría que el emplazamiento de un magma en un régimen compresivo resulte menos favorable, no obstante, se ha comprobado que las grandes estructuras de fallas funcionan como rampas de ascenso durante la inyección de magma y que además conllevan a diferentes formas que dependen en gran medida del grado de viscosidad y tipo de magma. A este magmatismo se le conoce como de tipo **sin-orogénico**, el cual se distingue por su asociación con un régimen compresivo que desarrolla cabalgaduras o zonas de cizalla, esta última en ocasiones borrada por la erosión, pero que puede conservar su registro por medio de xenolitos, asociados a planos de cizalla de tipo milonítico, así como una aureola de contacto con porfiroblastos y forma asimétrica que se asocia al emplazamiento y acumulación de magma dentro de zonas de no-deformación aparente o charnela del anticlinal en la roca encajonante. Las relaciones de contacto de un sistema plutónico son fundamentales para determinar su afinidad pre- sin- o post-orogénica; por ejemplo, éstos últimos (post- orogénicos) se encuentran ligados a zonas de dilatación de fallas preexistentes que rigen la forma y orientación final de éstas intrusiones, cuyas formas son heterogéneas, esferoidales y de mayor volumen que las sin- orogénicas; las cuales son generalmente de menor volumen y dependientes del sistema de plegamiento y levantamiento tectónico y por lo tanto pueden tener límites verticales y en ocasiones foliación interna y externa que se asocia a la progresión de la deformación.

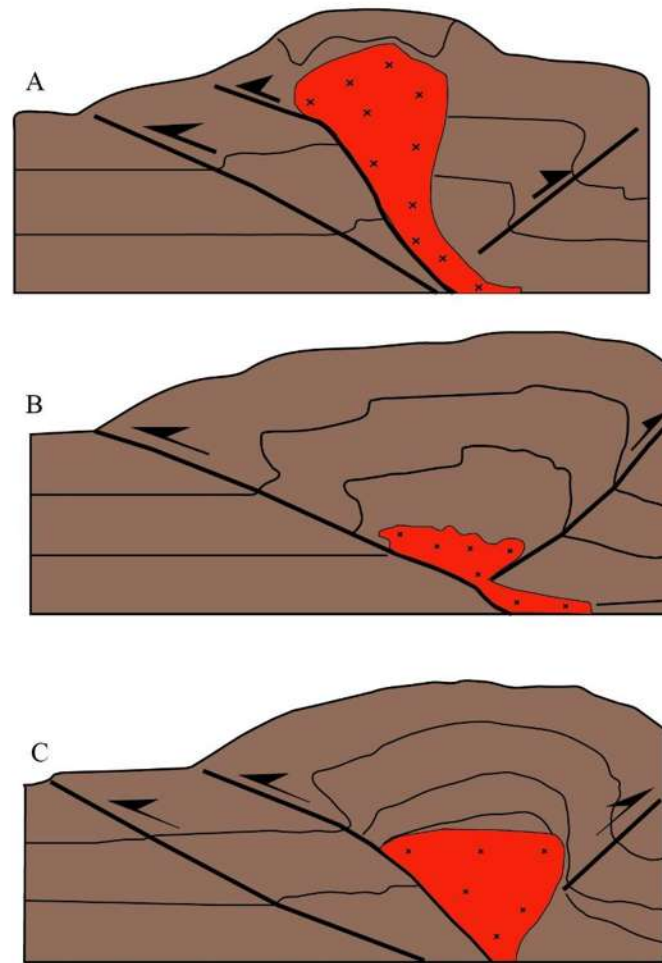
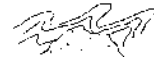


Figura 1: Modelo de emplazamiento de cuerpos magmáticos de tipo: A) pre- orogénico; B) sin- orogénico) post- orogénico. (Modificado de Ferré et al., 2012).

Es oportuno mencionar que los casos de estudio en plutones sin-orogénicos generalmente se han vinculado a procesos de fusión parcial (migmatitas) o anatexis (Nédélec y Bouchez 2015). Sin embargo, las relaciones de campo, firmas geoquímicas y su estructura no siempre revelan evidencias de fusión parcial, y hasta el momento han sido poco documentados. Diversos eventos de este tipo se han registrado en algunos países, uno de ellos se localiza en la provincia de Grenville en Canadá (Groulier et al., 2018); Cinturón plegado de Ribeira al SW de Brasil (Bento dos Santos et al., 2014); Cinturón de Hidaka, Japón (Shimura, 1992); Alto Himalaya, Tíbet (Harrison et al., 1997) por mencionar algunos.

En México se conocen diversos eventos de magmatismo sin-orogénico o sin-tectónico, por ejemplo, el granito de Comanja en la Sierra de Guanajuato de 51 Ma (Ortiz y Molina, 2019)

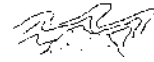


Concepción del Oro en Zacatecas ~42.5 y 32.3 Ma (Ramírez-Peña et al., 2019) y el Ensamble Plutónico de Tumbiscatío en el estado de Michoacán 161 Ma (Guevara-Alday, 2020), entre otros. El emplazamiento de cuerpos magmáticos de tipo sin-orogénico de edad jurásica ha sido poco estudiado en la República Mexicana y se cuenta con escasa información de su proceso evolutivo y asociación tectónica.

La mayor parte de los ejemplos de plutonismo sin-orogénico se encuentran en el Terreno Guerrero, el cual representa uno de los Terrenos tectonoestratigráficos más grandes de Norte América. Con base en sus diferencias estratigráficas, ha sido subdividido en cinco sub-terrenos: Tahue, Zihuatanejo, Guanajuato, Arcelia y Teloloapan (Centeno-García et al., 2003, 2008). Internamente se encuentran registrados una serie de eventos magmáticos de edades diversas y volúmenes variables. Dentro del registro magmático del Terreno Guerrero y se han identificado tres eventos principales: i) el magmatismo de piso oceánico con edades del Triásico; ii) el magmatismo jurásico con edades alrededor de 160 Ma y iii) el magmatismo de las secuencias volcánico sedimentarias del Cretácico (Centeno et al., 2003; 2016).

La composición química de los cuerpos magmáticos jurásicos que se han identificado dentro del Terreno Guerrero muestran un enriquecimiento relativo de  $K_2O$ ,  $Al_2O_3$  y  $SiO_2$  (wt%), que de acuerdo a la clasificación del índice de saturación de alúmina de Shand (1927) son clasificados como granitos tipo S, peraluminosos o granitos de dos micas, que resultan de la asimilación parcial de metasedimentos pelíticos ricos en aluminio. No obstante, su discriminación tectónica se ha vinculado con un origen de ambiente de arco magmático (Schaaf et al., 2020), aunque con firmas resultan corticales, lo que podría indicar un emplazamiento en una corteza relativamente delgada y relacionado a procesos de subducción rápidos (precoz) que se asocian generalmente a regímenes compresivos.

El Ensamble Plutónico de San Diego Curucupatzeo (EPSD) se considera parte de este conjunto de plutones jurásicos (Montiel-Escobar et al., 2015) localizado en el sub-terreno Zihuatanejo. Los estudios que lo describen están limitados a los realizados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en su cartografía geológico-minera y un par de artículos de investigación. Se ha descrito de manera genérica como un granito-granodiorita (Montiel-Escobar et al., 1999; Munguía y Rosales, 2007; Tapia y Rosales, 2008; Tapia-Cruz, 2012), con firmas de tipo calciocalino (Romero-Rojas et al., 2013) y se le ha asignado una edad terciaria entre el Eoceno-Oligoceno con un importante potencial aurífero (Romero-Rojas et al., 2013; Montiel-Escobar et al., 2015). Sin



embargo, hasta el momento no se han hecho estudios acerca de sus relaciones de contacto, edad y mecanismo de emplazamiento.

En este trabajo se presenta un estudio cartográfico, petrológico, geoquímico y geocronológico del Ensamble Plutónico de San Diego Curucupatzeo. Se discute su composición, mecanismo de emplazamiento e implicaciones tectónicas para contribuir en la comprensión del proceso magmático sin-orogénico durante el Jurásico en el suroccidente de México y el Terreno Guerrero.



## 2.- Generalidades

### 2.1 Área de estudio

#### 2.1.1 Localización

El EPSD se localiza en la porción centro-occidental de la República Mexicana y al este-noreste del estado de Michoacán entre la latitud  $19^{\circ} 26' 01''$  N y  $101^{\circ} 17' 03''$  longitud W (Figura 2). De acuerdo con Espinoza-Maya y Bollo-Manent (2017), se encuentra en la transición de dos provincias fisiográficas: la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y la Sub Provincia Mil Cumbres (X.55 en la Figura 2). De acuerdo a éstos autores, el área de estudio se ubica de manera local en el Distrito de Zinapécuaro-Cuitareo-Cerro de en Medio-Sierra de Mil Cumbres (A) y la Región de Villa Madero-San Antonio Villalongín-Cerro el Guaníl; Provincia Sierra Madre del Sur (SMS), Sub Provincia Depresión del Balsas, Distrito Cuitareo-Cerro Grande-Cerro Azul, Región Nocupétaro-Cerro de Mariana (Figura 2).

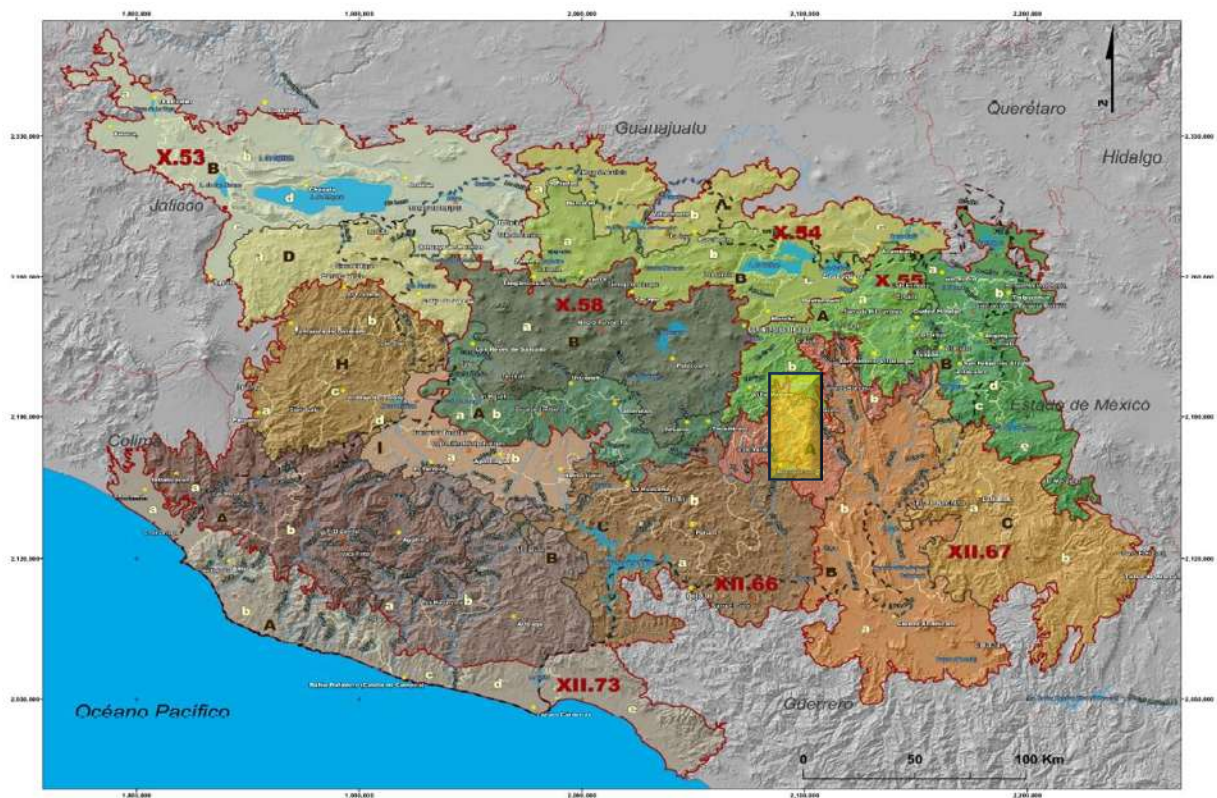
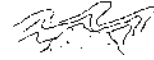


Figura 2: Mapa de la distribución de unidades físico-geográficas en la región de Michoacán y parte del Estado de México Guerrero y Jalisco (Después de Espinoza-Maya y Bollo-Manent 2017; consultar simbología). Notar el área de estudio en recuadro amarillo.



### 2.1.2 Vías de acceso

El polígono del área de estudio (Figura 3b) cubre gran parte de tres municipios: Villa Madero, Nocupétaro y Carácuaro (Figura 3a) porción nororiental del estado de Michoacán, cubriendo un área de 1456 km<sup>2</sup>. Los municipios se comunican mediante carreteras pavimentadas, mientras que las rancherías cuentan con caminos de terracería accesibles en zonas planas y se vuelven accidentados en ascensos con pendientes mayores a 30°.

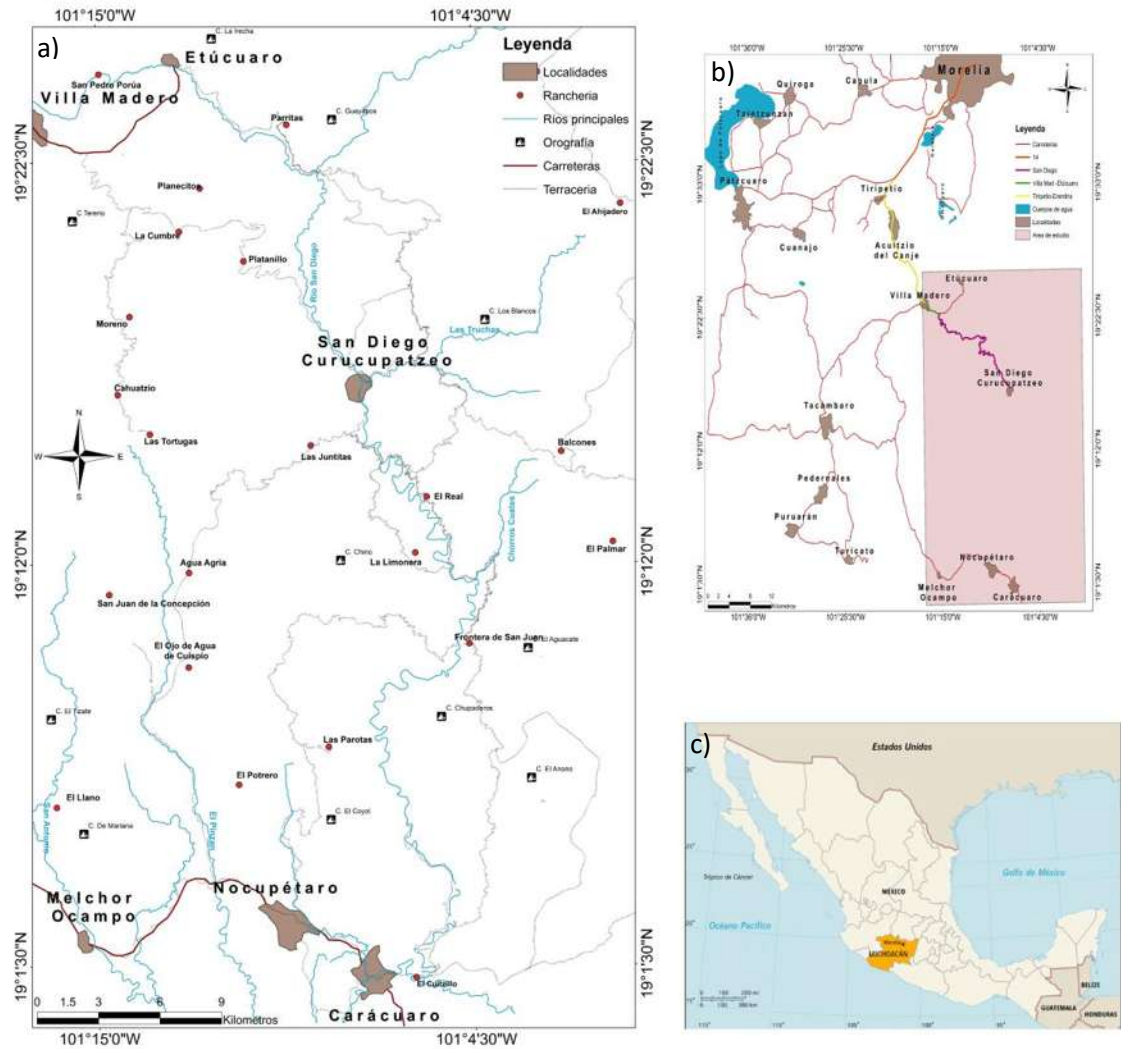


Figura 3: Mapa de localización y accesos al área de estudio; a) orografía, ríos y accesos principales; b) carreteras principales y municipales. Notar en rosa el polígono del área de estudio.

El acceso al área de estudio se logra a través de la carretera Morelia-Uruapan (14) durante un recorrido de 19 km, posteriormente se toma la bifurcación hacia la carretera que conduce al



municipio de Madero (carretera Tiripetio-Eréndira) durante los próximos 25 km hasta la cabecera municipal, a continuación se sigue la carretera que conduce a la localidad de Etúcuaro por 3 km, al llegar a la comunidad Loma de Cancho la dirección de avance es a través de la carretera en dirección sur, en este punto la carretera aún cuenta con pavimento los siguientes 18 km, posteriormente el camino se torna terracería en buenas condiciones con transporte de camiones colectivos y vehículos no necesariamente todoterreno con un recorrido de 19 km hasta la comunidad de San Diego.

### 2.1.3 Hidrografía, clima y vegetación

De acuerdo con datos del Instituto de Planeación del Estado de Michoacán de Ocampo (IPLAEM, 2021), el clima en la zona es preferencialmente tropical y estepario, con lluvias en verano, donde la oscilación en cuanto a su volumen ronda los 800 mm<sup>3</sup>, las temperaturas rondan los 15 °C como mínima y los 37 °C como temperatura máxima. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García (1987) escala 1: 1 000 000, el número de climas contenidos en la zona de estudio corresponde a seis (figura 4), donde el predominante es el (A)C(w1) semicálido subhúmedo con una cobertura de 454 km<sup>2</sup> con temperaturas medias anuales mayores a 18 °C, considerando 18 °C como la temperatura del mes más frío y 22 °C como la temperatura del mes más caliente, en cuanto a la precipitación del mes más seco es menor a 40 mm y las lluvias de verano con índice P/T varían entre 43.2 y 55 con un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual.

El segundo clima que se registra en la zona corresponde a la clasificación Aw1 clima cálido subhúmedo y cubre un área de 337 km<sup>2</sup>, con temperaturas medias anuales de 22 °C, la temperatura correspondiente al mes más frío es mayor a 18 °C, la precipitación del mes más seco es menor a 60 mm, las lluvias de verano tienen un índice de P/T entre 43.2 y 55.3, a su vez, el porcentaje de lluvia invernal oscila del 5% al 10.2% anual.

El tercer clima pertenece a la clasificación Awo clima cálido subhúmedo, el área que representa ronda los 314 km<sup>2</sup> el clima es de tipo cálido subhúmedo, con temperaturas medias anuales mayores a 22 °C y una temperatura mayor de 18 °C para el mes más frío, la precipitación del mes más seco en estos climas ronda los 0 y 60 mm, lluvias de verano con índice P/T menor a 43.2 y un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10% del total anual.

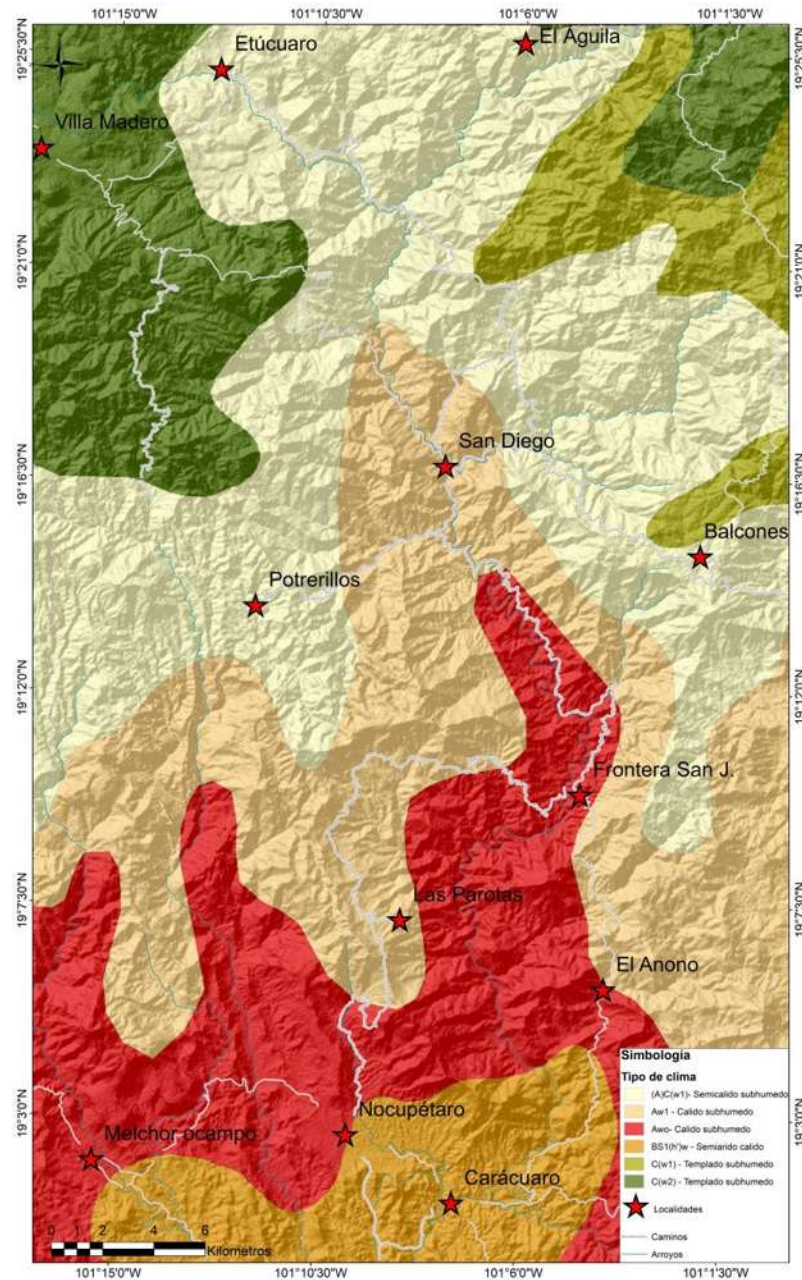
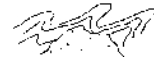


Figura 4: Distribución de los climas del área de estudio (después de García (1987) y CONABIO (1998)).

El cuarto clima pertenece a la clasificación tipo C(w2) con un área de cobertura cercana a los 170 km<sup>2</sup>, el clima es de tipo templado subhúmedo, con temperaturas medias anuales entre 12 °C y 18 °C, la temperatura en el mes más frío varía entre -3 °C y los 18 °C, con temperaturas de 22°C en el mes más caliente, la precipitación en el mes más seco corresponde a menos de 40 mm y lluvias de verano con índice de P/T mayores de 55 y un porcentaje de lluvia invernal de entre 5 a 10.2% del total anual.



El número cinco cubre la porción meridional denominada como Tierra Caliente, donde se tiene una clasificación BS1(h')w, con una cobertura de 104 km<sup>2</sup> concerniente a semiárido cálido, con temperaturas medias anuales mayores a 22 °C y una temperatura de 18 °C en el mes más frío, en esta zona las lluvias de verano y su porcentaje de lluvia invernal ronda los 5% a 10.2% del total anual.

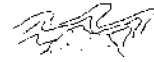
Finalmente, la clasificación C(w1) cubre la porción NE distribuida en la Sierra de Mil Cumbres, el área estimada ronda los 76 km<sup>2</sup>, siendo un clima de tipo templado subhúmedo con temperaturas que oscilan los 12 °C y 18 °C, las temperaturas correspondientes al mes más frío van de -3 °C a 18 °C, mientras que la temperatura en el mes más caliente se estima en 22 °C, en cuanto a la precipitación del mes con mayor sequía es menor a 40mm, las lluvias de verano tienen índices de P/T entre 43.2 y 55, con un porcentaje invernal del 5% al 10% en su totalidad anual.

El uso y la vegetación de los suelos generalmente está asociado a las actividades ganaderas, agrícolas y forestales que se encuentran directamente influenciadas por los climas de la región como se pudo observar en la figura 4, siendo predominantes los climas cálidos. La vegetación es muy variable, conteniendo: bosques de pino-encino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino, agricultura de temporal, bosque de encino, pastizal inducido, agricultura de riego, vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino con agricultura nómada, vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia con agricultura nómada y selva baja caducifolia. Su hidrografía es caracterizada por su región hidrográfica perteneciente al Balsas y la cuenca de la Región de Tacámbaro representado por los ríos: San Diego, Etúcuaro, Boca de Leones, El Capulín, El Tigre, Los Llanos. Como cuerpos de agua superficiales se generan excavaciones (antropogénicas) para pozos de captación de agua de escorrentía y arroyos en ciertas zonas.

## **2.2 Planteamiento del problema**

El magmatismo y metamorfismo jurásico en el Terreno Guerrero constituye el registro de un proceso orogénico previo a la evolución de las secuencias de arco volcánico cretácicas. Dicho registro no ha sido suficientemente estudiado.

A pesar de que se presentan en la literatura algunas descripciones de campo, mineralógicas y petrográficas de los plutones de edades jurásicas del Terreno Compuesto Guerrero, hasta el momento se han realizado pocos estudios geoquímicos e isotópicos que describan a detalle sus rasgos geoquímicos y contribuyan a comprender los procesos de emplazamiento de dichos plutones.



## 2.3 Justificación

El Ensamble Plutónico San Diego (EPSD) representa una de las exposiciones más destacadas del magmatismo plutónico jurásico en el Terreno Guerrero, su estudio a detalle desde una perspectiva geológico-estructural, petrológico geoquímico y geocronológico puede proporcionar información relevante para la reconstrucción tectónica y orogénica de las secuencias pre-arco cretácicas y cenozoicas del sur occidente de México. Por lo tanto, es una pieza clave para entender el mecanismo de emplazamiento y su evolución tectónica.

## 2.4 Hipótesis

El Terreno Guerrero alberga una serie de cuerpos plutónicos asociados con un evento de arco magmático durante el Jurásico, si consideramos este evento con su relativa contemporaneidad con la amalgamación del TG donde se ha generado el emplazamiento del ensamble plutónico de San Diego Curucupatzeeo puede que presente rasgos de tipo sin-orogénico asociado a firmas geoquímicas que lo ligan a un proceso de subducción precoz pre-Cretácico.

## 2.5 Objetivos

### 2.5.1 Objetivo general

Determinar la naturaleza petrológica, geoquímica, geocronológica y el ambiente tectono-magmático de emplazamiento del complejo Plutónico de San Diego Curucupatzeeo, así como interpretar su carácter peraluminoso, rasgo que es compartido con otras porciones del arco Jurásico en el occidente de México.

### 2.5.2 Objetivos particulares

1.- Reconocer y describir morfológica y mineralógicamente las unidades petrológicas que componen al complejo plutónico y a la roca encajonante.

2.- Identificar las relaciones de emplazamiento e historia magmática del complejo plutónico utilizando las características mineralógicas y geoquímicas de elementos mayores, traza y relaciones isotópicas.

3.- Determinar la edad de emplazamiento del EPSD y establecer sus relaciones de contacto.

4.- Discutir la asociación entre el emplazamiento del EPSD con otros plutones jurásicos del Terreno Guerrero y su relación temporal y espacial con los procesos orogénicos mesozoicos del sur de México.



### 3.- Marco Tectónico

El Terreno Guerrero (TG) se expone prácticamente en toda la margen occidental mexicana (Figura 5) y está compuesto esencialmente por una serie de secuencias volcánico-sedimentarias de origen de arcos de islas submarinos y de mares someros que se desarrollaron a lo largo de la margen Pacífica mexicana que van desde el Jurásico al Cretácico tardío (Corona-Chávez, 1999; Centeno et al., 2003; 2011; 2016). De acuerdo con estudios estratigráficos, estructurales, petrográficos, geocronológicos y geoquímicos, el Terreno Guerrero Compuesto ha sido dividido en cinco principales sub-terrenos: Tahue, Arcelia, Zihuatanejo, Teloloapan y Guanajuato (Centeno-García et al., 2011; 2016).

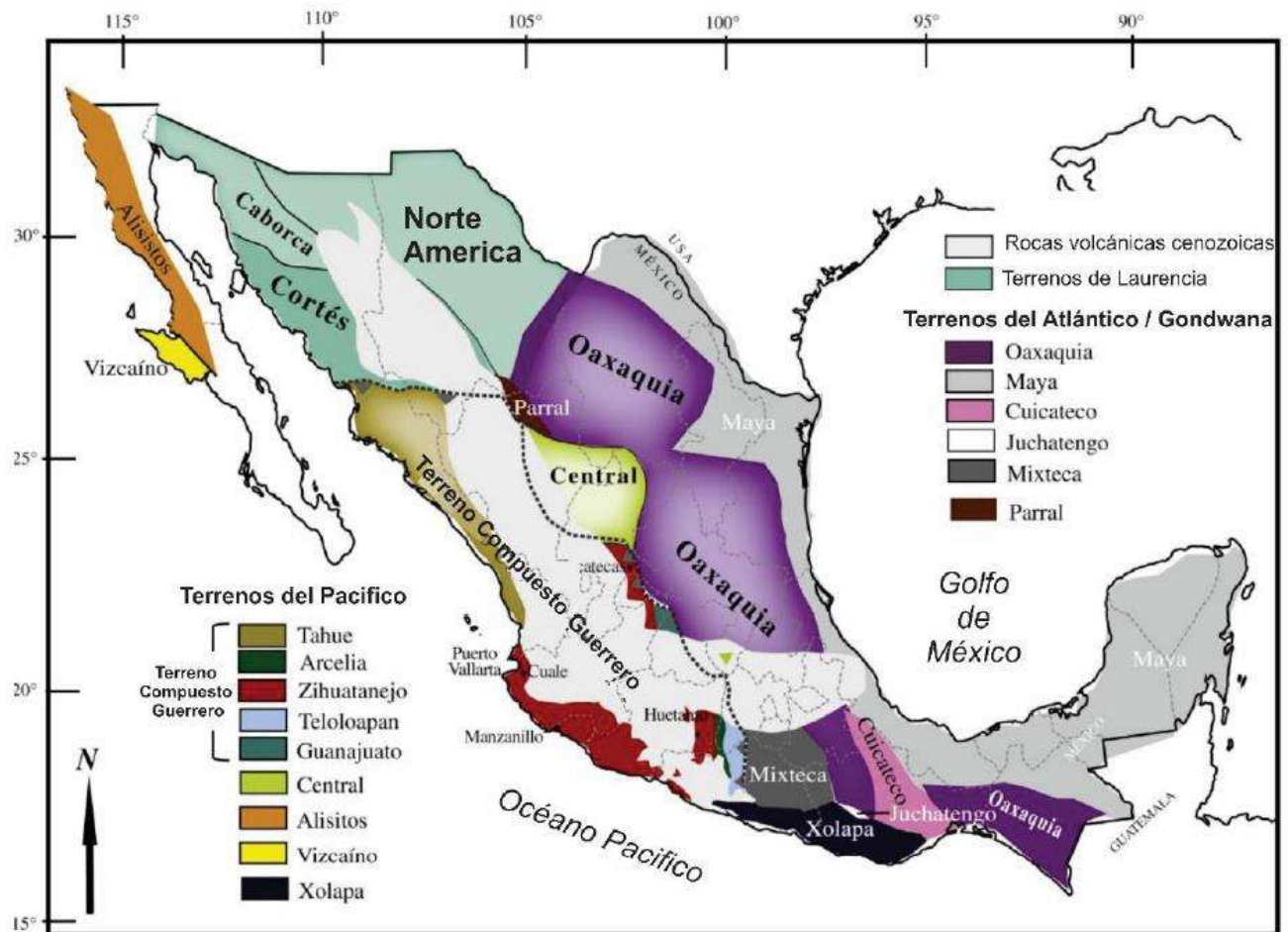


Figura 5: Terrenos Tectonoestratigráficos de México, modificado de Centeno-García et al. (2016).



Uno de los rasgos característicos que se han reconocido dentro del TG es la presencia de un basamento silíciclastico que forma parte del sub-terreno Zihuatanejo, distribuido en mayor proporción al suroccidente de la República Mexicana y denominado Complejo Arteaga. Este complejo metamórfico está compuesto por una sucesión de areniscas, pillow-lavas, flujos masivos, gabros bandeados y horizontes de pedernal. Su estructura se asocia con al menos dos eventos de deformación y metamorfismo en facies de esquistos verdes a anfibolita. Se le ha asignado edades que corresponden al Triásico (Carniense-Noriense) y una afinidad MORB en las pillow-lavas que le relacionan con una cuenca submarina de subsidencia con y generación de corteza oceánica.

Sobreyaciendo al Complejo Arteaga se identifica una secuencia cretácica con vulcanismo submarino a subaéreo con la presencia de huellas de dinosaurio, lo que representa un evento de arco volcánico cercano al continente donde se interpreta una conexión relativamente cercana.

Dentro del Terreno Guerrero se han identificado una serie de eventos magmáticos originados desde el Permo-Triásico hasta el Eoceno. I) magmatismo jurásico esencialmente plutónico; ii) magmatismo de arco volcánico cretácico; magmatismo plutónico de composición granítica con edades del Paleoceno-Eoceno. Sin embargo, uno de los rasgos más notables del TG al suroccidente de México, se refiere al registro concomitante pero muy extendido de cuerpos plutónicos de edad jurásica (Centeno-García et al., 2003; Sarmiento-Villagrana et al., 2017; Schaaf et al., 2020; Figura 6). Este evento ha sido asociado al emplazamiento de un arco magmático relacionado con un proceso de subducción y al vulcanismo asociado (Centeno-García et al., 2008). Dicho arco magmático jurásico se extiende a lo largo de la margen occidental mexicana, desde Michoacán hasta Sonora y parte de Baja California; comprende en su mayoría cuerpos graníticos de composición granodiorítica a granítica que en su mayoría se han emplazado en secuencias sedimentarias.

El registro de magmatismo jurásico representa una de las franjas más externas, pero también muy dispersa y con plutones erosionados, comparado con todos los eventos magmáticos en el occidente de la República Mexicana (Figura 8). Sin embargo, algunos cuerpos han sido bien descritos en los estados de Sinaloa, Sonora, Nayarit, Jalisco y Michoacán (Sarmiento-Villagrana et al., 2017; Schaaf et al., 2020; Guevara-Alday, 2020). El emplazamiento de estos cuerpos ocurrió en basamentos de naturaleza distinta, ya que intrusión remanentes de complejos acrecionales constituidos por cuencas de subsidencia silíciclasticas triásicas con fragmentos exóticos de vulcanismo tipo MORB y por lo tanto están caracterizadas por ser una litósfera de tipo juvenil.

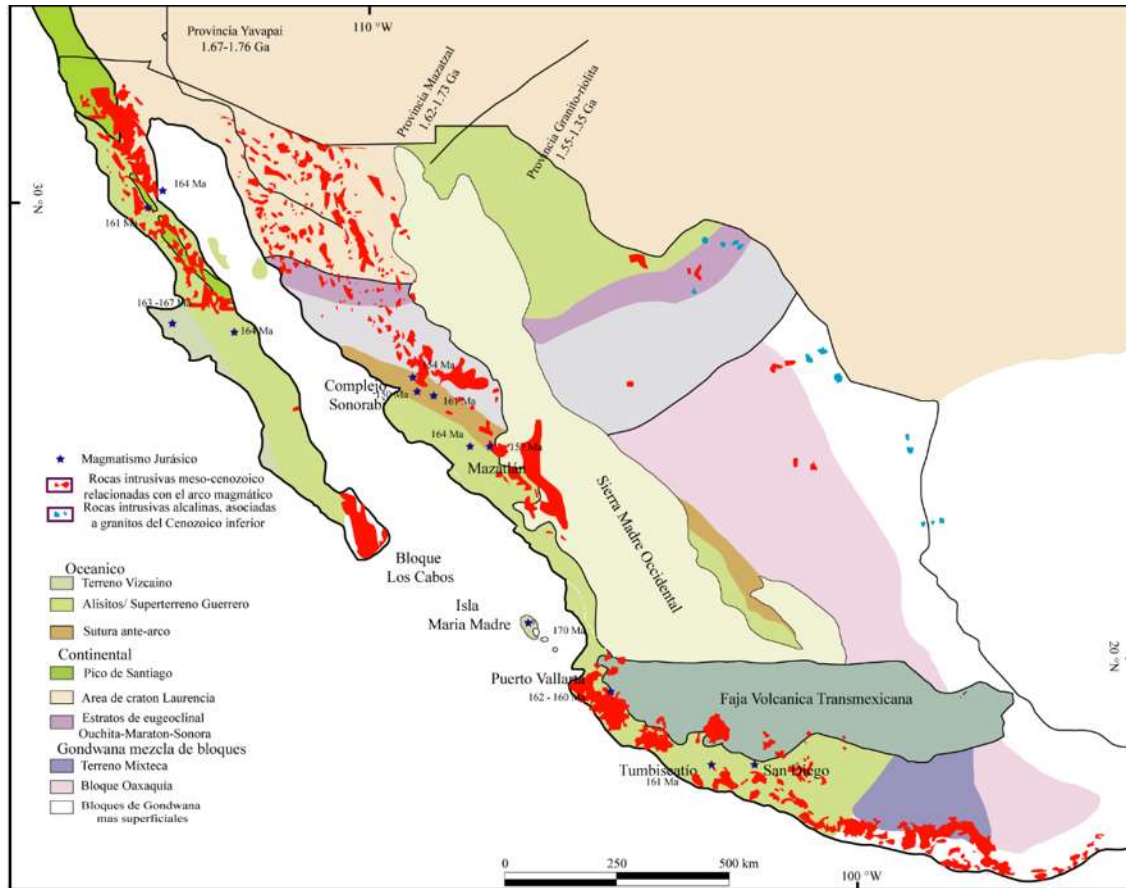
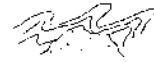


Figura 6: Magmatismo plutónico en el occidente de México (Sarmiento-Villagrana et al. (2017); Schaaf et al. (2020).

La Franja Plutónica Jurásica (FPJ) se expone a lo largo de la margen del pacífico extendida en una longitud cercana a los 1,170 km. La exhumación de los cuerpos plutónicos es variable, limitándose a cuerpos relativamente voluminosos poco expuestos e irregulares (Figura 6 y 8). En relación con su distribución, la cartografía propuesta por diversos autores permite apreciar la tendencia preferencial de estos cuerpos, que se emplazan con orientaciones laramídicas NNW-SSE, sin tener hasta el momento certeza de que estos cuerpos fueron deformados internamente, sin embargo, algunos de ellos exhiben el registro laramídico y no se descarta la posibilidad de correlacionar los restantes con un proceso similar basados en su temporalidad.

Desde el punto de vista estructural y tectónico, su emplazamiento se ha asociado con un proceso extensional o de cizalla que permitió el rápido ascenso a través de estructuras generadas durante su deformación en un sistema de tipo sin-orogénico pre-Cretácico para estos cuerpos que cristalizaron cercanos a la superficie (Guevara Alday, 2020).



Aunque aparentemente los cuerpos plutónicos jurásicos en el occidente de la República Mexicana muestran una relativa homogeneidad geoquímica, las rocas que forman parte de su basamento corresponden a diversidades litológicas. Por ejemplo, en Sonora se registra un emplazamiento dentro de lo que se ha denominado Complejo Sonobari; que está constituido por rocas sedimentarias del Terreno Guerrero (Sarmiento-Villagrana et al., 2017).

En Sinaloa, las rocas cortadas por el cuerpo ígneo son metasedimentos de esquistos, filitas, paragneis y calizas que forman parte del basamento en esta región (Arrieta-García et al., 2016).

En el estado de Jalisco, en Cuale, se reportan dos eventos de emplazamiento, que consisten en un vulcanismo de tipo riolítico de 157-154 Ma asociado a un depósito de sulfuros masivos vulcanogénicos (VMS) Bissig et al. (2008) y un evento granítico que se ha denominado Ensamble de Cuale, que consiste en un granito de dos micas con firmas calci-alcálinas con edades reportadas de  $160.4 \pm 2.5$  y  $161.3 \pm 1.3$  Ma (Schaaf et al., 2020; Valencia et al., 2013); estos cuerpos ígneos cortan una secuencia de esquistos pelíticos. Mientras que, cercano a la costa dentro de las Islas Marías se han reportado como las rocas más antiguas ortogneises de biotita bandeados y migmatitas con edades de 170 Ma, consideradas como un posible basamento (Pompa-Mera, 2014).

En la región de Tumbiscatío un cuerpo plutónico se encuentra intrusionando al Complejo Arteaga en la denominada Formación Varales, que se caracteriza por una secuencia de areniscas, lutitas, cuarzo-arenitas y esquistos (Guevara-Alday, 2020). La composición de estos cuerpos es preferencialmente granítica a granodiorítica, mientras que sus relaciones de contacto están asociados a un régimen de extensión y zonas de cizalla. En algunos casos se observan zonas de metamorfismo de contacto de baja presión y relativa alta temperatura (Guevara-Alday, 2020).

Los granitoides jurásicos con mayor similitud entre sí temporalidad de emplazamiento y en contenidos minerales son: el Ensamble de Cuale, Ensamble Plutónico de Tumbiscatío, Isla María Madre y el Batolito de Sinaloa. En estos cuerpos magmáticos, se ha identificado la presencia de moscovita y biotita que permiten clasificarlos como granitos de dos micas, mientras que basándonos en el diagrama de Shand (1927), que establece el índice de saturación de alúmina, se clasifican como tipo per-aluminoso, mientras que la temporalidad de cristalización resulta contemporánea en un rango estrecho de edades que van de  $160.06 \pm 1.3$  a 163 Ma.

Los datos geoquímicos muestran contenidos variables de  $\text{SiO}_2$  que van de 49 a 80.5 wt% teniendo como promedio valores de 67.52 wt%, mientras que los contenidos en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  presentan un



valor de 12.39 a 17.23 wt% con cantidades significativas en CaO, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O. Tomando esto en consideración, la mayoría de ellos grafican en el campo de los granitos peraluminosos de tipo S, esto de acuerdo al diagrama de saturación de alúmina de Shand (1927). De acuerdo con Pearce et al. (1984), los elementos traza en los plutones jurásicos presentan afinidad de arco volcánico granítico (VAG) con tendencia a los granitos intraplaca (WPG). Por otra parte, los isotopos de estroncio muestra relaciones iniciales de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  que varían de 0.70348 a 0.71302 y valores iniciales de  $\epsilon\text{Nd}$  entre -5.7 hasta +6.4, aunque la mayoría de los valores son negativos (p.eg., Pompa-Mera et al., 2013; Sarmiento-Villagrana et al., 2017).

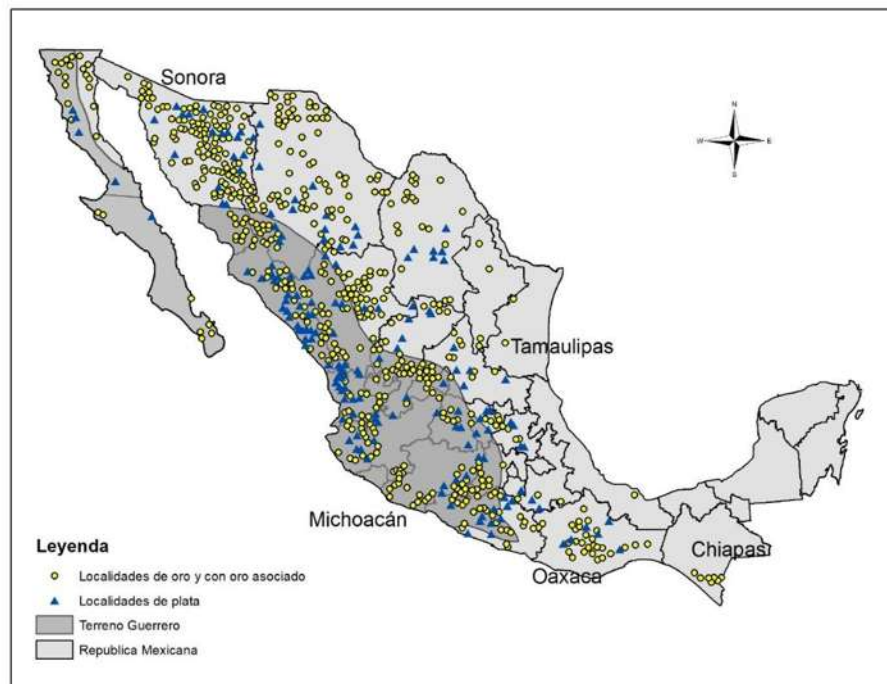
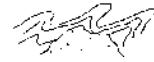


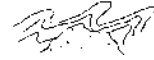
Figura 7: Importancia del Terreno Guerrero como encajonante de más del 60% de los yacimientos de Au y Ag en el país.

Tomado de Resendiz-Zarco (2020) (modificado de Montiel-Escobar et al., 2015; Campa y Coney, 1983).

Por otro lado, a pesar de que este magmatismo presenta rasgos geoquímicos que sugieren subducción (Centeno et al., 2008; Schaaf et al., 2020), sus firmas geoquímicas también presentan rasgos de afinidad cortical o de un magmatismo de tipo sin-orogénico (Guevara-Alday, 2020), lo cual sugiere que el magma habría asimilado parcialmente metasedimentos pelíticos durante su emplazamiento a través de estructuras extensivas o de compresión, generando o no deformación interna y siendo los últimos cuerpos graníticos en cristalizar dentro de este periodo geológico.



Por último, diversos eventos magmáticos del Terreno Guerrero han estado asociados al emplazamiento de los numerosos yacimientos minerales en el occidente de país (Figura 7). La distribución de los yacimientos ha permitido proponer franjas metalogenéticas distribuidas a lo largo y ancho del occidente del país (Campa y Coney, 1983; Montiel-Escobar et al., 2015).



## 4.- Geología regional del Ensamble Plutónico de San Diego Curucupatzeeo.

El Ensamble Plutónico de San Diego es uno de los tres ensambles que forman parte de la Franja Plutónica Jurásica (FPJ) que aflora en la porción occidental de los estados de Jalisco y Michoacán (Figura 7).

### 4.1 Magmatismo Jurásico Occidental

Se tiene un amplio registro de una serie de eventos magmáticos originados durante el periodo Jurásico en México. Dichos eventos ocurrieron dentro de la margen continental Pacífica desde Sonora hasta Michoacán (Figura 8). Estos cuerpos son esencialmente plutónicos y algunos de origen volcánico, todos ellos muestran similitud en su geoquímica y en su edad, así como su afectación directa intrusionando al Terreno Guerrero. Parte de la descripción de diversos autores se presenta a continuación:

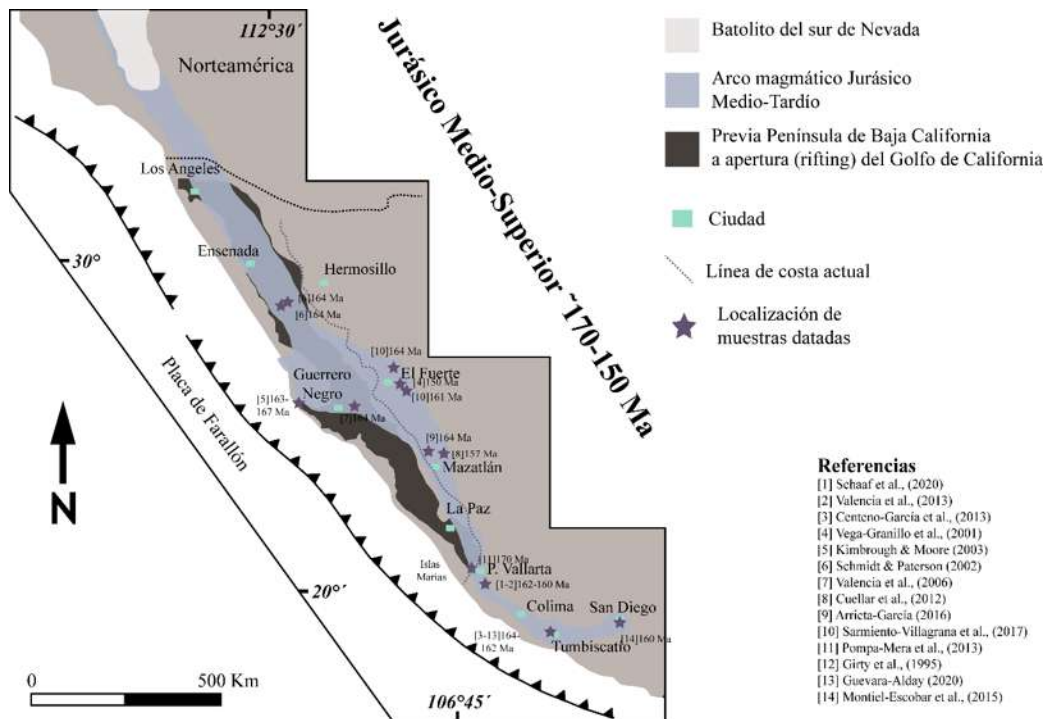
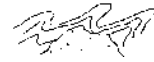


Figura 8: Mapa de la distribución del arco magmático cordillerano en el occidente de la República Mexicana durante el Jurásico Medio-Tardío (150 a 170 Ma.). Basado en datos de Schaaf et al. (2020).



#### 4.1.1 Granito Cubampo

En Sinaloa se han reportado edades del Jurásico de un granitoide denominado Granito Cubampo. Ha sido descrito por Vega-Granillo et al. (2012) como un stock granítico que presenta una forma irregular con enclaves de cuarzodiorita y diques aplíticos. Las aplitas presentan una edad (U-Pb) de  $155 \pm 4$  Ma. La mineralogía del granito consiste en feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, moscovita, biotita, titanita y circones. De acuerdo a los resultados geoquímicos lo clasifican como un granito tipo subcalino peraluminoso, presentan valores altos en su contenido de  $\text{SiO}_2$  (75-78%) y FeO (2,2-3,4 %). Muestra enriquecimiento de los LREE con una notable anomalía negativa de Eu y patrones casi planos de HREE. Sarmiento-Villagrana et al. (2016; 2017) reportan edades (U-Pb) similares de este cuerpo granítico y de un ortogneis de 155-151 Ma y 163-159 Ma, respectivamente con variaciones composicionales que van de sienodiorita, granodiorita y granito. De acuerdo con sus resultados geoquímicos, proponen un escenario de arco volcánico e intra-placa que se encuentra asociado a una fase extensional, ya que encuentran anomalías positivas de K, Rb, Ba, Th y anomalías negativas de Nd, Ta, P y Ti.

#### 4.2.2 Isla María Madre

La Isla Madre se localiza en el Océano Pacífico a 112 km de las costas de Nayarit. Aflora un ortogneis migmatítico descrito por Pompa-Mera (2014) que presenta textura gnéissica color gris claro, sus bandas alternan entre leucocráticas y mesocráticas con espesores que varían entre 2 mm y ~5 cm. Sus bandas leucocráticas están formadas por cristales de cuarzo, plagioclasa, feldespato K,  $\pm$  biotita  $\pm$  moscovita, mientras que las bandas mesocráticas se componen de cuarzo, feldespato K, biotita y clorita. La composición geoquímica varía entre 67.11 – 75.05 wt %  $\text{SiO}_2$ , con un relativo enriquecimiento en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13.05-17.18 wt%), que de acuerdo a la clasificación de Shand (1927) es relativamente peraluminoso  $\text{ASI} > 1$ . Los elementos traza indican un origen de arco magmático con algunas muestras con tendencia de tipo intraplaca. Las relaciones isotópicas indican que algunos de los ortogneises derivan de una fuente ígnea de origen mantélico o que tuvieron una incorporación posterior de un material menos diferenciado, pero con una importante influencia cortical. Los fechamientos mediante el sistema U-Pb indican una edad de  $162.7 \pm 2.9$  Ma considerada como la edad de cristalización.

#### 4.1.3 Cuale

Dentro del bloque Jalisco se han identificado dos cuerpos magmáticos del jurásico, uno correspondiente a un evento volcánico y otro de tipo plutónico. Bissig et al. (2008) realizaron

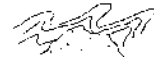


estudios dentro de una secuencia riolítica que está asociada con un evento de mineralización de sulfuros masivos vulcanogénicos (VMS) que es considerado como uno de los yacimientos más antiguos en su tipo localizado en el occidente de la República Mexicana, ya que se ha reportado un rango de edades geocronológicas por U-Pb de  $157.2 \pm 0.5$  a  $154.0 \pm 0.9$  Ma. Las firmas químicas reportadas se interpretan como calcialcalinas con transición a toleíticas con afinidades de tipo arco volcánico y sin-colisional.

En las periferias del distrito minero de Cuale, se ha reconocido una unidad plutónica de tipo granítica, reconocida como “granito de Cuale” con edades (U-Pb) de  $160.4 \pm 2.5$  Ma (Valencia et al., 2013; Schaaf, 2020) (Valencia et al., 2013; Schaaf et al., 2020). Se trata de un cuerpo granítico que, de acuerdo a la proporción  $\text{FeO} / (\text{FeO} + \text{MgO})$  vs  $\text{SiO}_2$ , se clasifica como de tipo magnesiano con firmas de afinidad calcialcalina relacionado a un ambiente de arco magmático. Sin embargo, Schaaf et al. (2020) reporta también un granito de dos micas y por lo tanto peraluminoso o de tipo-S, además de asociarlo a un magmatismo de afinidad cortical de acuerdo con sus proporciones isotópicas Sr y Nd. No se observa deformación, pero sí metamorfismo de contacto con hornfels en la zona de contacto.

#### **4.1.4 Ensamble plutónico de Tumbiscatío**

Este cuerpo fue descrito por Centeno-García et al. (2003, 2008) como un cuerpo plutónico que presenta variaciones que van de granodiorita, granito a cuarzo-monzonita. Su composición mineral es esencialmente cuarzo, plagioclasa, feldespato, clinopiroxeno, biotita y moscovita. Posteriormente, Guevara-Alday (2020) lo describe como un granitoide que presenta variaciones composicionales que van desde monzonita, sienita hasta granodiorita, además de que es cortado por diques tabulares. El emplazamiento de este cuerpo magmático generó metamorfismo de contacto que formó hornfels con andalucita, plagioclasa y biotita. Este cuerpo plutónico cubre un área de  $32.755 \text{ km}^2$ . Se clasifica como de tipo peraluminoso. Sin embargo, los elementos traza presentan anomalías negativas de Nb, Sr y Ti con un enriquecimiento de LREE respecto a las HREE, sugiriendo, con base en los diagramas de Sun y MacDonough, una afinidad tectónica que se relaciona a un arco magmático. Las edades isotópicas obtenidas mediante el método U-Pb son de  $164.4 \pm 2.6$  y  $161.75 \pm 0.36$  Ma, considerada como la edad de cristalización. Otro de los rasgos característicos es que de acuerdo con sus variaciones petrológicas y geoquímicas se ha propuesto un emplazamiento a través de estructuras de fallas extensionales que permitieron un rápido ascenso de este cuerpo plutónico; dicho sistema extensional se encuentra asociado a un sistema de



plegamiento generado en una zona de régimen dúctil-frágil asociado a un sistema de tipo sin-orogénico.

## 4.2 Geología local del EPSD

El EPSD se encuentra ubicado entre los límites de la Faja Volcánica Transmexicana y la Sierra madre del Sur, unidades volcánicas terciarias que se encuentran sobreyaciendo a una serie de formaciones del Terreno Guerrero, donde el subterreno Zihuatanejo, como se ha descrito en el apartado interior incluye una serie de cuerpos plutónicos de edad jurásica.

En el área de estudio se han descrito cinco unidades principales: las unidades de basamento del subterreno Zihuatanejo: i) Complejo Metamórfico de Carácuaro (Complejo Arteaga) que incluye al mismo EPSD; ii) la secuencia volcánico-sedimentaria cretácica (Arco Amengarícuaro; Conglomerado polimíctico de la Formación Playitas y la Diorita La Noria) y iii) las unidades volcánicas terciarias de cobertura: Sierra de Mil Cumbres, la Caldera de Villa Madero, así como un cuerpo hipabisal de tipo pórfido riolítico (La Conquista) (ver columna estratigráfica en la figura 9).

### 4.2.1 Complejo Metamórfico de Carácuaro (Complejo Arteaga).

Centeno- García et al. (2003) divide al Complejo Arteaga en varias unidades litológicas, una de ellas, que se ha considerado como la más importante y extensa, es la que corresponde a la Formación Varales, que está constituida por una sucesión sedimentaria marina terrígena con areniscas cuarzosas, arcosas, cuarcitas o pedernal asociadas con una amplia matriz de lutitas y limolitas. Estas secuencias son de tipo rítmicas con espesores variables (de 2 cm a 2 m de espesor). Se han encontrado también de forma esporádica algunos conglomerados como rellenos de canales. La localidad tipo ha sido descrita en los cortes carreteros de Barranca Honda, cercanos a Arteaga, estas areniscas son ricas en cuarzo, con grano fino y bien seleccionadas, su composición es de granos de cuarzo, líticos y feldespato ( $Qz=89$ ,  $L=9$ ,  $Kfs=2\%$ ). La procedencia de estos se asigna como de origen ígneo (granito y félsico) y sedimentario.

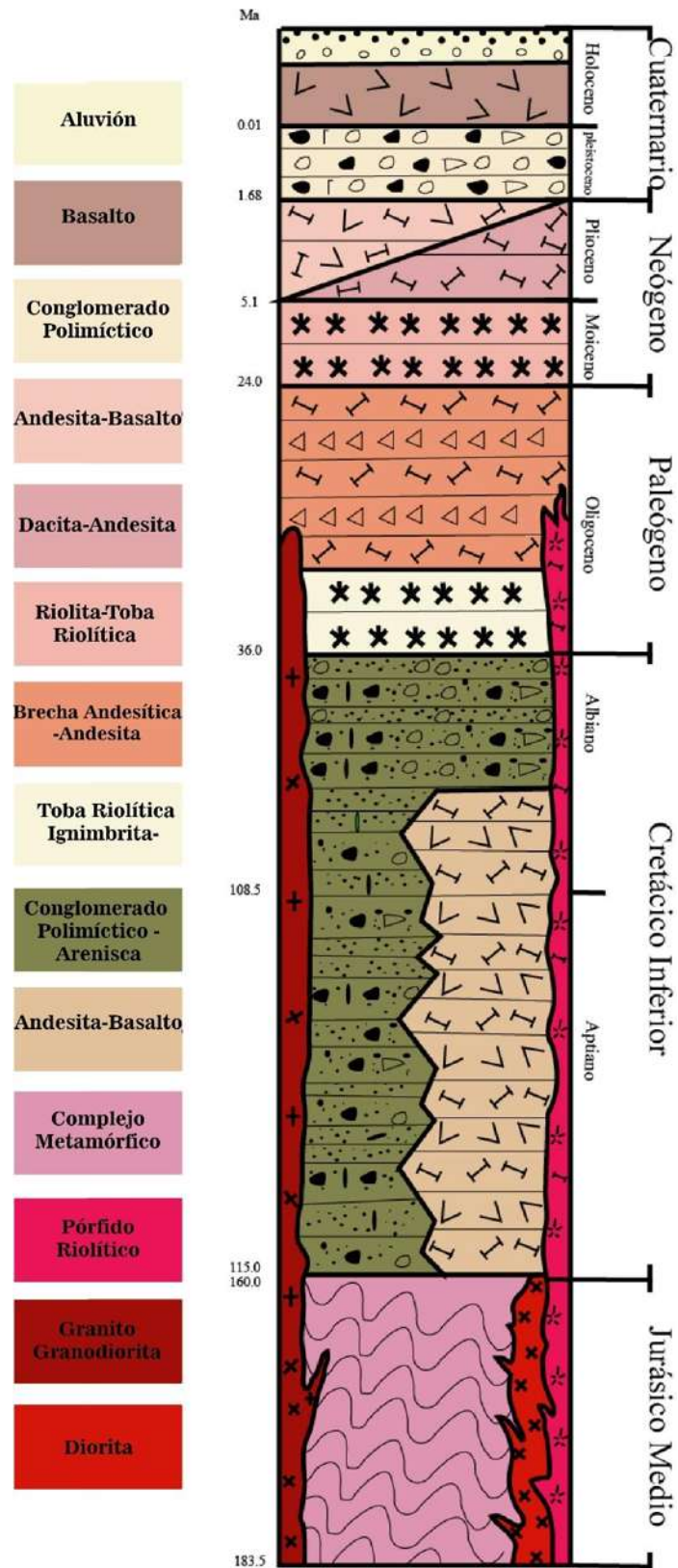
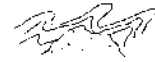
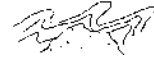


Figura 9: Columna estratigráfica representativa de la región de San Diego Curucupatzeo (Después de las cartas geológico mineras E14-A43 y E14-A33 propuestas por el SGM).



En la región de Tumbiscatío, esta secuencia se encuentra asociada a una serie de lentes y bloques de diferentes dimensiones de pillow lavas con firmas tipo MORB conocidas como la Formación Charapo (Centeno-García et al., 2003). Ambas unidades, pertenecientes a un complejo de acreción, se encuentran intrusionadas por una serie de cuerpos plutónicos graníticos, como el Ensamble Plutónico de San Diego Curucupatzeo.

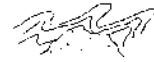
El Complejo Arteaga presenta una serie de estructuras de plegamiento que revelan una deformación intensa con algunos plegamientos de tipo chevron y fallamiento inverso, en algunas localidades se encuentra metamorfoseado a facies de esquistos verdes. Se ha considerado que presenta al menos dos fases de deformación, la primera durante el Jurásico, que generó el cizallamiento y metamorfismo, mientras que en el Cretácico Tardío se generaron amplios plegamientos y fallamiento secundario. La procedencia de esta secuencia se ha interpretado como un ambiente de depósito marino profundo, con procedencia de una fuente continental evolucionada (Centeno-García et al., 1994).

#### **4.2.2 Secuencia volcánico-sedimentaria cretácica**

##### **4.2.2.1 Arco Amengarícuaro Ki B-A Formación Zihuatanejo**

Esta unidad fue descrita por Sabanero-Sosa et al. (1997) como una sucesión de rocas volcánicas con variaciones composicionales de basáltica a andesítica, presenta intercalación escasa de capas de grauvacas y limonitas volcánicas. También fue definida por Centeno-García et al. (2003) como Formación Zihuatanejo, está conformada por flujos de lava andesítica y rocas volcanoclasticas. La sucesión volcánico sedimentaria es principalmente de epiclásticos que son conformados por areniscas de grano grueso. Los derrames basálticos son más raros y presentan texturas porfídicas con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxenos, escaso anfíbol en mesostasis de plagioclasa.

El Arco Amengarícuaro se distribuye al SW de la localidad de Acuyo, mientras que su mejor exposición se sitúa en los alrededores de lo que se denomina como cuadrilla de Amengarícuaro. El espesor de esta unidad es de aproximadamente 600 m, sobreyace por discordancia erosional al complejo metamórfico de Carácuaro, cambios laterales y verticales con el conglomerado Acuyo. Estructuralmente, es afectado por un sistema de fallas laterales y plegamiento. En el área de estudio aflora principalmente en los alrededores de Carácuaro y se extiende al sur del área de estudio.



Este arco se ha considerado correlacionado con el Arco Zihuatanejo, parte de los niveles de la unidad Arcelia y parte de la Formación San Lucas, asignándole una edad de 113 a 139.8 Ma correspondiente al Valanginiano-Aptiano (Sabanero-Sosa et al., 1997).

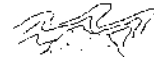
#### **4.2.2.2 Conglomerado Polimíctico-Arenisca Acuyo (Formación Playitas) Ki**

Esta unidad ha sido descrita por Guevara-Alday (2020) como una secuencia sedimentaria compuesta principalmente por limos, cuarzo-arenitas y conglomerados. Los estratos presentan espesores de 1-3 cm de espesor con basculamiento hacia el SE y SW. Las cuarzo-arenitas presentan cantidades importantes de cuarzo, incluyen fragmentos líticos de tamaños de arenas medias a gruesas, subredondeados y redondeados. Los limos presentan cambios de tonalidades que van de malva a beige. El conglomerado es color rojizo, mal clasificado, con bloques generalmente subredondeados y sostenidos en una matriz de arenas de grano grueso. Los clastos están compuestos por granitos, cuarzo-arenitas, pizarras y limos. Presenta basculamiento general hacia el sur con una gradación inversa e intenso fracturamiento. Se observa sobreyaciendo en discordancia litológica al granitoide de Tumbiscatío de edad jurásica cercana al poblado de San Antonio.

El ambiente de deposición se ha considerado dentro de tipo litoral y transicional o marino poco profundo, con espesores que llegan hasta los 800 m, la edad asignada se basa en fragmentos de rudistas y microfósiles, de finales del Cretácico (Centeno García et al., 2003).

#### **4.2.2.3 Diorita La Noria**

Descrito por Sabanero-Sosa et al. (1997) como un cuerpo intrusivo de composición diorítica a granítica. Aflora en las inmediaciones de la localidad la Noria sobre el arroyo del mismo nombre. De textura porfídica hipidiomórfica equigranular que va de grueso a medio, con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y biotita, ocasionalmente cuarzo y ortoclasa. Cuando la composición es granítica presenta minerales de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, moscovita y biotita. La foliación magmática se puede observar en algunas localidades, su distribución principal se concentra en la porción sur de la localidad de Carácuaro con una orientación N-S y una deformación frágil-dúctil similar a la que presenta la Formación Amengarícuaro. La edad reportada corresponde a 114 Ma (Fernández, 1986) en biotita y sericita, sin embargo, Sabanero-Sosa et al., (1997) estiman una edad del Jurásico, considerando como una edad de recalentamiento la propuesta por Fernández, ya que ellos pudieron observar fragmentos de la Diorita en la base del Conglomerado Acuyo. Además,



lograron identificar la aureola de metamorfismo de contacto que afecta a filitas y meta-areniscas del complejo metamórfico.

#### **4.2.3 Unidades volcánicas terciarias de cobertura**

##### **4.2.3.1 Sierra de Mil Cumbres**

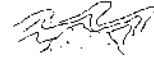
Se define así a una secuencia volcánica que forma parte de la FVTM, se distribuye en la porción centro-sur y porción central del estado de Michoacán. Este evento volcánico se originó durante el Mioceno temprano, cubriendo una porción aproximada de 870 km<sup>2</sup>. Se compone por lavas andesíticas y dacíticas, depósitos basálticos y abundantes flujos piroclásticos riolíticos y riolodacíticos (Pasquaré et al., 1991; Montes-Alva et al., 2015). No obstante, Gómez-Vasconcelos et al. (2015) considera que la Sierra de Mil Cumbres tiene una cobertura cercana a los 1022 km<sup>2</sup> y está representada por un vulcanismo bimodal, con eventos de flujos de lava, flujos piroclásticos (ignimbritas), conos de ceniza y domos de lava que comprenden un intervalo de edades entre los 14 a 23 Ma.

##### **4.2.3.2 Caldera de Villa Madero**

De acuerdo a Gómez-Vasconcelos et al., (2015) la Caldera de Villa Madero se define como una estructura caldérica que colapsó en forma de herradura, tiene un diámetro de 8.7 km y se sobrepone sobre estructuras volcánicas dacíticas y andesíticas este evento volcánico tuvo lugar durante el Pleistoceno medio y forma parte del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. Está conformado por aparatos dacíticos y andesíticos, así como flujos piroclásticos de pómez de composición dacítica y flujos piroclásticos de bloques y ceniza que se formaron hace ~2.2 Ma.

##### **4.2.3.3 Pórfido Riolítico La Conquista (To PR)**

Se ha clasificado como pórfido riolítico definido como un cuerpo subvolcánico masivo, con diferenciación magmática, que va de riolítico a radiodacítico de origen ígneo hipabisal. Es de color gris a ocre, de textura porfídica compuesta de feldespato (52%), cuarzo (20%), oligoclasa (15%) biotita, y óxidos. Presenta intensa alteración hidrotermal. Constituye parte de la cobertura y afecta al complejo Metamórfico de Carácuaro, asignándole una edad interpretativa del Oligoceno de acuerdo con Tapia-Cruz y Rosales-Díaz (2009) y Tapia-Cruz (2012).



### 4.3 El Ensamble Plutónico de San Diego: trabajos previos

El cuerpo plutónico de San Diego Curucupatzee ha sido reconocido desde el siglo XIX debido a su potencial metálico Montiel-Escobar et al. (1997,2015). Una de las unidades mejor descritas se refiere al granito denominado Hondable, que de acuerdo con la cartografía propuesta por el SGM cubre un área de exposición de 248 km<sup>2</sup> y aflora a lo largo de ~32 km de norte a sur. Su nombre fue asignado en la Carta Morelia E14-1 1:250 000, mientras que en las cartas Carácuaro y Villa Madero le asignan el mismo nombre.

El intrusivo El Hondable ha sido descrito por diversos autores (Montiel-Escobar et al., 1997; 2015; SGM 2008, 2009; Tapia-Cruz 2012; Romero Rojas et al. 2013). Estos autores lo han descrito como un granitoide con variaciones que van de granito a granodiorita, con textura de grano grueso a medio. Los cambios de color son muy contrastantes respecto al encajonante mostrando contactos por intrusión al Complejo Metamórfico de Carácuaro, la secuencia del Arco Amengarcuaro, el Conglomerado Acuyo y unidades volcánicas del Oligoceno (SGM, 2009). El control estructural tiene un predominio de régimen frágil con estructuras de fallas normales en orientación preferencial NE-SW y NW-SE en el área de Villa Madero, mientras que en la porción proximal a Carácuaro el predominio de estructuras de componente lateral se hace notable predominantemente dextral.

Otras localidades del cuerpo granítico de San Diego y Nocupétaro (Montiel-Escobar et al., 1997; Romero Rojas et al., 2013) muestran variaciones de color gris verdoso e intemperiza a ocre y tonos castaño claro, con una textura fanerítica preferencial, sin identificación de foliación magmática. La asociación mineralógica es plagioclasa, cristales de cuarzo, feldespato, escasa biotita y óxidos de hierro. Las edades que se le han asignado resultan muy contrastantes, ya que van desde el Oligoceno, edad obtenida por el método K/Ar en biotita y sericita (Damon, 1982), hasta edades del Jurásico con edades de Rb/Sr en biotita y roca total (Corona-Chávez, 1999; Montiel-Escobar et al., 2015). Romero-Rojas et al. (2015) reportan datos geoquímicos donde se observan valores de 57 a 59 % SiO<sub>2</sub>, 15.5 a 18.8 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.04 a 0.08 % de MgO, 2.4 a 4.2 % de Na<sub>2</sub>O y 0.9 a 2.8 % de K<sub>2</sub>O caracterizándolo como magmatismo de arco calccalcalino originado en un ambiente de subducción.

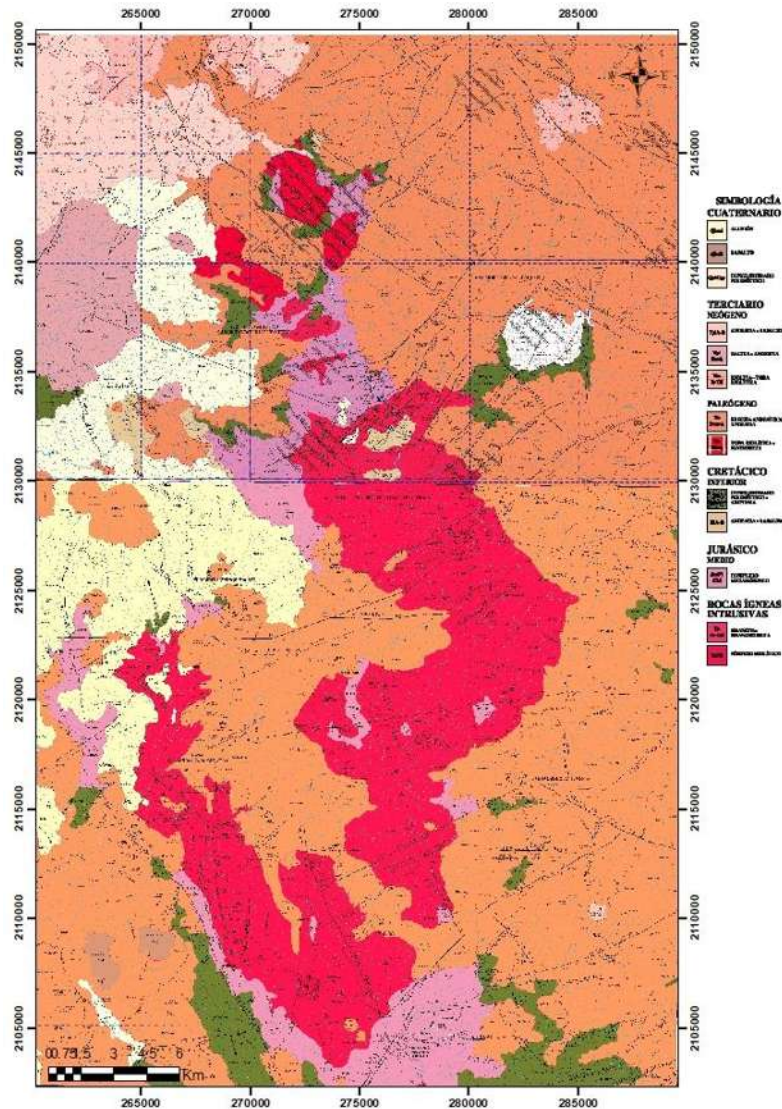


Figura 10: Cartografía geológica de la región de San Diego Curucupatzeo, propuesta realizada por el Servicio Geológico Mexicano, en las cartas Villa Madero y Carácuaro.

El EPSD está relacionado con el emplazamiento de yacimientos minerales en un área denominada como Distrito Minero de San Diego Curucupatzeo. Este emplazamiento mineral ha sido poco estudiado, sin embargo, Tapia Cruz (2012) y Romero-Rojas et al. (2015) lo clasifican como un yacimiento de tipo epitermal de sulfuración intermedia con temperaturas que oscilan entre 150° a 300 °C. El emplazamiento de la mineralización está asociada a estructuras de fallamiento normal con relleno de fisuras que se asocian a soluciones mineralizadas generadas por diques y el granito-granodiorita. La mineralización consiste principalmente de Au, Ag con mineralización hipogénica de galena, calcopirita, pirita, cuarzo y calcita, mientras que la mineralización supergena es gobernada por malaquita, azurita, calcocita, limonita y calcita.



## 5.- Metodología

### 5.1 Trabajo de gabinete (estudios previos, material cartográfico)

En esta etapa se recopiló toda la información bibliográfica local y regional (figura 11) relacionada al área de estudio, con la finalidad de conocer las características geológicas y estructurales de la zona de estudio, al mismo tiempo se compiló información que permite interpretar los procesos de emplazamiento de cuerpos magmáticos.

Los insumos cartográficos se obtuvieron de mapas geológicos mineros, cartográficos e investigaciones geológicas y formatos digitales, como son los modelos digitales de elevación que sirven para generar modelos hipsométricos, de sombras, pendientes y curvas de nivel, realizando los procedimientos en el software ArcGIS 10.5. La propuesta cartográfica se realiza basándose en el apoyo de estos insumos, a la vez que se obtienen: i) bases cartográficas del INEGI (digitales e impresas) en escala 1:50,000: Villa Madero E14A33, Carácuaro E14A43, topográficas y geológicas, así como ortofotos en escala 1:15,000; ii) Cartas geológico mineras del SGM escala 1:50,000: Villa Madero E14A33, Carácuaro E14A43 y Morelia E14-1 escala 1:250,000; iii) imágenes de satélite de Google Earth Pro y Alaska Satélite.

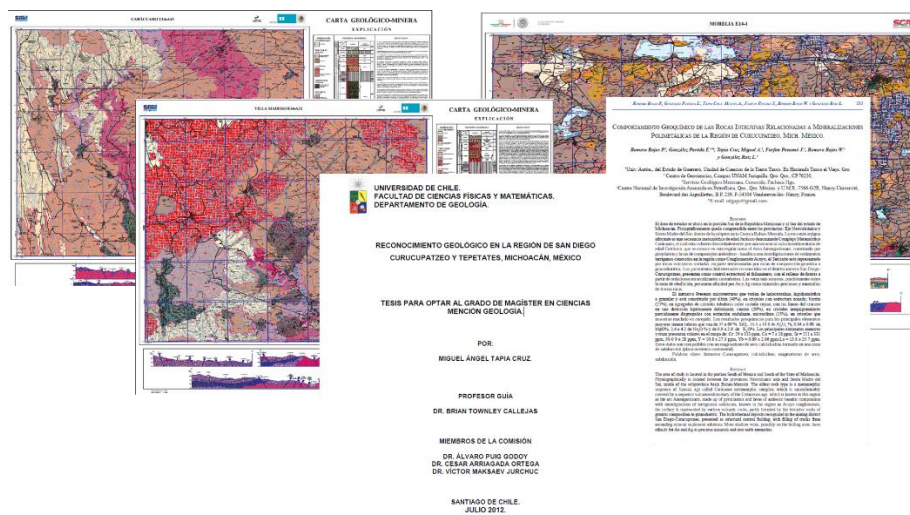
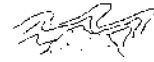


Figura 11: Portadas y mapas principales del área de estudio.



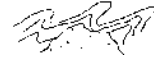
## 5.2 Análisis morfoestructural

Este análisis se realizó mediante insumos cartográficos creados a partir de modelos digitales de elevación con resolución de 15 metros, que dieron lugar a modelos de sombras, pendientes, altimétricos, curvas de nivel, así como metadatos. La base de datos fue obtenida de la plataforma digital del INEGI y de la NASA (ASF Data Search). Los datos vectoriales corresponden a las cartas: Villa Madero E14A33 y la carta Carácuaro de Morelos E14A43, ambas a escala 1:50,000. Por su parte, el modelo digital de elevación (MDE) con resolución de 15 metros se obtuvo de la plataforma ASF Data Search que permitió generar el modelo de sombras y de pendientes utilizando el software ArcGis. Así mismo, se obtuvo un modelo altimétrico creado en el software Surfer 16.

Para realizar el análisis se creó un modelo de sombras y de pendientes mediante la manipulación del Modelo Digital de Elevación con los intervalos y especificaciones establecidas por el usuario, así como un mapa altimétrico que permitió observar los cambios de altura. Esta etapa consistió en trazar lineamientos que pueden estar relacionados con fallas, fracturas o contactos entre dominios. Posteriormente, se realizó la delimitación de los dominios geomorfológicos, tomando en cuenta los cambios de pendientes, patrones de drenaje, geoformas predominantes y formas que presentan las curvas de nivel, además de considerar los lineamientos tectónicos o agrupaciones de edificios volcánicos que permitan delimitar los procesos morfogenéticos de una misma temporalidad, con el objetivo de separarlos en unidades de paisaje con características distintivas de geoformas adyacentes.

## 5.3 Trabajo de campo

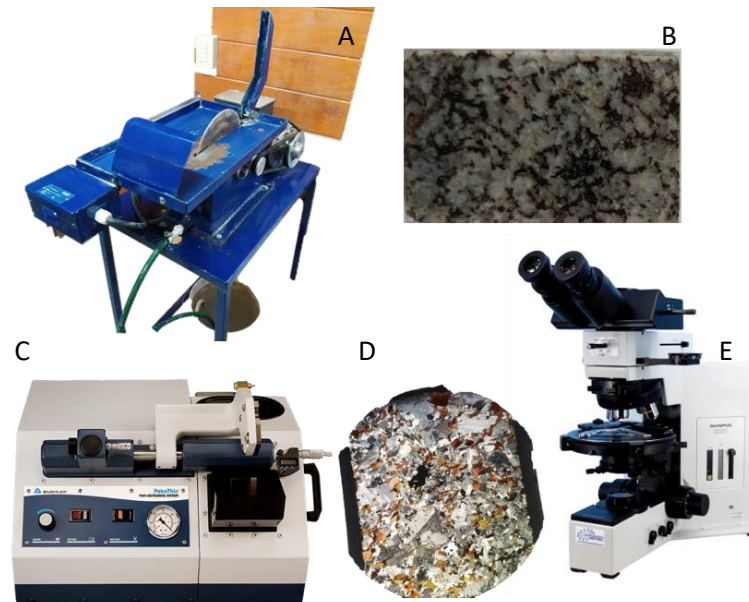
El trabajo de campo se realizó mediante tres campañas con un total de 21 días de campo: i) la primera se llevó cabo para hacer el reconocimiento regional de las unidades y bajo forma de excursión y descripción de puntos aislados ii) En la segunda campaña se cubrió la porción sur propuesta por el SGM, asignando puntos de verificación desde la porción sur-oeste, sur y sur-este. La colecta de muestras se realizará basándonos en las variaciones mineralógicas, representatividad y frescura de la roca, con el objetivo de generar una base de datos que permita establecer las variaciones internas del plutón y de la roca encajonante, finalmente someter las muestras seleccionadas a análisis petrológicos, geoquímicos y geocronológicos. iii) La tercera campaña se realizó en la porción norte, con un enfoque primordial en la porción central, para verificar el aflorante cartografiado como propuesta del SGM, con una distribución relativamente homogénea



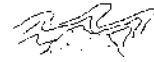
que no pierde continuidad a lo largo de toda la sierra. La colecta de muestras considera los mismos criterios establecidos en la primera campaña (figura 18).

#### 5.4 Petrografía

Se efectuaron estudios petrográficos del cuerpo plutónico y de la roca encajonante, así mismo de las unidades de cobertura, que sirvieron para determinar asociaciones y variaciones mineralógicas, descripción detallada de las texturas magmáticas, tardo magmáticas y postmagmáticas. Se prepararon y analizaron 55 secciones delgadas (representadas en el mapa geológico indicadas como muestra petrográfica figura 18). El corte y preparación de las muestras se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT). Mientras que el aglutinado y desbaste de las muestras a 50 micras se llevó a cabo en él (IGUM) Instituto de Geofísica Unidad Michoacán, UNAM Campus Morelia, utilizando el sistema de corte PETROTHIN-BUEHLER. El acabado final se realizó en el laboratorio de las instalaciones del INICIT, así como la descripción de las secciones delgadas utilizando el microscopio OLYMPUS BX50. La metodología consistió en: a) identificar las texturas, fases y asociaciones minerales que ayuden a identificar los procesos magmáticos; b) texturas y variaciones mineralógicas para su división en unidades; c) estimación de porcentajes minerales y conteo modal para su clasificación.



*Figura 12: Equipos utilizados durante la realización del trabajo petrográfico: A) máquina de corte tipo banco; B) sección delgada aglutinada destinada a cortadora de precisión Petrothin-Buehler (C); D) sección delgada pulida destinada al análisis microscópico utilizando equipo Olympus bx50 (E).*



## 5.5 Geoquímica

De acuerdo a los resultados obtenidos en la interpretación y análisis de las secciones delgadas, se procedió a realizar la preparación y pulverización de las muestras seleccionadas. La preparación de las muestras consistió en la obtención de 5 kg por muestra aproximadamente, todo esto mediante un riguroso proceso de limpieza que incluye la descontaminación de instrumentación al trabajar con una nueva muestra utilizando agua destilada, cepillos, aire a presión y toallas desechables secado al horno y baño ultrasónico.

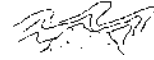
Se comenzó con el descoste de la muestra, como medida principal fue necesario retirar toda la porción que pueda estar contaminada por agentes de intemperismo. Este paso se realizó con un marro y cincel únicamente, posteriormente, sobre un tronco de madera se realizó el fragmentado de los bloques a porciones que permitió su manipulación para obtener esquirlas de 1 cm aproximadamente. Estas esquirlas se llevaron a un proceso de descontaminación, mediante un lavado con agua destilada y secado al horno por 24 horas a una temperatura de 100° C, posteriormente pasan por una trituradora de quijadas hasta llegar a un tamaño arena. En este paso se realizó un cuarteo y se toma una parte representativa y finalmente son sometidos a una pulverización mediante una pulverizadora de impacto con mortero de bolas (acero) de dos cápsulas SpectroMill II, que redujo la muestra a tamaños de arenas muy finas 30-50 gr para análisis geoquímico; el resto se almacenó para el caso de requerir nuevos análisis. El sobrante del cuarteo se dividió en dos porciones; la de tamaño arena para la separación de circones (3-4 kg) y el sobrante quedó como testigo.

### 5.5.1 Fluorescencia de Rayos X (FRX) para análisis de Elementos mayores

Estos análisis fueron desarrollados en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) del instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Esto con el objetivo de determinar el porcentaje en peso (% wt) de los elementos mayores.

### 5.5.2 ICP-MS para análisis de elementos traza

El análisis de elementos traza, incluidas las tierras raras se realizó en el Laboratorio de estudios Isotópicos del Centro de Geociencias UNAM, campus Juriquilla Querétaro. El análisis fue realizado con un equipo ICP-MS Thermo X series-ii.

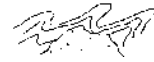


*Figura 13: Procesos realizados en cada una de las muestras destinadas a análisis geoquímicos e isotópicos.*

## 5.6 Geocronometría, tipología de circones e isotopía

Las muestras seleccionadas fueron tratadas en el laboratorio de separación de minerales de la ENES UNAM, campus Morelia. El material utilizado consistió en: batea de cerámica, vasos de precipitado, frasco lavador, agua, alcohol, cajas Petri, plumón permanente de dos puntas, cinta doble cara, resina, espinas de nopal, piseta, pipeta, báscula, microscopio estereoscópico, cinta Diurex, tijeras, cuchara plástica, recipiente para sedimento, lámpara infrarroja, cilindros de baquelita, lijas 2500 y 4000, papel tipo pesaje, vidrios de 5x5cm, lámpara led, microscopio.

El procedimiento se llevó a cabo con materiales previamente descontaminados utilizando la técnica de bateo en material cerámico. Para iniciar se vertió parte de la muestra y se aplicó agua constantemente quitando la turbidez, este proceso se repitió hasta obtener una transparencia en el agua, posteriormente se aplicó agua con la piseta para retirar el sedimento de mayor tamaño que quedó suspendido en los bordes de la batea que fue manipulada mediante giros bruscos, este proceso se repitió hasta concentrar los materiales más pequeños y pesados en el fondo. Una vez



que se obtuvo el material más fino se concentró en cajas Petri para comenzar con la extracción de circones con una pipeta hasta realizar una colecta de entre 70 y 100 circones.

### 5.6.1 Montado de circones

Se realizó la selección de circones mejor conservados que cumplieron con un tamaño superior a 25 micras respecto a su eje A y B, después de tener seleccionados los circones se procedió a montar una cinta doble cara sobre un cristal de 5 x 5 con dos ejes que lo cortaron por la mitad, sobre la cinta se colocaron los circones seleccionados distribuidos en filas de 10 por 5 columnas. El siguiente paso fue colocar un cilindro de baquelita sobre la cinta y tratando de que los circones se ubiquen lo más cercano al centro. Parte importante fue colocar los tamaños similares en cada fila y que en todas las muestras no se supere el doble de tamaño respecto al de mayor y menor dimensión, de lo contrario el proceso de pulido genera pérdida de los circones de menor dimensión.

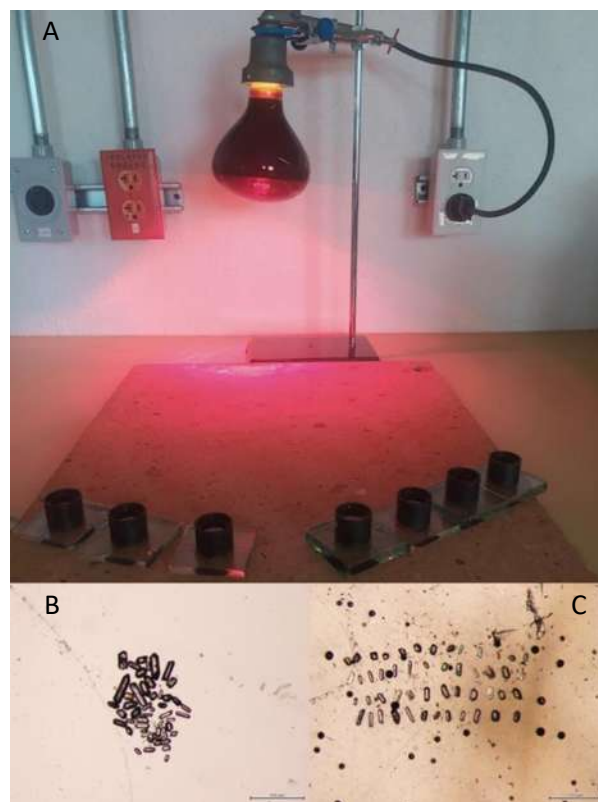
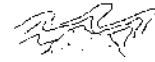


Figura 14: Proceso de separación de circones. A) Secado de resina con luz infrarroja con circones montados en cilindros de baquelita; B y C fotomicrografía de la búsqueda y colecta de circones (B) y montado de circones en filas correspondientes a tamaños similares, nótese los círculos negros corresponden a burbujas de aire atrapado en la resina (C)



El preparado de resina EpoFix se llevó a cabo en un recipiente plástico, con la ayuda de una báscula para medir gramos, se agregaron 8 g de resina por 1.1 g de catalizador. Se mezclaron suavemente hasta obtener un líquido transparente sin que se observen grumos o líneas de distinto tono. Se dejó reposar la mezcla por 15 minutos para que las burbujas que quedan en la mezcla puedan ascender y ser eliminadas. Finalmente, se vertió la mezcla lentamente dentro del cilindro de baquelita y se colocaron a 40 cm de una lámpara de luz infrarroja durante 4 horas de constante supervisión para verificar ausencia de burbujas, en caso de visualizar alguna es necesario tomar una aguja de jeringa y tratar de jalarla lentamente para alejarla de los circones (solo es necesario eliminar la burbuja si afecta directamente a los circones, pueden quedar burbujas alejadas de ellos).

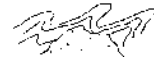
Después de este periodo de 4 horas se apagó la lámpara y se dejó reposar durante 12 horas a temperatura ambiente. Transcurrido este periodo se cortaron los cilindros y se realizó un pulido con lija de 2500 y 4000. Es indispensable realizar periodos cortos de pulido y alternar con visualización al microscopio para evitar eliminar los circones.

### 5.6.2 Isotopía U/Pb en circones



*Figura 15: Equipo de Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI).*

Los análisis para el fechamiento de los circones se realizaron en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI), del Centro de Geociencias UNAM, Juriquilla, Querétaro (figura 15), implementando la técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo por ablación láser (LA-ICP-MS). El análisis isotópico se realizó en un total de 6 muestras que corresponden a 4 granitos-



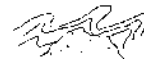
granodioritas y tonalitas, 1 diorita-norita y 1 arenisca. La selección de los circones, así como el punto de muestreo, se llevó a cabo mediante el análisis de imágenes de catodoluminiscencia que presentaban cada uno de ellos, considerando la presencia de núcleos y bordes para determinar circones heredados y la diversidad de poblaciones o familias que se lograron diferenciar por intensidad de luminiscencia en cada una de las muestras.

### **5.6.3 Espectrometría de masas para Isotopía Rb, Sr, Sm y Nd**

Estos análisis se realizaron en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) para la medición de isótopos de Rb, Sr, Sm y Nd. Los equipos utilizados fueron un espectrómetro de masas FINNIGAN MAT 262 y un TRITON PLUS. Para examinar los procesos a detalle se puede consultar Schaaf et al. (2022), IGR.

### **5.7 Termometría y condiciones de emplazamiento**

Se realizó un análisis de termometría utilizando el termómetro propuesto por Ferry y Watson (2007) con los datos obtenidos en el análisis de Geocronometría en circones. El procesamiento de los datos se llevó a cabo mediante una hoja de cálculo tipo Excel establecida por el autor y con las especificaciones requeridas.



## 6.- Resultados

### 6.1 Análisis morfoestructural

Las unidades morfoestructurales se caracterizan por presentar rasgos similares en su relieve topográfico, tipo de drenajes y pendientes, que a su vez permiten dividirlos y clasificarlos como unidades que han sido modificadas por agentes erosivos o tectónicos. El análisis morfoestructural busca facilitar el trabajo de campo, la topografía y el tipo de drenaje suelen ser rasgos distintivos que demuestran el grado de erosión y a su vez permite interpretar el tipo de roca predominante. Con este análisis se busca reconocer la correspondencia entre la morfología de las zonas expuestas del plutón con los procesos morfogenéticos y las relaciones de contacto con la roca encajonante, independientemente de las unidades de cobertura (Ver Figura 16).

#### 6.1.1 Dominios morfoestructurales

##### 6.1.1.1 Depresión Sur.

Este dominio está ubicado en la porción sur del área de estudio, se trata de tres entidades aisladas, que delimitan al dominio Nocupétaro, Carácuaro y Arco San Rafael, forman planicies perfectamente visibles con una distribución preferencial NW-SE. Tiene una extensión de 39 km<sup>2</sup>, con un desnivel de 125 metros donde el punto más alto correspondiente a 700 msnm y mínimas de 575 msnm. En estas planicies las pendientes no superan los 20°, predominando los ángulos entre 5° y 10°, mientras que las curvas de nivel presentan forma de zigzag. El dominio está delimitado por el alto estructural de los dominios adyacentes, además de los cambios en la morfología, donde se presentan cambios de pendientes y un aumento de estructuras tipo colinas que revela estos cambios. El drenaje es paralelo, bien desarrollado, con desembocadura hacia el sur.

##### 6.1.1.2 Dominio Nocupétaro

Esta unidad representa el límite en la porción SW. Cubre un área de 92 km<sup>2</sup> y presenta una orientación N-S que es delimitada por el dominio Depresión Sur en la porción Oeste. Se encuentra parcialmente cubierto por un derrame del dominio las Mesas que cubren gran parte de su porción SW, además de ser cubierta parcialmente por las montañas de las Trojes y la Sierra Central. Este dominio presenta pendientes predominantemente suaves que van de 5° hasta 25°, mientras que las pendientes superiores a 45° se asocian a los costados de las mesetas alineadas con tendencia NW-

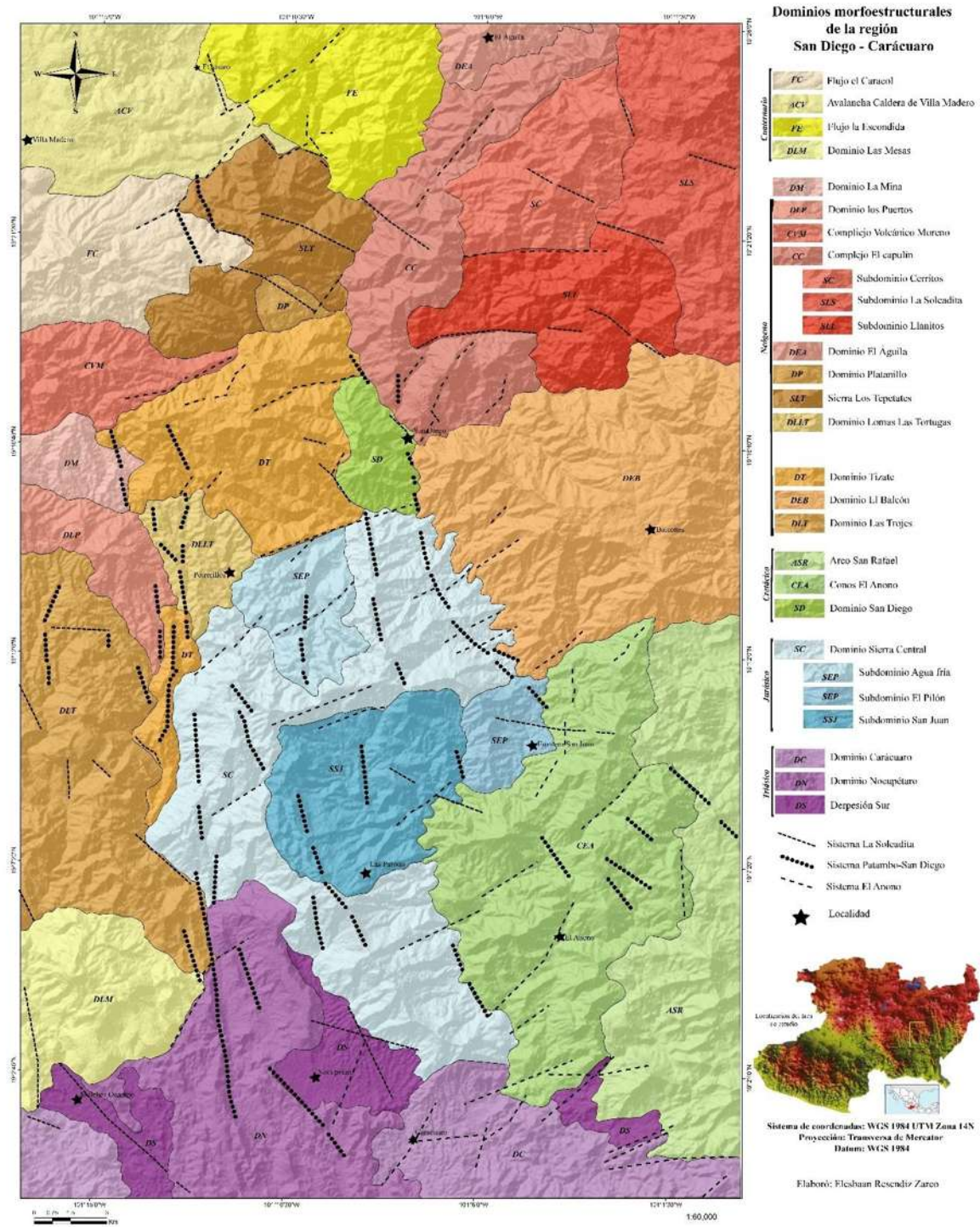
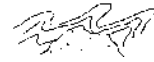


Figura 16: Dominios morfoestructurales en la región de Villa Madero-San Diego-Nocupétaro-Carácuaru.



SE. El drenaje es de tipo dendrítico con desembocadura al sur y la topografía tiene un desnivel de 775 m con las alturas máximas en el extremo NE con 1350 msnm y mínimas de 575 msnm en la poción Sur.

#### **6.1.1.3 Dominio Carácuaro**

Delimita la porción SE, con una extensión de 52.67 km<sup>2</sup>. Está cubierto parcialmente por el Arco San Rafael en su porción NE, al norte es delimitado por fallamiento con el dominio Conos el Anono y el alto estructural de Sierra Central. Se observa una fuerte erosión que da lugar a un terreno de pendientes muy suaves que van de 5 a 25°, mientras que en zonas donde aumenta la elevación llegan a superar los 37°. El drenaje es paralelo en el noroeste, con tendencia a subdendrítico a medida que nos acercamos al E y SE. La altura máxima asciende apenas a los 875 msnm mientras que las más bajas ubicadas en la parte central con 525 msnm.

#### **6.1.1.4 Dominio Sierra Central.**

El dominio Sierra Central ha sido conformado por una serie de eventos volcánicos que dan origen a la estructura más predominante en el área, albergando 4 subdominios que se encuentran delimitados por un vulcanismo más reciente en la porción E correspondiente al flujo de los conos El Anono, el dominio Tízate al norte y oeste, mientras que al sur se delimita por tres dominios que corresponden a: Dominio Carácuaro, Dominio Nocupétaro y Depresión Sur. Cubre un total de 226.6 km<sup>2</sup>.

##### **6.1.1.4.1 Sierra Central**

Cubre la mayor porción de estos subdominios, con un área de 140.7 km<sup>2</sup> y cubriendo a los subdominios con las faldas de esta cadena montañosa de dirección N-S con una ligera rotación marcada por el sistema ENE - WSW que marca el cambio de dirección al NE en la orientación de las montañas. Tiene un desnivel de 2275 metros, con una altura máxima de 2850 msnm y una mínima de 575 msnm este desnivel genera un predominio de pendientes que van de 45° a 60°, mientras que algunas áreas muestran pendientes menores a 25° que representan la zona oeste y noreste. El tipo de drenaje cambia de enrejado en el W, a dendrítico en el NE, y cambia a paralelo en el sur.

##### **6.1.1.4.2 Subdominio Agua Fría**

Este subdominio delimita la parte NW de la Sierra Central. Tiene una extensión de 25.6 km<sup>2</sup> y un desnivel de 625 metros, considerando su mayor elevación en el Sur con 1650 msnm mientras que el nivel más bajo se localiza en la porción norte con 1025 msnm. Se propone como subdominio debido a que presenta ligeros cambios en la continuidad de las estructuras principales, forma una



depresión con pendientes menores a 25° en los bordes y concentrando pendientes mayores a 45° en la zona central que bordean las estructuras volcánicas de la zona en sus partes más elevadas, el drenaje es dendrítico con desembocadura al NE. Es delimitado por el alto estructural del dominio Tízate y la depresión de Loma las Tortugas al Norte y NW respectivamente.

#### **6.1.1.4.3 Subdominio El Pílon**

Este subdominio representa la porción Este de la Sierra Central, cubre un total de 16 km<sup>2</sup>, está caracterizado por un alto estructural que marca la transición con el subdominio San Juan, sigue una tendencia N-S con un cambio de dirección en la porción norte. Siguiendo el sistema ENE-WSW que forma parte del límite de esta estructura, en la zona SE, se forma una ladera de poca pendiente que es cubierta por el flujo de los Conos el Anono. Las pendientes superan los 45° en el alto estructural en su porción oeste y norte, mientras que al S-SE las pendientes son menores a 30° predominando de 5° a 20°.

La altura es muy variable, con un desnivel de 550 metros, en su punto más alto tiene una elevación de 1275 msnm y una mínima de 725 msnm. El drenaje es de tipo dendrítico a subparalelo, con desembocadura hacia el sur.

#### **6.1.1.4.4 Subdominio San Juan**

Corresponde a la transición del dominio Sierra Central en su porción E-SE, cubre un área de 44.32 km<sup>2</sup>. El cambio se genera con la variación de la pendiente en la zona de mayor elevación en el dominio, además de estar delimitado por el sistema ENE -WSW en la porción norte, mientras que el subdominio San Juan tiene pendientes menores a 20° en sus periferias con la Sierra Central. Al SE cubierto parcialmente por los flujos del dominio Conos el Anono. Forma una depresión considerable con una diferencia de 800 metros, con una elevación de 1500 msnm en su punto más alto, mientras que su punto más bajo es de 700 msnm. Las pendientes mayores a 45° se concentran en el límite sureste, el drenaje es paralelo con desembocadura al Este.

#### **6.1.1.5 Dominio San Diego.**

Es un dominio aislado que cubre un área de 14 km<sup>2</sup>, sigue una orientación NNW - SSE que resulta discordante con la orientación de los dominios adyacentes. La transición hacia el oeste es con el dominio Tízate de rumbo EW; por su parte el dominio El Balcón ubicado al E tiene una orientación con direcciones preferenciales WSW, mientras que el complejo El Capulín cubre parcialmente su porción noreste.



Está representado por dos volcanes compuestos que conservan sus pendientes mayores a  $45^\circ$  en las partes somitales con las zonas de mayor elevación, mientras que las zonas de contacto con los dominios adyacentes no superan los  $13^\circ$ . Las elevaciones son variables, tiene una diferencia de 650 metros, donde su punto más alto es de 1600 msnm a su punto más bajo que lo representa la cota 950 msnm. El drenaje es irregular con ligera tendencia a paralelo.

#### **6.1.1.6 Dominio Lomas La Tortuga**

Este dominio está ubicado en la zona oeste, se caracteriza por presentar una serie de lomeríos que contrastan con los dominios adyacentes, tiene una orientación preferencial NE- SE casi N-S. Tiene un área de  $16.27 \text{ km}^2$  con pendientes que no superan los  $23^\circ$  en la mayor porción del terreno, mientras que las pendientes mayores a  $45^\circ$  se concentran en pequeñas proporciones en el centro y bordes de este dominio, al oeste y este el contacto con los dominios es generado por el sistema de fallas NW – SE. El drenaje es dendrítico con desembocadura al sur. La diferencia de altitud es apenas de 450 metros, teniendo alturas máximas de 1675 msnm y mínimas de 1225 msnm.

#### **6.1.1.7 Dominio Las Trojes**

Este dominio está representado por una serie de mesetas que siguen una dirección norte sur y que posiblemente estén asociados a la Caldera de Villa Madero. Delimita la porción este-suroeste con un área de  $87.6 \text{ km}^2$ . Es cubierto por el derrame del dominio Las Mesas en el sur, mientras que al norte es cubierto parcialmente por el flujo de los volcanes del dominio Los Puertos. Existe un predominio de pendientes que superan los  $45^\circ$  en los bordes de las Mesetas, siguiendo una tendencia de norte a sur, y disminuyendo las pendientes a menos de  $25^\circ$  en los bordes del dominio, el drenaje es dendrítico con desembocadura al sur las alturas van desde los 1675 msnm a los 675 msnm en las zonas más altas y bajas respectivamente.

#### **6.1.1.8 Dominio El Balcón**

Su distribución es heterogénea a lo largo de la zona este, la cual delimita formando una gran meseta que culmina con la transición del complejo el Capulín al norte, con un cambio en la orientación de sus estructuras, al igual que con los dominios que rodean al dominio el Balcón delimitados por los valles que rompen con la morfología de este dominio. Tiene una extensión de  $127 \text{ km}^2$  y un drenaje dendrítico en las zonas distales a la meseta, mientras que en las proximales tiende a paralelo, las alturas son variables y van de 2075 msnm a 825 msnm en las zonas más altas y bajas respectivamente, las pendientes superan los  $45^\circ$  en los bordes de la meseta y se extienden



a lo largo de los bordes que forman las montañas mientras que en la meseta no se superan los 20° en las zonas más inclinadas de la superficie.

#### **6.1.1.9 Dominio Tizate**

Este dominio tiene un área de 69.8 km<sup>2</sup>, parece ser un flujo lávico que está delimitado por lineamientos noroeste-sureste en el sur y suroeste, mientras que al oeste la delimita una estructura de dirección noreste. En su porción este y noreste es delimitado por el dominio San Diego y complejo el Capulín respectivamente, tiene alturas que van de 2150 msnm a 775 msnm en las zonas más altas y bajas donde se formó una meseta de 3,263 m de longitud que tiene una tendencia en dirección de flujo al E-NE. Predominan las pendientes abruptas, mayores a 45° en toda la zona, a excepción de la pequeña meseta que tiene escasos 20°, el drenaje es un poco irregular con tendencia de paralelo a enrejado y desemboque al este en la zona norte y al sureste en la zona sur.

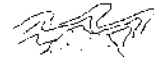
#### **6.1.1.10 Complejo El Capulín**

Los dominios morfoestructurales que conforman al Complejo El Capulín han sido conformados por dos eventos de avalanchas que marcan el límite de esta unidad, así como un evento volcánico que cubre parcialmente la cadena montañosa que delimita su porción noroeste y suroeste.

La Sierra El Capulín delimita la transición al norte, oeste y gran parte del sur está representada por un alto estructural de tendencia NE-SW y que en su porción sur presenta un cambio de dirección al este. Está cubierto por el flujo La Escondida en la zona oeste, mientras que su límite en el norte y suroeste está formado por un alto estructural que corresponde al dominio el Águila y Sierra los Tepetates respectivamente. Cubre un área de 70.5 km<sup>2</sup> que forma montañas con alturas máximas de 2175 msnm y mínimas de 1000 msnm. Predomina la pendiente mayor a 45° que disminuyen a 25° en las zonas proximales al subdominio Cerritos. El drenaje es muy irregular, pero tiende a paralelo con desembocadura al oeste cambiando al sur en la porción sur.

##### **6.1.1.10.1 Subdominio Cerritos**

Este dominio está conformado por dos volcanes compuestos que sobreyacen al Capulín. El flujo de estas estructuras volcánicas se distribuye al oeste en su mayor proporción y está delimitado al este por el dominio Soleadita. Cubre un área de 37.7 km<sup>2</sup> con alturas variables que van de los 1600 msnm hasta los 2275 msnm con pendientes que superan los 45° en las partes somitales de los centros eruptivos y disminuyendo hacia las zonas distales, formando pendientes menores a 25° y



alineando las de 45° a una tendencia noroeste. El drenaje es ligeramente radial con desembocadura heterogénea.

#### **6.1.1.10.2 Subdominio La Soleadita**

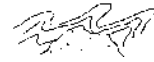
Este subdominio representa la zona más elevada en este dominio, funge también como límite de la porción este y tiene una extensión de 57.5 km<sup>2</sup> formando una altiplanicie que tiene poca inclinación predominando las pendientes de 5° a 20° en toda el área, mientras que en la porción Este rompe abruptamente con un escarpe que supera los 60°. Las variaciones altitudinales son muy ligeras teniendo una altura máxima de 2275 msnm a mínimas de 1600 msnm en la porción este y sur del subdominio. El drenaje es paralelo a sub dendrítico con desembocadura irregular, su delimitación está marcada por el flujo del dominio Cerritos, así como el cambio morfológico y aumento de pendientes en el dominio de Llanitos.

#### **6.1.1.10.3 Subdominio Llanitos**

Este subdominio delimita la zona sur del complejo Capulín. Se trata de una estructura de orientación noreste Suroeste con una elevación máxima de 1950 msnm en la porción noreste, y una mínima de 1125 msnm en el sur, su transición al sur está determinada por un alto estructural del dominio el Balcón que presenta una dirección contraria a la distribución de Llanitos. Tiene un área de 44.1 km<sup>2</sup> con un drenaje dendrítico a sub paralelo con desembocadura al sur. Las pendientes en sus bordes son muy suaves y no superan los 20°, predominan las de 5 – 10°, mientras que en el sur las pendientes superan los 45° y en las zonas de contacto con dominios adyacentes superan los 60°; algunas pendientes se asocian a lineamientos de dirección noreste.

#### **6.1.1.11 Dominio Platanillo**

Platanillo es una depresión ubicada en la porción noroeste y con orientación NE-SW que se asemeja a una avalancha de escombros posiblemente correspondiente a la Sierra los Tepetates, la que además lo delimita Tizate con un cambio de dirección en su alto estructural de orientación norte. Este dominio tiene una extensión de 4.6 km<sup>2</sup> con una variación altitudinal que cambia de 1150 msnm a 1075 msnm desde el punto más elevado hasta el más bajo respectivamente, logrando este desnivel en 2 kilómetros de distancia. El drenaje es paralelo con desembocadura al Sur. Las pendientes son suaves en la mayor parte del terreno con variaciones de 5 a 20° y aumentando en su porción sur y noreste que supera los 45°.



#### **6.1.1.12 Dominio El Águila.**

Este dominio delimita la porción N-NW de la zona, tiene un área de 9.68 km<sup>2</sup>, presenta una orientación de emplazamiento al suroeste, delimitado por el alto estructural del complejo el Capulín y cubierto parcialmente por el flujo La Escondida en su porción oeste. Presenta un drenaje con tendencia radial, cuya desembocadura de arroyos principales es en dirección sur. Presenta una variación altitudinal con una diferencia de 600 m desde su mayor elevación de 1950 msnm hasta la mínima de 1350 msnm. Existe un predominio de pendientes que van de 45 a 60° en el área con una distribución homogénea.

#### **6.1.1.13 Conos El Anono**

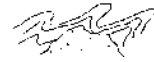
Este dominio se localiza en la porción sureste, está delimitado por la cobertura volcánica del Arco San Rafael en toda la región Este, mientras que al oeste cubre parcialmente con el derrame de algunos conos a la Sierra Central. Tiene una extensión de 115.6 km<sup>2</sup>, y una longitud de 18 km en dirección norte - sur, alberga al menos 8 edificios volcánicos de los cuales 2 son volcanes en escudo pequeño, 1 estratovolcán, 3 conos de escoria y otros 2 que se encuentran muy erosionados para ser clasificados. Presenta drenaje radial en los edificios volcánicos con zonas de cambio a drenaje dendrítico. En las zonas bajas presenta pendientes suaves, menores a 10° mientras que los edificios volcánicos superan los 45° en sus laderas. El punto más alto es de 1625 msnm mientras que la altitud mínima se encuentra en el sur con 575 msnm donde inicia el dominio Carácuaro.

#### **6.1.1.14 Arco San Rafael**

Representa el límite sureste. Abarca un área de 83.2 km<sup>2</sup> con una longitud de 23 km, en dirección N – S. En este dominio están albergados al menos 11 edificios volcánicos de los cuales ocho son conos de escoria, dos son volcanes en escudo y uno se encuentra muy erosionado para clasificarlo. Presenta un drenaje radial a centrifugado en algunos edificios volcánicos, con pendientes menores a 15° en las planicies, mientras que los volcanes superan los 45° cercanas a la cima e incluso en algunos flujos. Presenta variaciones altitudinales con un desnivel de 725 metros, con una elevación máxima de 1450 msnm hasta una mínima de 675 msnm en la porción sur donde entra en contacto con la Depresión sur.

#### **6.1.1.15 Sierra Los Tepetates**

Este dominio está situado en la porción noreste, que cubre un área de 40.3 km<sup>2</sup>, con una longitud de 9 km en dirección NE - SW en su parte distal mientras que en la proximal es de 1 km. Está cubierta una gran parte por el Flujo El Caracol en la porción oeste, mientras que en el NW



también está poco cubierta por la avalancha de la caldera de Villa Madero. Presenta un drenaje paralelo que se vuelve irregular al NW. Predominan pendientes de ángulos mayores a 50° acumuladas en la porción N, con pendientes más suaves en los niveles más altos que ascienden a pendientes entre 5 y 25°. El desnivel es de 1050 m con alturas máximas de 2075 msnm y mínimas de 1025 msnm en el sur.

#### **6.1.1.16 Complejo Volcánico Moreno**

Está ubicado en una porción W-NW formando parte del límite de dominios en esta zona con 4 km de norte a sur. Abarca un área de 25.6 km<sup>2</sup> con una longitud de 9 kilómetros de este a oeste. Alberga al menos a ocho edificios volcánicos dentro de los cuales se encuentra un volcán en escudo, tres conos y cuatro estratovolcanes. Con direcciones de flujo variables y un flujo sobresaliente que corre en dirección Este, presenta un drenaje paralelo a sub dendrítico con desembocadura de dirección irregular. Se observan pendientes mayores a 50° en los volcanes, aumentando a 60° cercanos a la cima, mientras que las pequeñas planicies que se forman por los derrames son menores a 20°. Tiene un desnivel de 1250 metros con alturas máximas de 2500 msnm y mínimas de 1250 msnm en el este del dominio.

#### **6.1.1.17 Dominio Los Puertos**

Está localizado en la porción oeste y forma parte del límite de esta zona cubriendo un área de 24.5 km<sup>2</sup> con una distribución preferencial de N-S y una longitud de E-O de 5.5 kilómetros. Se concentran al menos seis edificios volcánicos, donde destaca un volcán en escudo y dos conos, mientras que el resto no presenta un drenaje centrífugo a sub paralelo. Las pendientes en los edificios volcánicos superan los 60° en las partes proximales a las cimas, mientras que los flujos forman algunas planicies y laderas con pendientes variables, pero poco inclinadas con ángulos de 5° a 20°. Tiene alturas máximas de 2125 msnm y mínimas de 1300 msnm, teniendo un desnivel de 825 metros. La dirección de los flujos es muy variable, sin embargo, el volcán en escudo presenta dirección de flujo al Sureste y cubre parcialmente el dominio Las Trojes, mientras que el contacto con Las Tortugas es por el sistema NW – SE; a su vez es cubierto en el NW por el dominio La Mina.

#### **6.1.1.18 Dominio La Mina**

Este dominio presenta una orientación N-S, forma parte de la delimitación oeste y cubre un área de 9.6 km<sup>2</sup> con una longitud de 3.6 kilómetros en dirección N-S. Se delimita en las faldas del dominio Los Puertos en la porción Sur. Alberga a dos cuerpos volcánicos que presentan una dirección de flujo al SE. El drenaje es paralelo con desembocadura al Sur. Los flujos son muy viscosos



y permiten que las pendientes sean muy suaves, ya que no superan los 20°, mientras que las pendientes más abruptas se observan en los costados de los flujos superando los 45°. El desnivel es de 425 metros teniendo una altura máxima de 2000 msnm en la porción norte, mientras que la mínima se localiza al Sur con 1575 msnm.

#### **6.1.1.19 Dominio Las Mesas**

Este dominio está ubicado en la porción suroeste, cubre un área de 42.17 km<sup>2</sup>. Dentro de esta área se localizan al menos siete edificios volcánicos que pertenecen seis a conos de derrame y un volcán en escudo, donde es sobresaliente y predominante el derrame del Cerro de Mariana que sigue una dirección de flujo al S-SE y presenta un drenaje centrífugo a subdendrítico. Las pendientes son muy suaves en las planicies y mesetas que forman los flujos van de 5° a 20°, mientras que en los bordes del volcán superan los 60°. Este dominio se emplaza sobre los dominios del sur y sureste correspondientes a la Depresión Sur y Nocupétaro, mientras que al norte lo delimita el alto estructural de las Trojes que impiden el avance del flujo. Tiene un desnivel de 1000 metros, el punto más alto es representado por el Cerro de Mariana, con 1650 msnm y un nivel mínimo de 650 msnm en el inicio de la Depresión Sur.

#### **6.1.1.20 Flujo La Escondida**

Este dominio delimita la porción norte. Abarca un área de 48.6 km<sup>2</sup>, con una longitud de 7 km en dirección N - S. Se trata de un flujo o avalancha de escombros que proviene del norte con desarrollo hacia el sur, cubre ligeramente a la Sierra los Tepetates, mientras que en el oeste es cubierto parcialmente por la avalancha Caldera de Villa Madero. Presenta planicies en sus zonas más elevadas con pendientes que van de 5° a 20° mientras, que en los bordes y transición con los dominios adyacentes aumentan a 50° y 60°. Presenta un desnivel de 775 metros, localizando sus zonas de mayor elevación en el norte con 1950 msnm y las más bajas en el sur con 1175 msnm.

#### **6.1.1.21 Avalancha Caldera de Villa Madero**

Se trata de una avalancha de escombros que cubre la porción noroeste cuyo origen podría asociarse a la Caldera de Villa Madero. Abarca un área de 57.7 km<sup>2</sup>, tiene una longitud de 10 kilómetros de este a oeste. Estos depósitos se emplazan directamente hacia el este y cubren parcialmente flujo La Escondida en el Este, mientras que al sureste son delimitados por un alto estructural correspondiente a la Sierra Los Tepetates; hacia el Sur lo delimita el flujo el Caracol que se superpone a esta avalancha. La altura es muy poco variable, presenta un desnivel de 700 metros, la porción de mayor elevación se ubica en el NW con 2200 msnm y la mínima en el sureste con 1500



msnm. Presenta un drenaje paralelo a sub dendrítico con desembocadura al sureste. Presenta pendientes menores a  $15^\circ$  en las planicies, mientras que en el norte y noroeste se concentran algunas pendientes que superan los  $50^\circ$ .

#### **6.1.1.22 Flujo El Caracol**

Representa el límite Noroeste. Abarca un área de  $47.8 \text{ km}^2$  y presenta una longitud máxima de 9.5 kilómetros en dirección E -W. Alberga a cinco edificios volcánicos que corresponden a volcanes en escudo. El más sobresaliente es el Cerro de Tererio que aporta la mayor porción de los flujos lávicos que cubren a la avalancha de escombros de Villa Madero, y una gran porción de la Sierra los Tepetates. Presenta pendientes menores a  $10^\circ$  en las zonas distales a las cimas de los volcanes mientras que cerca de ellos aumentan a más de  $50^\circ$ . Tiene un desnivel de 950 metros; el punto más alto lo representa el Cerro de Tererio con 2625 msnm y la altitud mínima se encuentra en la porción sureste con 1675 msnm.

### **6.1.2 Lineamientos morfoestructurales**

A partir del análisis morfológico, en conjunto con el modelo de sombras, de pendientes y altimétrico, se trazaron lineamientos que pudieran estar relacionados con movimientos tectónicos o locales, con la finalidad de trazar las principales estructuras que se encuentran en la zona. Se lograron identificar tres sistemas que están relacionados con regímenes de deformación dúctil y frágil. Se propone un régimen dúctil que afecta en gran medida a las unidades más antiguas, mientras que el sistema frágil se distribuye de forma homogénea en diversas regiones.

#### **6.1.2 Estructuras discontinuas**

##### **6.1.2.1 Sistema Patambo-San Diego NNW-SSE**

Este sistema se presenta en los dominios de menores pendientes, siendo los más representativos y antiguos en la zona, están asociados a una deformación dúctil-frágil bien definida y relacionada con mega-estructuras que se observan desde Huetamo, identificadas y asociadas con la deformación laramídica. Las estructuras identificadas son escasas, pero de longitudes significativas, aunado a su continuidad espacial. No obstante, en los dominios más jóvenes difícilmente se logran apreciar estas deformaciones ya que suelen presentarse como lineamientos intermitentes, pero de gran extensión con longitudes que van de 2 a 10 km. Cortan en gran medida al dominio Sierra Central en sus periferias y cortan por completo al dominio Nocupétaro en su porción central. Su distribución es representativa en el sur del área, almacenan estructuras



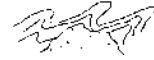
discontinuas del sistema El Anono y La Soleadita, formando relaciones oblicuas con respecto del sistema principal.

#### **6.1.2.2 Sistema El Anono NE-SW**

Se concentra en la porción centro, sureste y noreste, en los límites de los dominios del Anono y Sierra Central, principalmente, establecidos como lineamientos frágiles que marcan una apertura del paisaje y a su vez dividen dos dominios muy bien diferenciados por sus rasgos físicos primarios; estas estructuras son de magnitudes variables. Este sistema disloca los dominios afectados, produciendo bajos y altos estructurales que abren el paisaje a pequeñas planicies en los límites morfológicos. Este sistema representa el sistema intermedio, debido a que está preferencialmente emplazado en los dominios que se han considerado relativamente recientes, no obstante, se presenta de forma esporádica en la porción oeste y concentración en la porción central con lineamientos de pocas dimensiones, pero perfectamente establecidos. Otra de sus características es que se presentan cortando a dominios antiguos y jóvenes, lo que permite inferir que este sistema es relativamente joven o reactivado por eventos tectónicos recientes.

#### **6.1.2.3 Sistema La Soleadita NW-SE**

Es un sistema que se distribuye en la porción norte, se encuentra marcando un alto estructural que permite la transición de paisaje en zona norte, siendo parte de los dominios más jóvenes con menor grado de erosión y de mayor dimensión. Las estructuras de lineamientos van de 1 hasta 4 km formando interferencias con el sistema NE-SW. Esporádicamente se observan cortando los dominios de la parte central y representan el sistema estructural más joven de la zona de estudio y con menor predominio en contraste con los anteriores.



## **6.2.- Unidades del Ensamble Plutónico de San Diego y sus relaciones de contacto y cobertura**

Se presenta la descripción de 13 unidades geológicas en la zona de estudio. Con énfasis en las cuatro unidades del EPSD: Unidad Diorita-Norita El Salitre (UDNS), Unidad Granito San Diego (UGSD), Unidad Tonalita Frontera (UTF), Unidad Nocupétaro (UN). Así mismo, se describen las relaciones temporales con las unidades de basamento o roca encajonante del Complejo Arteaga (Litarenitas de San Diego (LSD); Pillow lavas El Puente (PLP) (Formación Charapo) y las unidades de cobertura del Terreno Guerrero (Arco Amengaricuaro) y del vulcanismo miocénico de la Sierra de Mil Cumbres y Plio-Cuaternario de la FVTM (ver tabla 1 y Figura 17).

En la figura 18 se presenta el mapa de distribución de las diferentes unidades cartografiadas en este estudio. Como será discutido más tarde, una primera consideración cartográfica se refiere a la reducción del área del EPSD, respecto a la cartografía presentada por el Servicio Geológico Mexicano (figura 10). Sin embargo, la orientación NNW-SSE de las unidades relacionada con la deformación es consistente con estos autores. Las unidades de basamento o las más antiguas del Terreno Guerrero se concentran en la porción central y al sur de la zona de estudio, mientras que las más recientes y de cobertura se distribuyen hacia el norte del área de estudio.

Aunque el principal objetivo de este estudio es petrológico y geoquímico, al final de la descripción de las unidades de este apartado, se presenta un breve resumen del estilo de deformación de las unidades de basamento, con la finalidad de comprender mejor las relaciones espaciales de las unidades del Ensamble Plutónico de San Diego Curucupatzco.

### **6.2.1 Complejo Arteaga**

Este complejo ha sido descrito como un basamento relativo que forma parte del subterreno Zihuatanejo, caracterizado como una secuencia siliciclástica deformada y metamorfizada en facies de esquistos verdes a facies de esquistos azules (complejo Las Ollas) como lo reporta Talavera-Mendoza (2000). Este complejo, de acuerdo con Centeno-García et al. (2003), se compone por cinco formaciones: Varales, Charapo, Jaltomate, Las Juntas y el Granito de Tumbiscatío-Macías.



| <b>Cobertura terciaria y plio-cuaternaria</b>                  |                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vulcanismo de la Faja Volcánica Transmexicana                  | Vulcanismo Plio-Cuaternario<br>Andesita-Basalto: El Sauz (ABS)<br>Basaltos Tererio (BT)<br>Avalancha de escombros: Villa Madero (AEVM) |
| Vulcanismo miocénico de la Sierra de Mil Cumbres               | Secuencia andesítica Sierra de Mil Cumbres: Etúcuaro-El Limoncito (SAEL)                                                               |
| <b>Deformación D2 (Cretácico Tardío-Paleoceno, Laramídica)</b> |                                                                                                                                        |
| <b>Cobertura cretácica del Terreno Guerrero</b>                |                                                                                                                                        |
| Arco Amengarícuaro                                             | Formación las Anonas<br>Formación Playitas                                                                                             |
| <b>Deformación D1 (Jurásico Tardío)</b>                        |                                                                                                                                        |
| <b>Basamento/Encajonante</b>                                   |                                                                                                                                        |
| Complejo Arteaga                                               | Litarenitas de San Diego (LSD)<br>Pillow lavas El Puente (PLP) Formación Charapo                                                       |
| <b>Ensamble plutónico San Diego Curucupatzeo (EPSD)</b>        | Unidad Diorita-Norita El Salitre (UDNS)<br>Unidad Granito San Diego (UGSD)<br>Unidad Tonalita Frontera (UTF)<br>Unidad Nocupétaro (UN) |

Tabla 1: Unidades geológicas del Ensamble Plutónico de San Diego Curucupatzeo (EPSD) que muestra las relaciones temporales de su roca encajonante (Complejo Arteaga), así como las unidades de cobertura cretácica (Terreno Guerrero) y terciarias (Sierra de Mil Cumbres y Faja Volcánica Transmexicana). Notar la distribución temporal de dos fases de deformación orogénicas D1 y D2 que afectan al EPSD.

En el área de San Diego afloran Las unidades correlacionables con la Formación Varales (Litarenitas de San Diego), formación Charapo (pillow-lavas El Puente) y el Granito de Tumbiscatío-Macias (Ensamble Plutónico de San Diego y diorita-norita El Salitre).

#### 6.2.1.1 Litarenitas de San Diego (LSD)

La unidad Litarenitas de San Diego (LSD) se refiere a una sucesión sedimentaria de origen marino de areniscas, lutitas y cuarcitas. La estructura generalmente es de tipo rítmica y tipo flysch, se encuentra plegada y en algunas partes con un cierto grado de metamorfismo regional bajo.

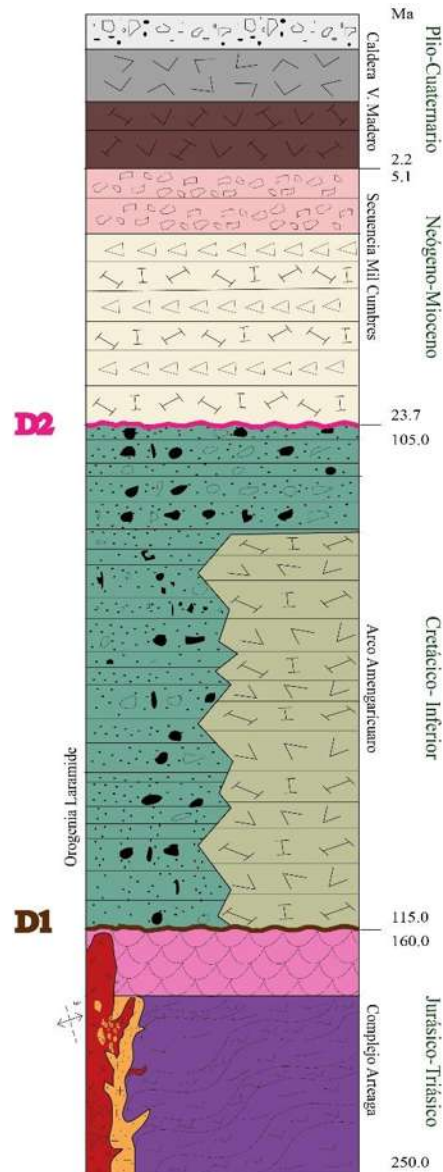


Figura 17: Columna estratigráfica de la zona de estudio. Notar las relaciones temporales del basamento o roca encajonante, así como las unidades de cobertura del EPSD. Se indican además las etapas de deformación y la temporalidad de cada evento que dio lugar a los eventos geológicos de la zona de estudio.

La unidad LSD se concentra en el sur del área de estudio con afloramientos de menor dimensión en la porción norte. Está expuesta sobre un área de 80.9 km<sup>2</sup>, presenta una forma irregular, semi- alargada, con una orientación preferencial N-S. Su mejor exposición es en la localidad El Brinco, sobre la terracería que conecta la cabecera de Villa Madero con la localidad de San Diego Curucupatzeo, a la cual se le ha considerado como localidad tipo para este trabajo, debido a su perfecta exposición. De igual manera, la localidad Los Planes, localizada al SE de la localidad de Etúcuaro, cuenta con afloramientos bien expuestos sobre el camino, al igual que en la cabecera

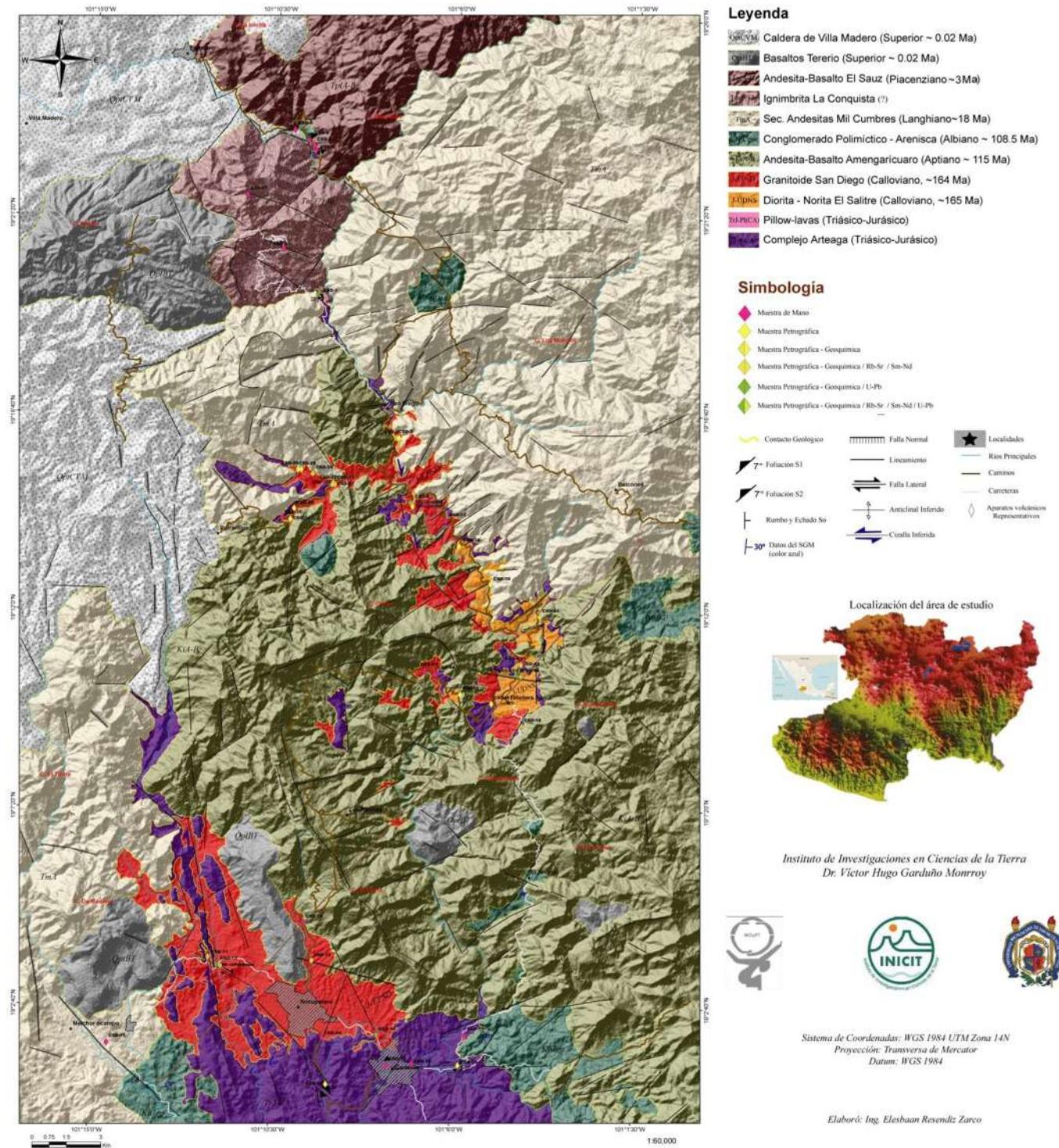
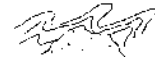
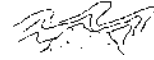


Figura 18: Mapa geológico de la región de San Diego Curucupatzeeo.



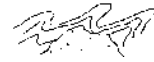
municipal de Carácuaro. Las localidades más representativas donde aflora sobre el camino son: El Cuitzillo, El Platanito, El Reparo y Las Juntas de la Torre.



*Figura 19: Fotografías de campo del Complejo Metamórfico de Carácuaro. A1) Detalle de plegamiento de la unidad LSD; A2) contacto por intrusión de la unidad EPD a la unidad LSD en la localidad El Real; A3; A4 y A6 detalle del afloramiento de hornfels con abundante andalucita, localidad el Cuitzillo; A5) estructura disarmónica de la unidad metamorfizada, cerca del arroyo Patambo.*

La estructura de LSD, resulta ser muy heterogénea, de sur a norte suele presentar mayor grado metamórfico, mientras que la deformación en la porción norte tiende a ser dúctil-frágil, conteniendo la mayor cantidad de pliegues que llegan a ser de pocos metros. Las estructuras llegan a ser foliadas o no foliadas con estratos bien definidos, estratos con foliación superpuesta, pero reconocibles y generalmente plegadas a escala macroscópica y microscópica. En algunos afloramientos, como en la localidad de Patambo, se observan formando estructuras aisladas tipo “roof pendant” (techos flotantes) alineadas con estructuras orientadas NNW, que podrían estar reorientadas por el efecto de la deformación de la región. Los afloramientos varían de color de amarillentas con tonalidades rojizas y naranja tenue, su color cambia cuando presenta mayor grado de metamorfismo (meta-arenisca), con tonalidades verde grisáceas. La composición mineral de las areniscas es principalmente cuarzo, feldespatos y líticos de colores claros (amarillentos, rosáceos y naranja tenue) en matriz grano sostenida equigranular, con tamaños de 1 a 2 mm.

Las areniscas presentan plegamiento de tipo inclinado y tumbado con adelgazamiento en la charnela, los datos estructurales presentan inclinaciones en sus flancos de N70/35°NW y



N70/45°NW, plano axial N90/65 NW y un eje de N90/10NW. Los contactos son discordantes e infrayace la cobertura volcánica del arco Amengarícuaro y del vulcanismo más reciente. Las intrusiones plutónicas suelen generar hornfels (Cuitzillo) en la LSD y se observan diversas y extensas aureolas de contacto (El Real).

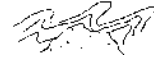
La unidad del LSD se considera como una de las unidades más antiguas, perteneciente al Complejo Arteaga, debido a sus relaciones de contacto con las unidades adyacentes y su estrecha relación con la unidad de pillow-lavas. El SGM le asigna una edad interpretativa del Jurásico Medio, sin embargo, como veremos más adelante esta edad no sería congruente con la edad del Ensamble Plutónico de San Diego obtenida en este trabajo y ya señalada en el trabajo de Montiel-Escobar et al. (2015).

#### **6.2.1.2 Pillow lavas El Puente (PLP) Formación Charapo**

Las Pillow lavas El Puente (PLP) consisten de una serie de flujos volcánicos de composición basáltica con estructura de lavas almohadilladas y de derrames de color verde a gris oscuro que se presenta en bloques o lentes dentro de la secuencia de las Litarenitas de San Diego. Se asume como Formación Charapo en cuanto presenta el mismo contexto geológico descrito en la región de Tumbiscatío (Centeno-García et al., 2011).

En el área de estudio están expuestas en la porción norte, donde se presenta la transición con las unidades de cobertura volcánica. El área total de las PLP no se tiene bien establecida, su extensión ronda los 5 km sobre el Río San Diego y en algunas bifurcaciones al oeste a 3 km de San Diego en dirección sur, presenta una forma irregular, de orientación N-S en forma rectangular semi-elongada. En las inmediaciones de la localidad de San Diego hasta el Puente de San José afloran perfectamente expuestas sobre el Río San Diego, las rocas más sanas son las de la localidad El Puente de San José y El Limoncito, donde las más representativas son las de El Puente de San José, de manera que se considera como localidad tipo. Esta unidad no tiene ningún registro cartográfico ni de investigación, en este trabajo se darán a conocer sus características principales.

La unidad PLP muestra poca variación en su estructura y composición mineralógica. En su forma masiva exhibe estructura almohadillada entre 30 y 80 cm de diámetro; en muestra de mano se observan texturas afaníticas equigranulares de grano fino a afíricas, con un notable enriquecimiento en minerales máficos. Se observan fenocristales muy pequeños de plagioclasa y piroxeno. Los minerales de alteración corresponden a calcita, sulfuros como: pirita, calcopirita y



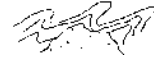
galena al igual que algunos óxidos que se generan en las vetillas de carbonatos. También se identificaron hilos y pepitas de oro nativo.

Presenta múltiples fracturas y evidencia de deformación dúctil-frágil que permite apreciar sigmoides rellenos de calcita. Sus contactos son generalmente por intrusión del EPSD con fragmentos bajo forma de xenolitos dentro del granito expuestos a lo largo del Río San Diego, sin embargo, el contacto también puede ser neto con un ligero cambio de coloración.



*Figura 20: Fotografías de campo de la Unidad de pillow lavas El puente (PLP). B1) Localidad tipo, aflorante de las pillow-lavas en la zona de cizalla con el EPSD muestra el contraste de colores entre ambas unidades en afloramientos discontinuos; B2-B4 estructura almohadillada en bloques bien expuestos a lo largo del Río San Diego.*

A pesar de no tener una amplia extensión, esta unidad ha sido interpretada como piso oceánico asociada a un conjunto petroectónico de prisma acrecional (Centeno et al., 2003), por lo que sus relaciones de contacto son bajo forma de lentes, nódulos y en ocasiones en forma de escama tectónica.



### 6.2.2 Ensamble plutónico San Diego Curucupatzee (EPSD)

El Ensamble plutónico San Diego Curucupatzee (EPSD) ha sido dividido en cuatro unidades: i) Unidad Diorita-Norita El Salitre (UDNS); ii) Unidad Granito San Diego (UGSD); Unidad Tonalita Frontera (UTF) y la Unidad Nocupétaro (UN). Sin embargo, es importante hacer notar que la UDNS, esencialmente de composición máfica, contrasta notablemente en su característica petrológica con el resto de las unidades netamente félsicas y graníticas, aunque sus relaciones en campo no han sido bien determinadas. Se ha incluido dentro del EPSD, como veremos en el apartado de geocronología por medio de la separación de circones, debido a que la edad obtenida es relativamente contemporánea con las otras unidades graníticas, por lo tanto, se conceptualiza dentro de un mismo proceso de ensamble o amalgamación magmática.

El EPSD se distribuye en la porción central de la zona de estudio, se expone en un área total de 86.84 km<sup>2</sup>, presenta una forma irregular semi- oblicua y tiene una orientación preferencial sur-suroeste que se extiende hacia el NNW en forma arborescente (figura 18). En la localidad de San Diego Curucupatzee se tiene una exposición del afloramiento continua sobre el río, donde intrusión e inclusiona a las unidades del Complejo Arteaga, entregando un paisaje abierto y espectacular, en él se tienen rocas sanas y moderadamente sanas, así como rocas alteradas por hidrotermalismo, por lo cual se ha decidido considerarla como localidad tipo. De igual manera se encuentran perfectas exposiciones en las inmediaciones de la localidad de Patambo y Nocupétaro con paisajes que forman colinas y semi-planicies en toda la zona, sin embargo, la roca en algunos de los afloramientos se encuentra ligeramente intemperizada, pero con buenas extensiones de roca sana y moderadamente sana en los arroyos, aunque la intrusión con la unidad LSD es menos observable. En la localidad de Frontera de San Juan también hay buenas exposiciones donde es mejor apreciable el mixing y mingling con la UDNS.

La unidad EPSD presenta poca variación en su estructura y composición mineralógica, no presenta foliación magmática, suele presentar xenolitos del encajonante casi en toda su exposición, presenta estructuras de deformación post-magmáticas. Sus contactos generalmente son netos con la unidad LSD y con bordes de enfriamiento en la unidad máfica, al igual que con la unidad PLP.

En muestra de mano se observa una coloración gris-blanquecina con tonalidades negras, presenta una textura fanerítica de grano medio a grueso, con un notable enriquecimiento en félsicos y en ocasiones con incremento de máficos (biotita).



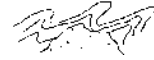
### **6.2.2.1 Unidad Diorita-Norita El Salitre (UDNS)**

La UDNS corresponde a una unidad máfica de origen plutónico que presenta una gran variedad de estructuras de hibridación (mixing y mingling), estas estructuras representan una relación transicional con el EPSD que corresponden con una interacción máfica – félsica que da origen a las variaciones mineralógicas y texturales de estos dos cuerpos.

En trabajos previos esta unidad fue identificada en la porción Sur de la localidad de Carácuaro descrita por el SGM como diorita la Noria en la carta Carácuaro (E14-A43) y Acuyo (E14-A53). En la carta Carácuaro 1:50 000, no reportan avistamientos de un cuerpo con características similares, de manera que es la primera vez que será descrita en esta área de Carácuaro-San Diego.

Su exposición se concentra en la porción ESE del área de estudio, el área cartografiada de esta unidad cubre una extensión de 8.7 km<sup>2</sup>, y en campo se ha observado durante un trayecto de más de 7 km, extendiéndose en forma de ramificaciones. En las periferias de la porción norte de la localidad del Salitre se encuentran afloramientos continuos en paredes de más de 20 metros, bien expuestas sobre el camino, con rocas sanas y moderadamente sanas, además de ser la única que cuenta con una exposición tan grande y que además no presenta mezcla con el cuerpo plutónico, es por ello que se le considera como localidad tipo. De igual forma, en la localidad del Real y Frontera de San Juan se pueden observar afloramientos de poca dimensión, pero que por lo general presentan mixing y mingling con el granitoide (figura 23 D4), además de estar generalmente intemperizada y erosionada (tipo cebolla en localidad el Real) y que se encuentran relativamente cercanos a la secuencia metamórfica. Otra de las exposiciones relevantes se distingue en la localidad del Coyol, donde mediante paredes y bloques completamente sanos se distingue su composición mineralógica, estructura y textura.

La estructura generalmente se observa de forma masiva, fuertemente fracturada aparece como enclaves y en ocasiones mezclado con el EPSD. No se observa foliación magmática (únicamente en las periferias de la localidad de Frontera, en la porción norte) y sus contactos son generalmente con bordes difusos. El contacto con la unidad LSD no es muy claro, la transición en el cambio litológico no se pudo observar en campo debido a lo accidentado del terreno, al igual que la intensa vegetación. Generalmente, se presenta de color gris oscuro, con tonalidades blanquecinas que en ocasiones llegan a ser dominantes generando un aspecto moteado, suele presentar similitud visual con el EPSD en afloramiento, sin embargo, su composición mineralógica en muestra de mano es evidente.



*Figura 21: Fotografías de campo. F1) Pared de afloramiento de localidad tipo en el Salitre; F2) erosión tipo cebolla típica de esta unidad en la zona de estudio; F3 y F4) relaciones de estructuras mixing y mingling del EPSD.*

Es una unidad muy homogénea en su composición mineral, exceptuando en los contactos de enfriamiento con el EPSD. En muestra de mano se observan texturas faneríticas inequigranulares, de grano grueso a medio con un enriquecimiento en minerales máficos. Su color es generalmente gris oscuro con tonalidades blanquecinas debido al enriquecimiento en plagioclasa. En roca sana se logran distinguir plagioclasas, biotitas, clinopiroxenos, anfíboles y cuarzo. Como minerales de alteración: clorita, epidota, calcita, óxidos y sulfuros.

#### **6.2.2.2 Unidad Granito San Diego (UGSD)**

Esta unidad tiene como característica principal un alto contenido de feldespato y generalmente moderado contenido de biotita que proporcionan colores félsicos con tonalidades blanquecinas a grises claros, otro de los factores clave es la asimilación parcial de xenolitos de pillow lavas (figura 22 C2) y areniscas generalmente de gran tamaño (figura 22 C3).

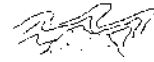
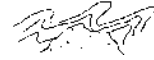


Figura 22: Fotografías de campo de la estructura del Ensamble Plutónico San Diego (EPSD). C1) Localidad tipo del EPSD exposición a lo largo del río San Diego; C2 y C3) xenolitos de las unidades LSD y PLP; C4) Intenso fracturamiento y asimilación parcial de xenolitos abundantes de unidades triásicas; C5) cuerpo tabular correspondiente a diques localizados en las inmediaciones de Las Juntitas.

Se concentra en la porción norte correspondiente al EPSD. Esta unidad se ha propuesto como la localidad tipo del EPSD debido a su extensión y representatividad. Esta sección se logra observar desde la localidad de San Diego Curucupatzeeo hasta la localidad del Real, a partir de este punto comienza una mezcla con la UDNS y el contenido mineral cambia ligeramente. Generalmente, presenta xenolitos de LSD y las pillow lavas de la unidad PLP sobre todo el río, los tamaños de estos xenolitos varían de 2- 20 cm con algunas excepciones que llegan a superar los 50 cm; algunos de los



xenolitos pertenecen a la unidad LSD. Sus afloramientos son extensos y muy visibles debido a su contraste de colores que resaltan en el paisaje.

Presenta una estructura masiva, ligeramente fracturada y afectada por una estructura de falla tipo transformante que permite apreciar la asimilación parcial de la unidad PLP que además registra una especie de incorporación de esta unidad por medio de la cizalla con tendencia NNW.

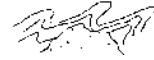
En la porción proximal a la localidad de Las Juntitas se aprecia una cantidad considerable de xenolitos y un corte de la unidad granitoide por un par de diques (figura C5) de espesores variables, mayores a 70 cm. En roca sana es color gris-blanquecino con fracturas rellenas de óxidos (producto de alteración) que dejan ver tonalidades rojizas a naranjas, su textura es fanerítica, con minerales esencialmente de feldespato, cuarzo, plagioclasa y biotita. Se observan algunos minerales de alteración como clorita, epidota y algunos sulfuros. En la localidad del Limoncito se logró identificar la presencia de oro nativo diseminado en pequeñas proporciones observable con lupa.

#### **6.2.2.3 Unidad Tonalita Frontera (UTF)**

La UTF se caracteriza por presentar una ausencia de feldespato potásico, que generan tonalidades generalmente grises. Esta unidad alberga la mayoría de los enclaves de la unidad diorita-norita, además de mostrar deformación compartida con el encajonante en las periferias de la Localidad del Coyol.

Esta unidad se concentra en la porción central del EPSD. Se ha determinado como localidad tipo la localidad de Frontera, debido a que presenta la mayor variación mineralógica y asimilación de rocas de composición diversa.

Presenta una estructura masiva, ligeramente fracturada, con buena exposición, aunque la vegetación y el intemperismo cubre gran parte del área. Los mejores afloramientos están sobre la carretera y los arroyos. En la porción SSW, a escasos 800 m de la localidad de Frontera, se presenta una estructura de clastos alargados dentro de las LSD, donde se observan enclaves de la UDNS y el aflorante del EPSD. Se aprecian fragmentos de metasedimentos en todo el camino hasta la localidad de Frontera en su porción SE, gran parte de las fracturas se rellenan de óxidos. La peculiaridad de esta unidad consiste en la presencia de un incremento considerable en el contenido de plagioclasa con disminución en la cantidad de moscovita. En roca sana es color amarillento a gris claro, la textura es fanerítica con minerales esencialmente de plagioclasa, cuarzo, moscovita  $\pm$  biotita. En el afloramiento de la porción norte de Frontera de San Juan se aprecia una ligera tendencia de



alineación en las plagioclasas (N120°) lo que podría interpretarse como foliación magmática, aunque esta lineación sólo se observa en este sitio. En esta unidad disminuye la presencia de moscovita e incrementa la biotita a medida que la relación con la UDNS se incrementa.



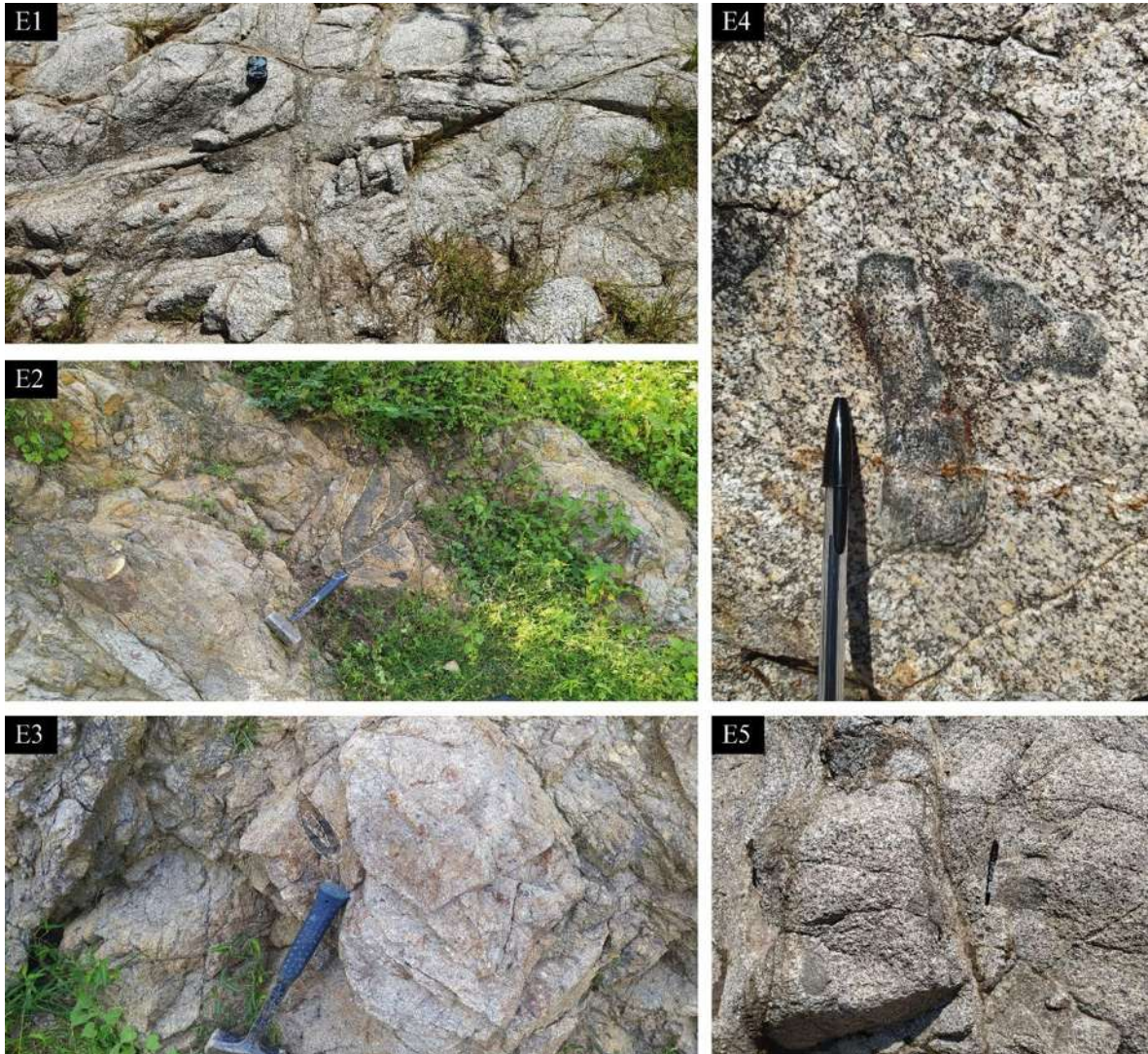
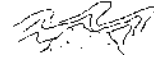
*Figura 23: Fotografías de campo del EPSD y la Unidad Diorita-Norita (UDN). D1) Apertura de paisaje entre las montañas que permite apreciar la unidad del EPSD como pequeños montículos con erosiones típicas graníticas; D2) asimilación parcial de metasedimentos pelíticos con abundancia de moscovita; D3 y D4) mixing y mingling con la UDNS en la porción norte de la localidad de Frontera; D5) plegamiento post-magmático compartido por el EPSD y el encajonante.*

#### 6.2.2.4 Unidad Nocupétaro (UN)

Generalmente se puede observar a la UN con tonalidades grisáceas a amarillentas, con un enriquecimiento en moscovita y biotita (de aspecto moteado), deformado por cizalla, con plegamiento interno y albergando xenolitos de las LSD de tamaños generalmente menores a 30 cm.

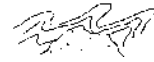
La Unidad Nocupétaro corresponde a la porción S del EPSD, sus mejores exposiciones se pueden observar en las localidades de Nocupétaro, Patambo y Carácuaro.

Presenta una estructura masiva con intenso fracturamiento y gran número de estructuras de deformación (figura 24 E1), así como estructuras transformantes y cabalgaduras que permiten observar pequeñas ventanas del EPSD adheridas a las paredes de las LSD. En muestra de mano generalmente se observa de color gris-blanquecino, de textura fanerítica, con minerales esencialmente de plagioclasa, cuarzo, biotita y escasa o nula moscovita.



*Figura 24: Fotografías de campo de las estructuras de deformación del EPSD. E1) Zona de cizalla en la localidad de Patambo, se puede observar la cinemática de composición dextral; E2) Pliegue interno en el EPSD, las líneas punteadas marcan perfectamente la distribución de sus flancos y charnela; E3) xenolito de la unidad encajonante deformado de forma contemporánea con el pliegue de la unidad del EPSD; E4 y E5) abundantes xenolitos parcialmente asimilados con bordes de reacción en E5.*

Sobre la estructura de cizalla se logran observar en una escala macro, estructuras tipo “roof pendant” del encajonante (figura 18). En la localidad de Patambo se aprecian vetillas aplíticas que son cortadas por la cizalla de composición dextral (figura 24 E1) con datos estructurales N15/80NE para la vetilla y N20/66NW para la cizalla. Una de las evidencias más significativas de esta unidad es la presencia de un pliegue volcado (figura 24 E2) que presenta corrimiento, en la localidad de San Nicolás, que confirma la deformación post-magmática del EPSD.



Su emplazamiento afecta de manera directa a la unidad de LSD (lutitas) que en esta zona presentan incremento en su deformación de tipo disarmónica y tonalidades oscuras. El Arco Amengarícuaro presenta discordancia litológica y sobreyace a estas unidades.

### **6.2.3 Unidades de cobertura del Terreno Guerrero (Arco Amengarícuaro)**

Consiste en una secuencia vulcano-sedimentaria compuesta por secuencia de vulcanismo de arco de composición intermedia a félsica (derrames andesíticos a dacíticos) y una secuencia de sedimentos terrígenos (Montiel-Escobar et al., 1998). Estas unidades pueden estar correlacionadas con la formación Zihuatanejo y la formación Playitas. Sabanero-Sosa et al. (1997) describen por primera vez a lo que se ha denominado como Arco Amengarícuaro en la carta Acuyo del entonces Consejo de Recursos Minerales.

#### **6.2.3.1 Formación las Anonas**

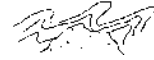
En este trabajo se define como formación las Anonas a la unidad de cobertura volcánica más antigua de la zona de estudio, esta unidad cubre la porción sur-este y es parcialmente cubierta por la unidad de Mil Cumbres, cubre un área cercana a los 383 km<sup>2</sup>. Las mejores exposiciones se encuentran en las localidades cercanas a Las Anonas y la distribución proximal en el sur de la localidad de Frontera de San Juan. Consta de una serie de derrames dacíticos-andesíticos de estructura masiva en ocasiones pseudoestratificado y vesiculado; las fracturas son abundantes en toda la unidad. De texturas afaníticas a porfídicas en colores gris-verdoso en muestra de mano e intemperizando a gris tenue con cristales esencialmente de plagioclasa, piroxenos, anfíbol y ocasionalmente olivino. Los minerales de alteración son clorita y epidota con presencia de óxidos. El espesor aproximado se ha considerado de 600 a 300 m.

De acuerdo a los datos obtenidos en campo con echados que varían en dirección NE-SW, se interpreta una deformación contemporánea con la Orogenia Laramide que genera plegamiento en la porción cercana a la localidad del Coyol. Sobreyace de manera discordante a las unidades del EPSD y las LSD.

De acuerdo con la interpretación de los autores que han descrito esta unidad se interpreta una edad cretácica.

#### **6.2.3.2 Formación Playitas**

Se define así a una secuencia sedimentaria representada por un paquete de areniscas y un conglomerado con variaciones en el espesor de sus horizontes, los contactos con las unidades más



antiguas son por superposición, presenta estructura estratificada y es asignada como parte de la cobertura en el EPSD.

Está distribuida en la porción S del área de estudio, con afloramientos esporádicos en la porción N y E. Esta unidad sedimentaria está expuesta en un área de 12.5 km<sup>2</sup>, presenta una forma irregular y aparece como ventanas de erosión en algunas localidades (de acuerdo con la cartografía del SGM). Su exposición es muy buena en la localidad de la Yerbabuena con afloramientos continuos y horizontes bien definidos que permiten apreciar las areniscas. La localidad Los Manguitos, en el SE de Etúcuaro, presenta excelentes exposiciones con un amplio volumen del conglomerado.

Los afloramientos del conglomerado presentan horizontes de arenisca, limolita y lutita. El color en afloramiento es marrón a rojizo con tonalidades grisáceas. El espesor de los estratos va de 10 hasta 70 cm con basculamiento hacia el NW y SE, los horizontes más representativos son de conglomerado polimítico, los clastos mal seleccionados suelen ser angulosos, sub angulosos a sub-redondeados, con grado textural submaduro. Los tamaños de clastos son variables, van de pocos milímetros hasta 20 cm en matriz grano sostenida compuesta de arena y óxidos. Los limos presentan tonalidades marrones asociadas al evento volcánico del arco. Las lutitas son de color oscuro y pueden estar asociadas al intemperismo del complejo Arteaga. Las areniscas presentan un color gris claro con una textura clástica de grano medio, de matriz grano sostenida, su composición es esencialmente de cuarzo, feldespato y líticos (subredondeados a redondeados) con una matriz arcillosa.

Se caracteriza por la presencia de clastos volcánicos de color verde y color café oscuro 10-15 %, los metamórficos son predominantemente esquistos verdes, pizarra y metaarenisca (Cuitzillo) con proporciones variables de 20 -30 %, graníticos > 7% y gran cantidad de cuarzo. Además, está caracterizada por una gradación inversa e intenso fracturamiento en toda su exposición.

Al igual que la formación Las Anonas, de acuerdo a los datos obtenidos en campo, se identificaron echados de dirección NE-SW que dan origen al antiformal asociado con la Orogenia Laramide. Su relación estratigráfica corresponde con el arco, compartiendo temporalidad de depositación.



#### **6.2.4. Unidades de Cobertura Terciaria y Plio-Cuaternaria**

##### **6.2.4.1 Secuencia andesítica Sierra de Mil Cumbres: Etúcuaro-El Limoncito (SAEL)**

Se define así a una sucesión de flujos de lava basálticos y andesíticos, que ocasionalmente presentan brechas intercaladas con flujos piroclásticos. Su distribución está principalmente en la porción noreste del área de estudio, cubriendo gran parte de la carta, reduciendo su volumen en la porción central e incrementando en el suroeste. Esta unidad de cobertura se ha definido como secuencia andesítica Etúcuaro-El Limoncito debido a que es la localidad con la mejor exposición en el trayecto de las localidades antes mencionadas.

Se expone en un área de 566 km<sup>2</sup>, su forma es irregular con una tendencia semicircular NE-SW parcialmente cubierta por el vulcanismo Plio-Cuaternario; presenta estructuras masivas con variaciones en su composición.

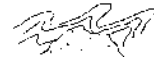
La composición andesítica presenta una estructura masiva, coloración gris claro, con tonos rojizos, textura fanerítica y minerales esencialmente de plagioclasa,  $\pm$ piroxenos, poco anfíbol y muy escaso contenido de olivinos. Otra de las variaciones es una roca de color rojizo a gris oscuro, fuertemente fracturado, con una textura piroclástica en matriz de ceniza, presenta líticos y vidrio, de acuerdo con Gómez-Vasconcelos et al. (2015) quien asigna una edad de entre 14 a 26 Ma.

##### **6.2.4.2 Vulcanismo Plio-Cuaternario**

###### **6.2.4.2.1 Andesita-Basalto: El Sauz (ABS)**

Esta unidad está definida por una serie de coladas de lava de composición andesítica con variaciones a composición basáltica, su mejor exposición en la localidad de El Sauz y cubre la porción N en la zona de estudio con un área aproximada de 46 km<sup>2</sup>. Su forma es irregular semi-elipsoidal con orientación preferencial de distribución hacia el S-SW. En la localidad de El Sauz y cerro El Águila hay perfectas exposiciones con afloramientos extensos.

Esta unidad presenta un color gris oscuro a gris claro y en ocasiones presenta tonalidades rojizas, la estructura es masiva y compacta, poco fracturada. La textura es afanítica, con presencia de cristales de plagioclasa, clinopiroxeno  $\pm$  olivino (basalto) mientras que en ocasiones llega a presentar color gris claro, de estructura masiva y compacta de textura fanerítica con minerales de plagioclasa, anfíbol,  $\pm$  piroxeno y escaso o nulo olivino.



#### **6.2.4.2.2 Basaltos Tererio (BT)**

Esta unidad es uno de los eventos más jóvenes de la zona de estudio, y está conformado por cuerpos volcánicos de composición basáltica, que se presentan como derrames sobre las unidades más antiguas. Su distribución es heterogénea, al igual que su forma. Se aprecian dos tendencias que se distribuyen en la porción SW con desplazamiento de sur a norte y otra en distribución suroeste con tendencia este-noreste. La cobertura total en el área es equivalente a 128.6 km<sup>2</sup>. Los afloramientos son buenos y bien expuestos en las diversas localidades; sin embargo, en este trabajo la localidad mejor expuesta se observó en la localidad de Tererio.

Los afloramientos más representativos presentan características similares en su composición, de estructuras masivas y compactas de tipo coladas, de colores negros con algunas tonalidades rojizas, y presencia de vesículas. La textura es afanítica con cristales esencialmente de plagioclasa, olivino y piroxeno.

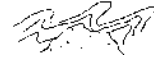
#### **6.2.4.2.3 Avalancha de escombros: Villa Madero (AEVM)**

Esta unidad representa el evento más joven en el área de estudio, su relación está estrechamente ligada a la caldera de Villa Madero, propuesta por Gómez-Vasconcelos et al. (2015); y se distribuye de norte a sur en la porción occidental de la zona de estudio.

De acuerdo con la autora, el origen de esta caldera se relaciona con aparatos dacíticos y andesíticos que originan en su colapso una serie de flujos piroclásticos de pómez y bloques de ceniza. En la porción norte no se encuentra asociado como producto de la caldera de Villa Madero; sin embargo, en este trabajo se observa una composición de bloques heterogéneos de diversa litología en una matriz de gravas y arenas, con fragmentos mal clasificados y ocasionalmente flujos piroclásticos, por tanto, se pretende proponer a este cuerpo como parte de esta estructura caldérica.

#### **6.2.5 Eventos de Deformación del EPSD**

Como se mencionó, no es objetivo de este estudio realizar un análisis estructural de la zona de San Diego Curucupatzco. Sin embargo, considerando que la distribución regional orientada NNW-SSE de las unidades del EPSD se relaciona estrechamente con los eventos de deformación (Ver sección estructural de figura 25), resulta importante indicar brevemente las características geométricas de dos eventos de deformación dúctil-frágil identificados por medio de las microestructuras observadas en campo.



#### 6.2.5.1 Deformación D1

Este evento de deformación ha sido registrado sólo en las unidades del Complejo Arteaga y en el mismo EPSD. Se caracteriza por presentar pliegues volcados y microtexturas con micropliegues abiertos y microzonas de cizalla, los cuales se observan con dimensiones de pocos milímetros hasta 15 cm de largo por 40 cm de ancho, distribuidos de forma heterogénea, pero con mayor afectación en la porción S.

Los ejes de pliegue de este evento de deformación están orientados al NW. Las microestructuras de pliegues y zonas de cizalla son más evidentes en la unidad LSD (lutitas) y al parecer en la unidad máfica (PLP) donde se desplazan en bloques sobre planos de cizalla NNW.

Todos los pliegues están asociados con planos de cizalla orientados NNW con características dúctil-frágil con zonas amplias a lo largo del Río San Diego. En el puente se identificó un lineamiento que está asociado a esta zona de cizalla, pero no presenta rasgos continuos, por lo tanto, no fue bien determinada.

Las microtexturas de este evento se caracterizan por crenulación esquistosa con intercrecimiento de sericita y moscovita paralela a la foliación y acumulación de grafito en las zonas de charnela, al igual que rotación de clastos con sombras de presión que se pueden observar en las unidades de la LSD (figura 26 AC). Por su parte, el EPSD presenta corrimiento en los flancos de sus pliegues, lo que indica que su deformación está asociada con el evento D1 que lo deforma en estado subsólido.

Es importante mencionar que la D1 presenta estructuras que sugieren una deformación progresiva, con pliegues de diferente geometría. Sin embargo, debido a la dificultad en la obtención de datos estructurales por el tipo de litología y las limitaciones en las vías de acceso, no se tiene bien controlada la geometría de esta etapa de deformación. Considerando que la deformación afecta a la roca encajonante y al granito, se esperaría un escenario con desarrollo de foliación y asociado con un proceso de levantamiento, acompañado por planos y discontinuidades de zonas de cizalla a través de los cuales se emplazaría el EPSD desarrollando S1, S2 y L1.

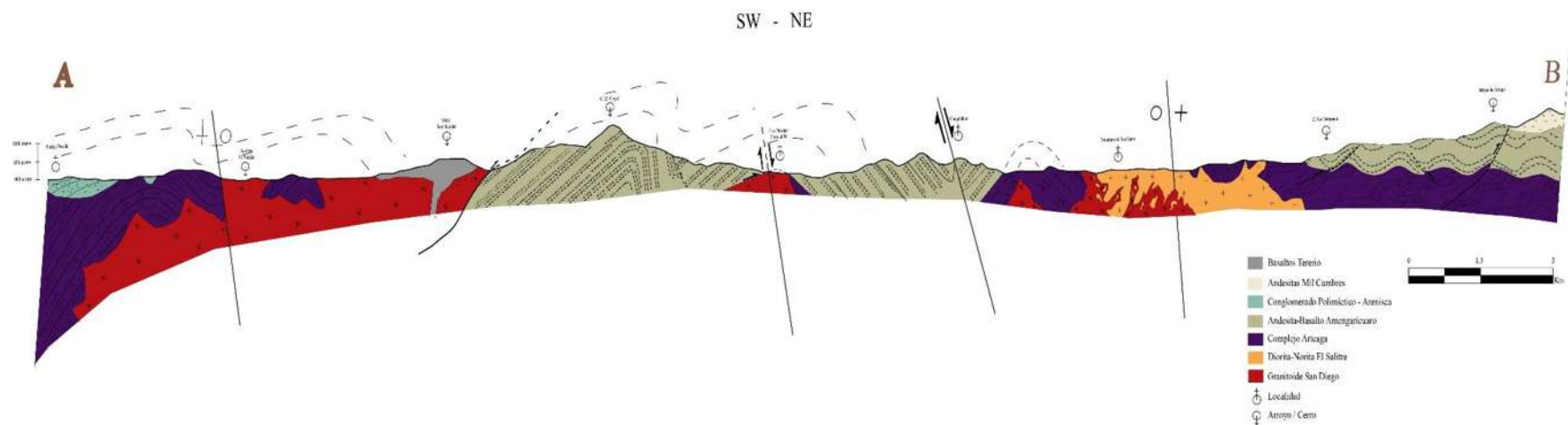
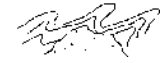
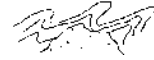


Figura 15: Sección geológica SW-NE del EPSD. Notar las estructuras de primer orden correspondientes con zonas de cizalla que condicionan el emplazamiento de este ensamble plutónico.



#### 6.2.5.1 Deformación D2

Este evento de deformación ha sido registrado en todas las unidades de basamento, ya sea en las unidades del Complejo Arteaga, como en el mismo EPSD, así como en las unidades del Arco Amengarícuaro. Este evento de deformación es responsable de la principal distribución de las unidades de basamento y como puede observarse en la sección estructural de la figura 24, se asocia con la formación de grandes anticlinales y sinclinales orientados NNW-SSE.

Esta deformación se caracteriza por pliegues inclinados y tumbados de dimensiones métricas a nivel afloramiento, particularmente en la porción norte del área de estudio. A nivel más regional, se observan estas estructuras con dimensiones kilométricas desarrolladas en la porción central de la zona de estudio. Los ejes de pliegue de este evento de deformación están orientados al NE. Las microestructuras de pliegues y zonas de cizalla son más evidentes en las unidades del Complejo Arteaga y en los planos de la estratificación de la Formación Playitas. Es notable cómo este evento deforma por medio de crenulaciones a las zonas de contacto y hornfels, lo cual determina con claridad su temporalidad superpuesta a la deformación D1. De igual manera en algunas maclas de plagioclasas se puede observar una deformación que rompe ligeramente, por lo tanto, es la evidencia que es un evento post-magmático del EPSD.

Todos los pliegues están asociados con planos de cizalla orientados NNW con características dúctil-frágil en zonas amplias que se extienden por kilómetros. Estos planos están asociados al lineamiento que se identificó en el puente y la zona de cizalla de Patambo al SW.

Las microtexturas de este evento se caracterizan por presentar los espectaculares micropliegues tipo kink band, así como microzonas de cizalla que rotan y en ocasiones recrystalizan los minerales del protolito en facies de esquistos verdes.



## 6.3 Petrografía

### 6.3.1 Complejo Arteaga

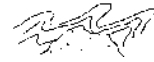
#### 6.3.1.1 Litarenitas de San Diego (LSD)

Esta unidad se comporta de manera diversa en el área de estudio, se puede observar deformada, metamorfozada en facies de esquistos verdes, con deformación heterogénea y desarrollo de foliación variable. El análisis microscópico permite observar una textura clástica heterogénea, grano sostenido equigranular y moderadamente bien clasificada (Figura 26 "X"). El contenido de material biogénico es escaso y no representa parte de la matriz. Sus componentes son representados por Líticos 40-60 % + Qz 30-40% + Kfs 15-20 % + Arcillas 6-10% ± Clinopiroxenos 1-2 % ± filosilicatos <1 %.

La forma de los líticos es subangulosos a subredondeado en matriz grano-sostenidos. Los clastos líticos muestran una procedencia de rocas graníticas, en menor proporción y de menor tamaño que los graníticos se observan algunos que podrían asociarse a rocas volcánicas. También se observan fragmentos de rocas metamórficas esquistosas y de gneises. En cuanto a porcentajes: graníticos > 50%; metamórficas ascienden entre 30-40 % y el resto se asigna para los volcánicos. El cuarzo con tamaño entre 0.05 a 0.55 mm con formas anhedrales e irregulares y extinción ondulante. Los feldespatos con tamaño entre 0.05 a 0.25 mm, presentan formas subhedrales a anhedrales; pueden presentar o no maclado.

Es común observar un cierto grado de foliación generalmente asociada al plegamiento observado en campo. En la porción sur, la foliación y el grado metamórfico aumenta exhibiendo una textura lepidoblástica con intercalación de filosilicatos. Se observa rotación de clastos, generando sombras de presión y crenulación esquistosa con intercrecimiento de moscovita y sericita paralela a la foliación, mientras que el cuarzo y los feldespatos están ligeramente rotados. Otro de los rasgos característicos que presentan estas secciones son el desarrollo de texturas tipo "kink band" con crenulaciones bien desarrolladas y acumulaciones de grafito en las zonas de charnela de los pliegues con ciclos repetitivos (figura 26 AC).

Finalmente, en la porción proximal a la localidad de Cuitzillo se identifica el desarrollo de un metamorfismo de contacto dentro de esta unidad. El análisis microscópico permitió identificar la asociación mineralógica con desarrollo de plagioclasa, cuarzo, biotita y andalucita (quiestolita) en una textura granoblástica foliada en una matriz de grano muy fino (arcilloso). Esta matriz está



asociada a los componentes de la roca esquistosa con planos de foliación evidentes en colores grises y negros.

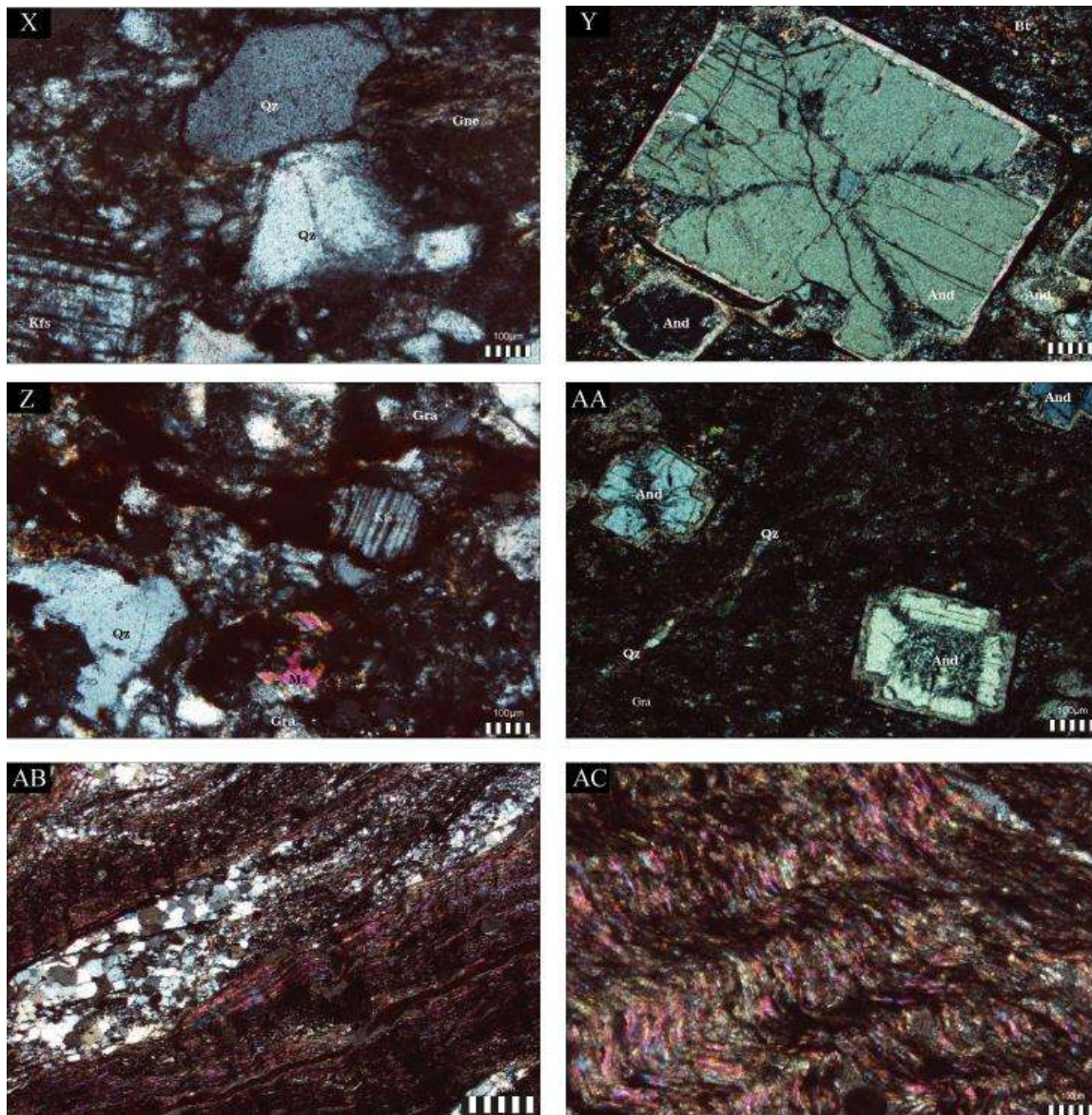
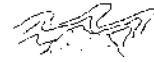


Figura 26: Fotomicrografías de Litarenitas de San Diego (LSD). X) vista general de la forma y contenido de los clastos en las areniscas; Z) filosilicatos y matriz arcillosa distribuida entre los contactos de los clastos; Y y AA) cristales de andalucita e inclusiones de grafito con la generación de asociación mineral Plg, Bt y Qz con fases menos desarrolladas; AB y AC) textura lepidoblástica y crenulación esquistosa, formadas por texturas “kink band” y grafito en la charnela.

### 6.3.1.2 Pillow-lavas El Puente (Formación Charapo)

Se refiere a una textura volcánica de tipo microlítico pilotáxica a intersertal de grano muy fino, con un importante proceso de recrystalización debida probablemente a metamorfismo en



condiciones de piso oceánico (ver resultados de geoquímica que muestran firmas tipo MORB), manteniendo su aspecto textural volcánico. Se compone por cristales de clinopiroxeno y plagioclasa intercrecidos en una matriz de tremolita-actinolita 70-90 % + clinopiroxeno 10-25% ± plagioclasa 4-10 % ± óxidos 5-7 %. La tremolita actinolita tiene forma de prismas alargados fibrosos a aciculares y crecimientos radiales, sus colores van de incoloro a verde claro, con birrefringencia alta a mancha de tipo leopardo, pleocróica y de colores que van de rojizo a azul, su relieve es alto con cristales de formas subhedrales en mayor proporción.

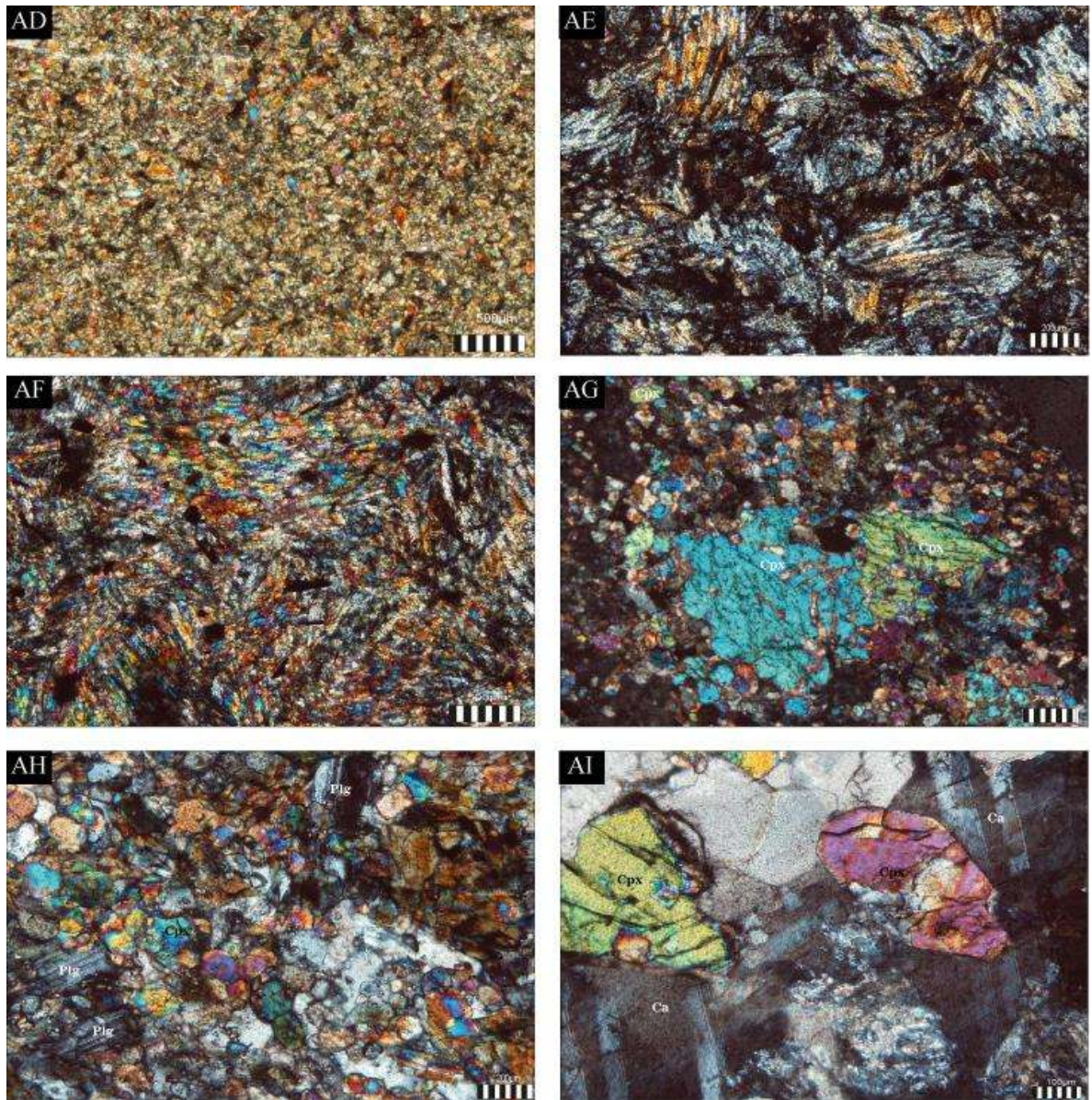
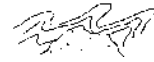


Figura 17: Fotomicrografías de las Pillow-lavas El Puente. AD) Textura general de tremolita-actinolita; AE y AF; texturas interstiales pilotaxíticas; AG) Cpx parcialmente remplazadas con tremolita-actinolita; AH) presencia de Plg entre los Cpx; AI) vetillas de Cpx y Ca.



Los piroxenos son prismáticos cortos euhedrales, de alto relieve, no tiene pleocroísmo con su crucero en dos direcciones semi ortogonales y de birrefringencia alta. Llegan a presentar alteración en sus bordes que se tornan difusos cuando se encuentran en vetillas y asociados a formas anhedrales. Son amarillentos, azules, naranja, rojizos y en ocasiones presentan maclas simples; es común su parcial reemplazamiento por actinolita. Las plagioclasas poseen formas subhedrales a anhedrales, con bordes que llegan a ser difusos y contactos indentados, presentan texturas poiquilíticas de cristales que no pudieron ser identificados debido a su tamaño reducido, presentan maclas tipo Carlsbad y polisintética. Se observa magnetita desarrollada en formas cúbicas.

Las vetillas son rellenas de clinopiroxenos y calcita. Otro de sus rasgos característicos son la presencia de glomérulos de piroxenos. La roca presenta formas de oxidación heterogénea, con un aspecto manchado por el desarrollo de minerales como hematita y goethita.

### **6.3.2 Ensamble Plutónico de San Diego**

#### **6.3.2.1 Unidad Granito - San Diego**

La Unidad Granito - San Diego presenta una textura hipidiomórfica, holocristalina inequigranular, con variaciones de tamaño de grueso, medio y fino, y para el caso de los accesorios y minerales de etapa tardía muy finos.

La asociación mineral principal es  $Kfs + Plg + Qz + Bt \pm Ms$ ; sin embargo, también se identificó la fase de anfíbol sin una clara relación textural. Los minerales accesorios son  $Zn \pm Ap \pm Ox$ ; minerales de alteración  $Cl \pm Ep \pm Ca$ .

La asociación principal usualmente presenta formas euhedrales a subhedrales, de contactos de equilibrio tipo puntos triple, redondeados. Sin embargo, es común que presenten texturas de deformación de recristalización dinámica de tipo indentados “bulging” y engolfamientos de mediana a corta amplitud (asociadas a Plg).

La plagioclasa muestra maclas de tipo polisintéticas Carlsbad y un leve porcentaje de enrejado. Suele presentarse zoneamiento en las Plg. Las texturas poiquilíticas son comunes entre los contactos de Kfs y Plg.

Las Bt presentan colores marrones a pardo, con variaciones de oscuro a claro, ocasionalmente contienen texturas de tipo “decussate” o entramado de cristales. Aparecen como cristales subhedrales a anhedrales en contactos triples y por crecimiento intersticial.

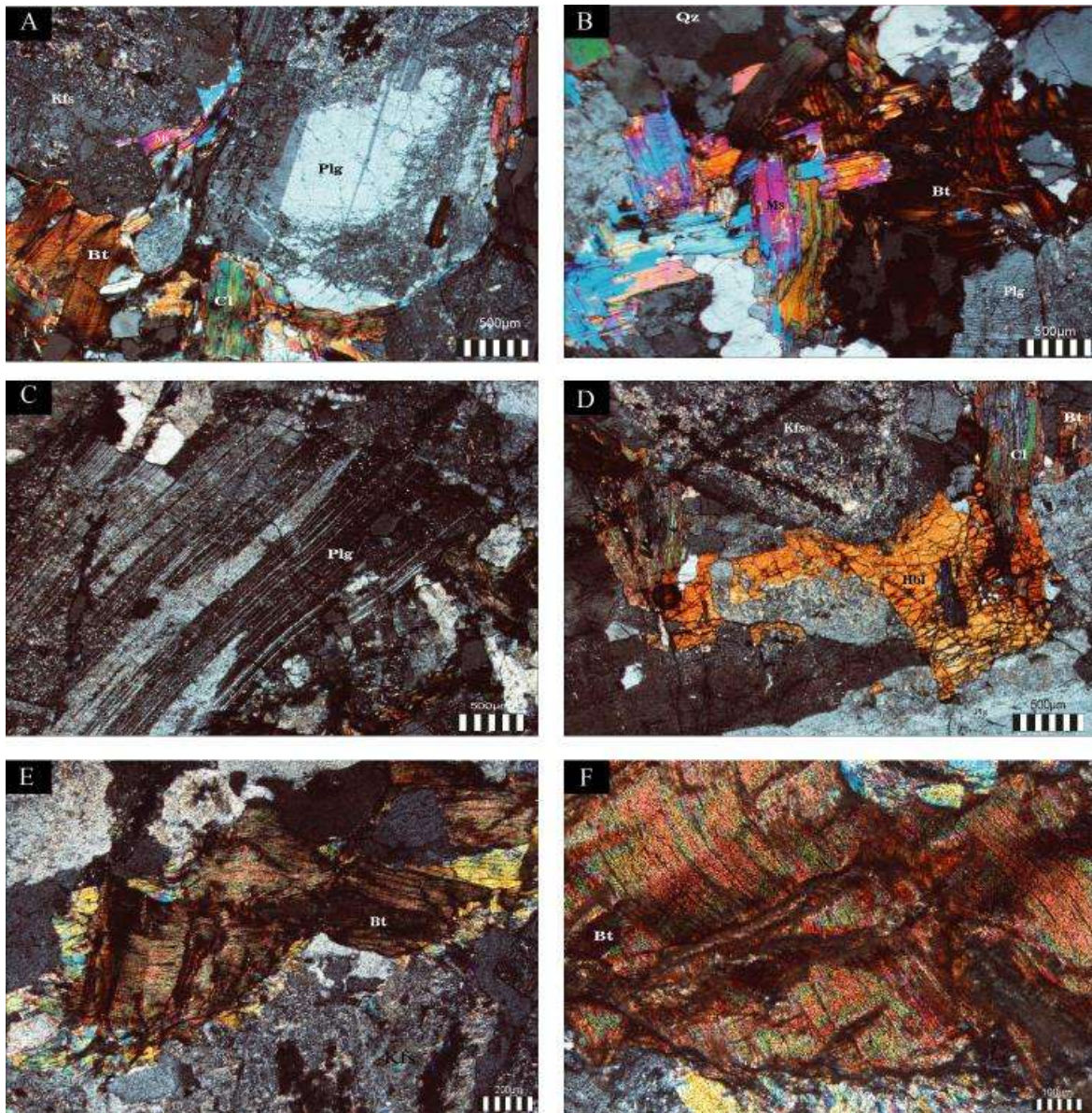
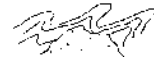
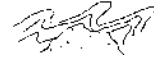


Figura 28: Fotomicrografías de la Unidad Granito San Diego: A) Asociación mineral principal de la UGSD; B) texturas tipo “decussate” conformada por Bt y Ms; C) desarrollo de flexión en maclas de Plg; D) cristal xenomorfo de anfíbol parcialmente reemplazado por Plg, Kfs y Bt; E y F) texturas tipo “kink band” en Bt.

El incremento de la Ms es notablemente mayor en su aproximación a las localidades del Puente y Las Juntitas, mientras que en los límites con la unidad Frontera se torna preponderante la biotita. La Ms es abundante en las cercanías de la localidad de San Diego. Una textura común del crecimiento contemporáneo de las micas Bt y Ms se caracteriza por presentarse intercrecimientos y lamelas de moscovita en la biotita.

El anfíbol solo se identificó en la localidad de Las Juntitas, en una muestra que está localizada en una serie de enclaves máficos difusos y de tamaños que alcanzan los 40 cm. El anfíbol presenta



una textura de aspecto esquelético, con bordes difusos y golfos de corrosión. Sus bordes también suelen ser remplazados por Plg y Bt. Se considera que el anfíbol no muestra relaciones de equilibrio claras y en ocasiones presenta formas de alteración y reemplazamiento tipo pseudomorfo.

Los minerales de alteración son  $Cl \pm Ep \pm Ca$ . Sus contenidos son variables. El mineral de alteración predominante es la Ser que afecta en gran medida a los Kfs, dándoles un aspecto turbio y ocasionalmente con menor intensidad a las Plg. La Cl genera cambios de coloración en las Bt asignando tonalidades rosa-verde tenue, mientras que la Ep crece de manera intersticial y asociada a la biotita.

Las evidencias texturales de deformación se relacionan con la recrystalización de subgranos, extinción ondulante, bordes de reacción en casi todos los minerales. Las texturas tipo “kink band” en las micas, en particular en las Bt y Ms.

La unidad de San Diego puede ser clasificada como un granito *sensu lato*.

#### **6.3.2.2 Unidad Tonalita - Frontera**

Esta unidad se caracteriza por presentar el mayor número de enclaves de la UDNS. El análisis microscópico permite observar una textura hipidiomórfica holocristalina inequigranular, con tamaños de grano que van de grueso, medio a fino y muy fino. Su asociación mineral es  $Plg + Qz + Bt, \pm Ms \pm Kfs$  con esporádico anfíbol; accesorios  $Zn + Ap + Ox$ ; alteración a  $Cl \pm Ep \pm Ca$ .

En sus distintas fases minerales conservan formas euhedrales, subhedrales a anhedrales mientras que sus contactos pueden ser irregulares formando uniones triples, los contornos aparecen indentados, tipo “bulging” o engolfamientos. En comparación con la unidad San Diego, el incremento de Plg al igual que su disminución en la proporción de Kfs son notables.

La plagioclasa presenta maclado con variaciones que van de tipo Carlsbad a polisintéticas bien desarrolladas. Puede presentar zoneamiento, así como texturas poiquilíticas con cristales de Bt. Se observa el crecimiento de plagioclasa tipo albita en los bordes y en formas lamelares asociados con la Ms.

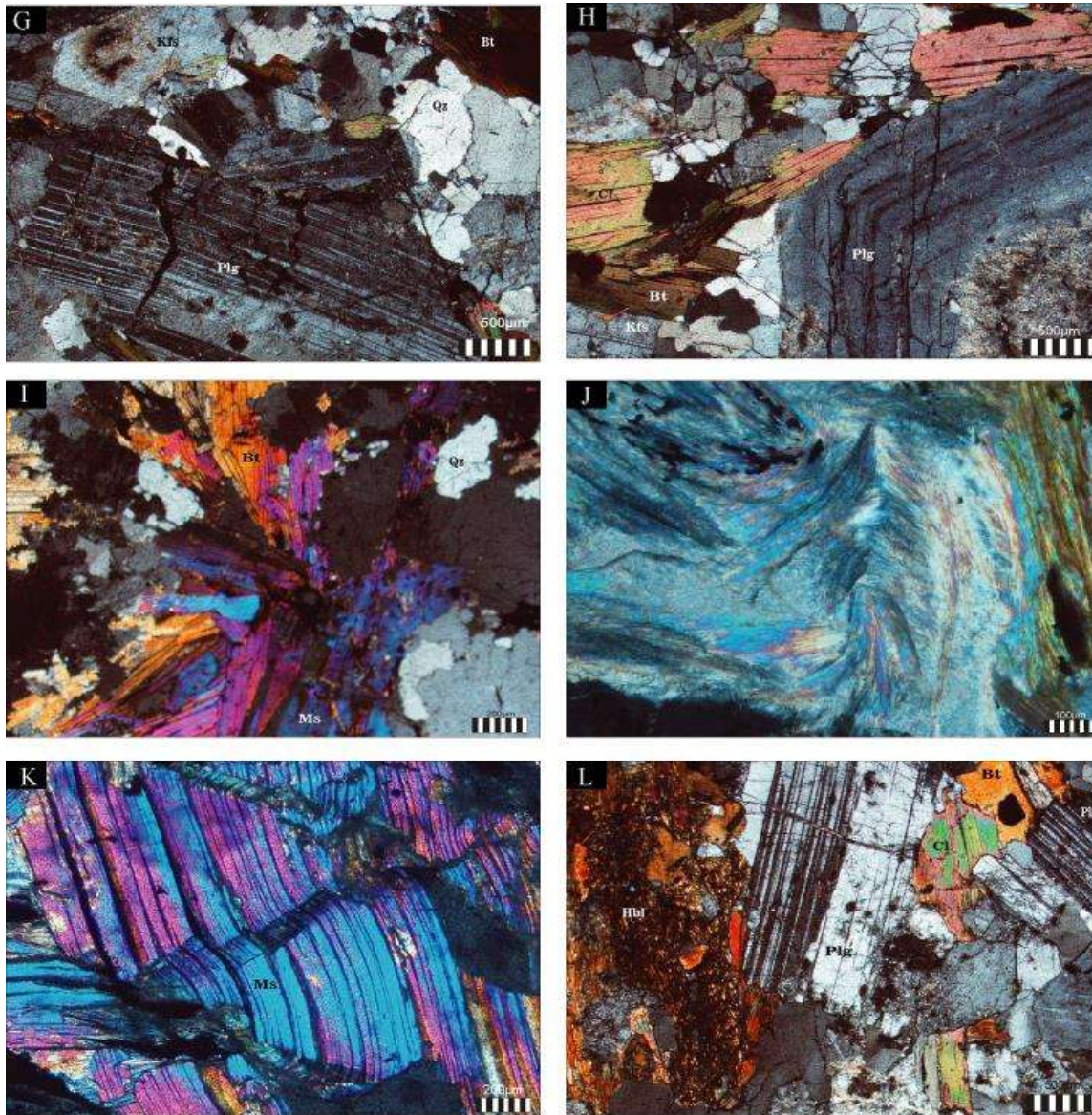
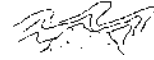
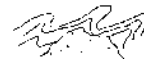


Figura 29: Fotomicrografías de la Unida Tonalita Frontera. G) fracturamiento con notable desplazamiento de las Plg; H) zoneamiento oscilatorio en fenocristales de Plg; I) texturas tipo “decussate” de Bt y Ms; J y K) desarrollo de texturas tipo “kink band” en Ms; L) xenocrystal de Anfíbol parcialmente remplazado por Plg (desarrollo de maclas típicas en ellas).

Las Bt es de tonalidades marrón y raramente café, de aspecto moteado y formando cristales subhedrales a anhedrales de tamaños dominantes en medios y finos en intersticios, lamelares o en texturas poiquilíticas. La Ms es visible en texturas tipo “decussate” (Figura 29 I) y con tamaños que pueden ir de finos a muy finos. En esta unidad se presenta un mayor contenido de Ms; en la porción central de la exposición del EPSD, mientras que hacia los bordes la presencia de ésta no es tan abundante. Las secciones delgadas con el mayor contenido de Ms son las cercanas a la localidad de El Coyol, mientras que en las que son cercanas a Frontera y El Real disminuye drásticamente en un 50%.



Las Anfíbol que se presentan de forma esporádica son de formas esqueléticas, regularmente de aspecto turbio en colores amarillos y parcialmente remplazados por Bt, ya sea en bordes de reacción como en su núcleo bajo forma de dislocación cristalina. Se considera como un mineral parcialmente asimilado y probablemente procedente de la unidad máfica.

Los minerales de alteración son la Ser, Cl, Ep y Ca, relacionados a alteración hidrotermal y deformación. La Ca únicamente crece en vetillas.

Las fases de deformación incluyen dos eventos, uno de deformación dúctil que está asociado a planos de foliación de micas, feldespatos, y cuarzo, así como a la sucesiva crenulación y texturas “kink band” que se distinguen perfectamente en las Ms, Bt y Qz presentes de manera constante en casi todas las secciones analizadas, con texturas representativas. El segundo evento de régimen frágil que genera rompimiento de algunos cristales de Plg (figura 29 G y L).

La abundancia de los minerales formadores permite clasificarla como tonalita.

#### **6.3.2.3 Unidad Granodiorita - Nocupétaro**

Esta unidad muestra una textura hipidiomórfica holocristalina inequigranular. Contiene variaciones en el tamaño de grano que incluyen grandes, medio y fino. La asociación mineral es Plg, Kfs, Qz, Bt  $\pm$  Ms; los minerales accesorios son Zn  $\pm$  Ap  $\pm$  Oxi. Los minerales de alteración son Cl  $\pm$  Ep  $\pm$  Oxi  $\pm$  Ca (Figura 30).

Los cristales de plagioclasa muestran maclas tipo Carlsbad y polisintéticas, escaso zoneamiento y tienden a ser subhedrales y anhedrales, con texturas de recristalización dinámica: indentados, “bulging” con engolfamientos. Se observan texturas poiquilíticas y pertíticas. El contenido de Kfs es notablemente inferior a la unidad San Diego, pero no tan escaso como la unidad Frontera, de tal forma que se ha considerado como un punto de transición entre estas dos unidades.

Las Bt son generalmente de colores claros, pocas veces colores oscuros y es poco frecuente un aspecto moteado, al igual que las texturas tipo “decussate” que están presentes en mezcla de colores oscuros y claros cercanos a las Ms.

Las alteraciones presentes son Ser + Cl  $\pm$  Ep. La mayor alteración se muestra en el Kfs con aspecto turbio. El desarrollo de la Ep + Cl se desarrolla en dislocaciones cristalinas y lamelas de la Bt y en microtexturas en forma de échelon.

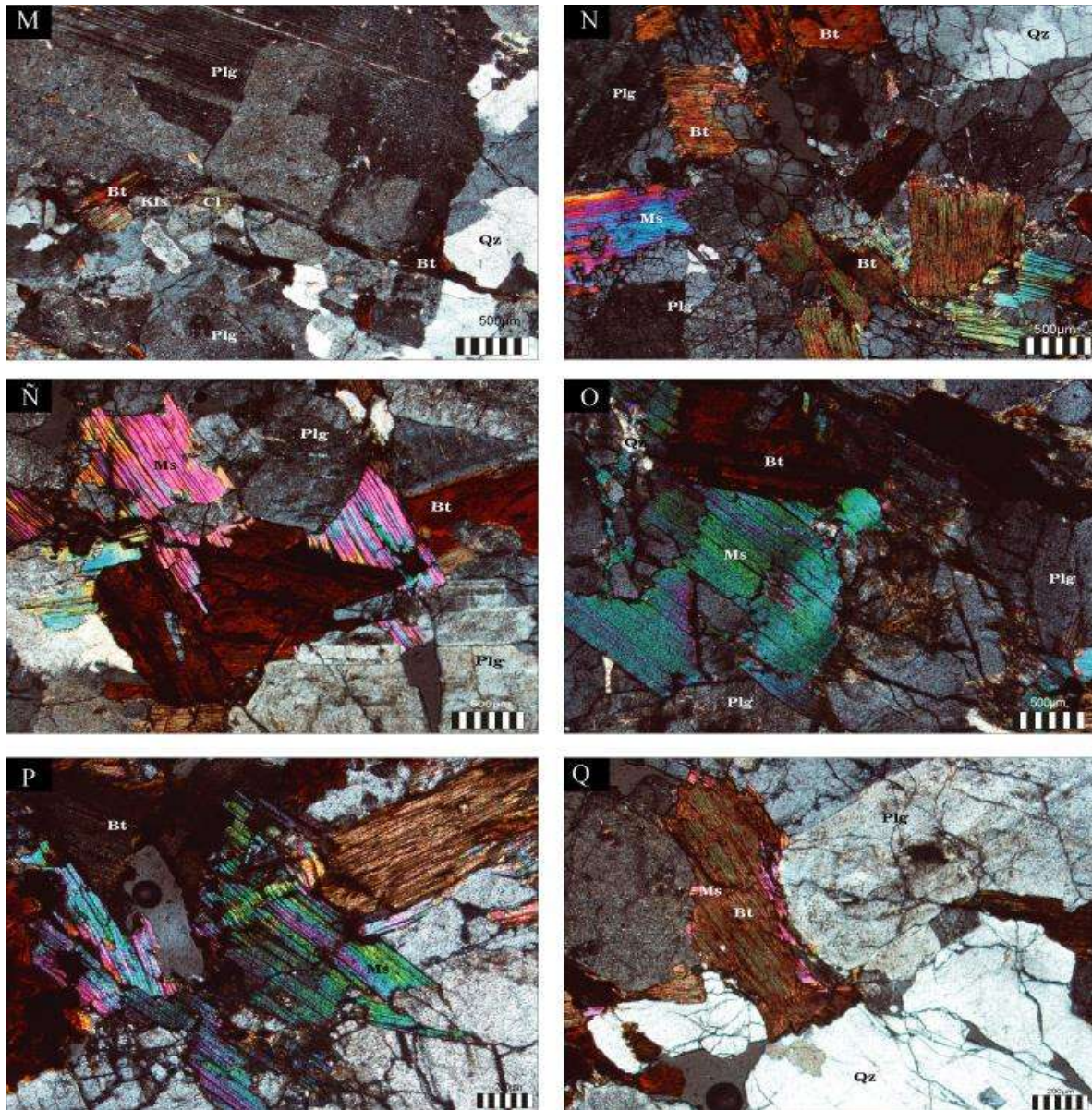
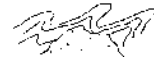
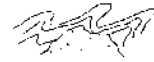


Figura 30: Fotomicrografías de la Unidad Granodiorita – Nocupétaro. M) texturas poiquilíticas y de tipo parches observada en Kfs con Plg maclada; N y Ñ) acumulación de micas con variaciones en los tonos de las Bt y Ms (formas esqueletales); O y P) texturas tipo “kink band” afectando de manera directa a las Ms, Bt y ocasionalmente a las Plg. Q) asociación mineral principal de esta unidad.

Las texturas de deformación como en las otras unidades se refieren a foliación, crenulación y recrystalización dinámica en los feldespatos y cuarzo.

La abundancia de la asociación mineral Plg y Qz; Plg, Kfs, Bt  $\pm$  Ms y la textura le clasifican como una granodiorita.



#### 6.3.2.4 Unidad de Diorita-Norita “El Salitre”

La Unidad de Diorita-Norita “El Salitre” presenta texturas hipidiomórficas a alotriomórficas holocristalinas e inequigranulares, los tamaños de grano son variables y pueden presentarse de grano medio, fino y muy fino (Figura 31). Por su naturaleza híbrida, en esta unidad se lograron identificar dos asociaciones minerales una predominantemente máfica (asociación1) y una félsica (asociación2). Las variaciones de los tamaños se relacionan principalmente al incremento y predominio de las Plg. La asociación máfica está constituida por Plg 33-40% + Cpx 15-30% + Anfíbol 17-30% ± Oxi 2-10% ± Zn 1-3% asociada con Plg mostrando una clara foliación magmática (la localidad de El Pílon al norte de Frontera de San Juan). Los minerales de alteración son Ser ± Ca.

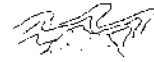
La asociación máfica tiende a ser subhedral a anhedral, debido a una evidente deformación por lo que sus contactos son irregulares, indentados y con bordes de reacción. Es común la presencia de texturas cumulares en los Cpx con evidentes bordes de reacción a Anfíbol. La plagioclasa es maclada pero generalmente deformada con zonas de recristalización a albita y cuarzo. Los Zr presentes de esta asociación tienden a ser redondeados y corroídos, como xenocristales con bordes de reacción.

La segunda asociación félsica se caracteriza por un predominio de una Plg2 de composición oligoclasa-albita y la Bt desarrollando formas subhedrales, de tamaños variables, distribuidas desde grano medio a muy fino. Sus contactos suelen ser heterogéneos, dependiendo de su posición textural: como borde de reacción o en zonas con textura poligonal.

Las Plg2 están generalmente bien desarrolladas y presentan maclas tipo albita, periclina y en menor proporción Carlsbad.

Las Bt presentan variaciones en los tonos marrón y pardo, pueden ser tonos oscuros o ligeramente tenues; es común observar intercrecimiento de una fase de Ep en los intersticios.

La deformación es poco definida, sin embargo, se han distinguido estructuras de deformación en los filosilicatos y en el cuarzo, formando estructuras tipo “kink band” que presentan continuidad siguiendo los planos de deformación. Estas estructuras no son tan notables como las que se identificaron en las unidades graníticas, pero son significativas. Cabe mencionar que la mayor deformación o estructuras más competentes se han identificado en la porción de El Coyol y cercanas a El Real. La alteración está determinada principalmente por ser afectando de manera heterogénea



a las Plg. El emplazamiento de Ca está asociada a zonas de vetillas rellenas de este mineral y en algunas ocasiones se presenta Ep y Cl rellendo cavidades.

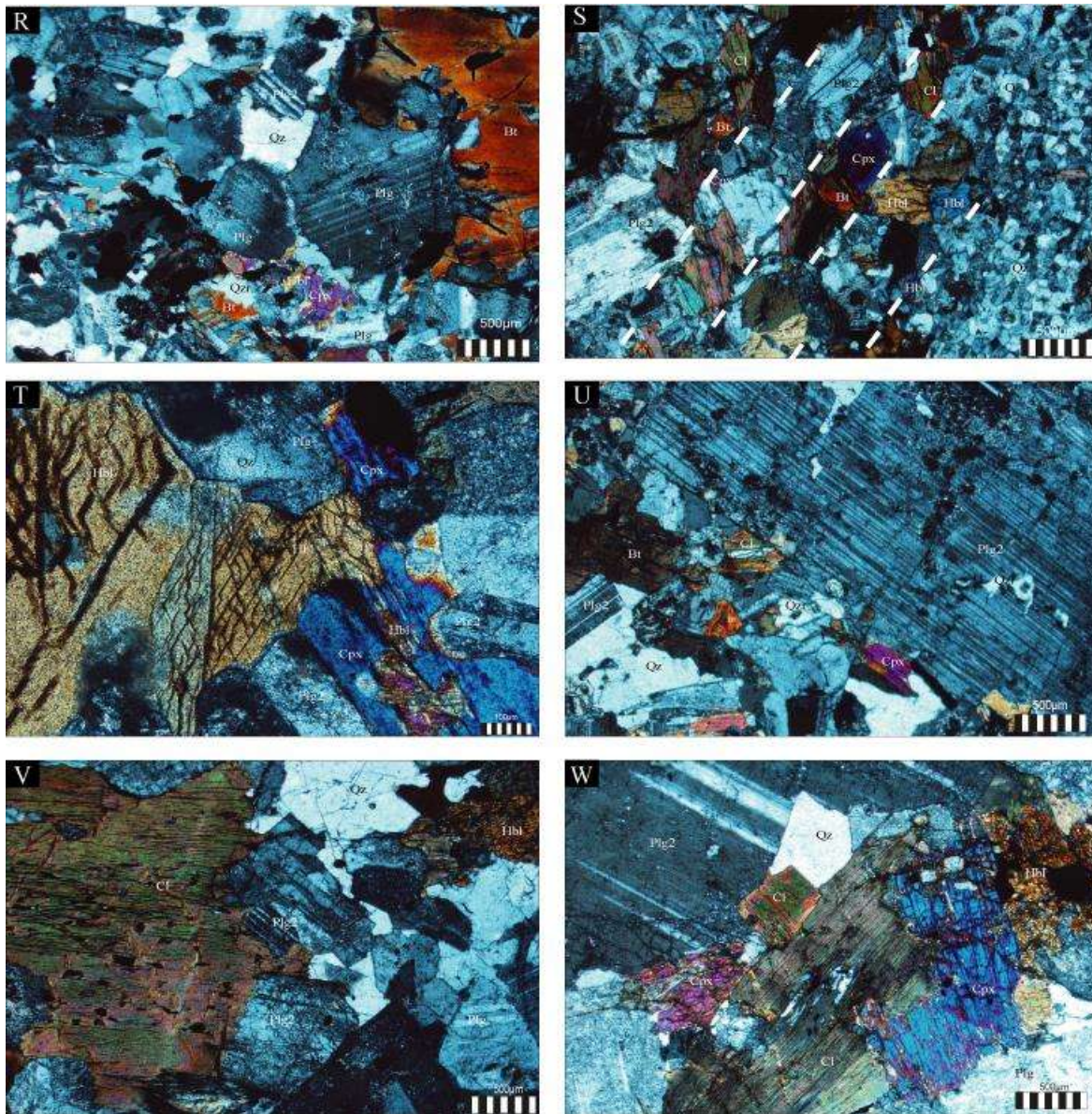
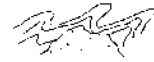


Figura 31: Fotomicrografías de la Unidad de Norita-Diorita "El Salitre". R) Asociaciones minerales donde se puede apreciar a minerales de la fase 2 reemplazar parcialmente a minerales de fase 1; S) foliación magmática determinada por minerales máficos de asociación 1; T y W) remplazamiento de Anfíbol y Cpx por Plg 2 con bordes difusos; U) recrystalización de Qz en fenocristal de Plg2; V) texturas tipo "kink band" en Cl.

La clasificación de la asociación máfica es tendencialmente orientada al campo de las dioritas-noritas-gabronoritas, esto en base a su alto contenido de Plg y Cpx por un bajo contenido de Anfíbol. Mientras que la asociación 2 se determina como granodiorita.



#### 6.3.2.5 Diques-Dioríticos Tardomagmáticos

Se analizaron 3 muestras correspondientes a esta unidad, en ellas se puede observar una textura microlítica traquítica a porfídica. Su matriz está compuesta por Plg, Anfíbol y relictos de Cpx (fase tremonita-actinolita). El contenido de los fenocristales es variable (5-10 %) correspondientes a Anfíbol con tamaños 2 a 3 veces mayores que la matriz. El porcentaje de las Anfíbol corresponde a 30-40 % contemplando minerales de matriz y fenocristales, el resto corresponde a Plg 40-50% y 10-15 % de Cpx.

Los cristales de Anfíbol se caracterizan por un desarrollo de formas subhedrales, texturas poiquilíticas con intercrecimiento de Plg, con bordes corroídos, alterados y bordeados por óxidos.

Las Plg son subhedrales, con formas tabulares, generalmente actinolitizadas. Es común el desarrollo de maclas tipo Carlsbad-albita, así como su orientación preferencial debido al flujo magmático. En la localidad de Las Juntitas, las Plg son más pequeñas en comparación con las que afloran en la localidad de El Divisadero donde su tamaño supera el 25% que las primeras.

Los Cpx forman parte de la matriz y ocasionalmente son subhedrales con bordes de reacción de óxido o alterados (actinolitizados).

En la localidad de Las Juntitas (Figura 32 AI y AH) es posible observar el desarrollo de minerales de alteración como calcita, clorita, óxidos de hierro (férricos) y en ocasiones epidota. Esta última asociada a cavidades generadas en la roca mientras que en las zonas de contacto es común observar la asimilación parcial de los Kfs y Plg. Con la variación litológica se logra observar un incremento notable en el desarrollo de Ca y Cl; su abundancia aumenta hacia la litología granítica, mientras que hacia el dique es menos abundante.

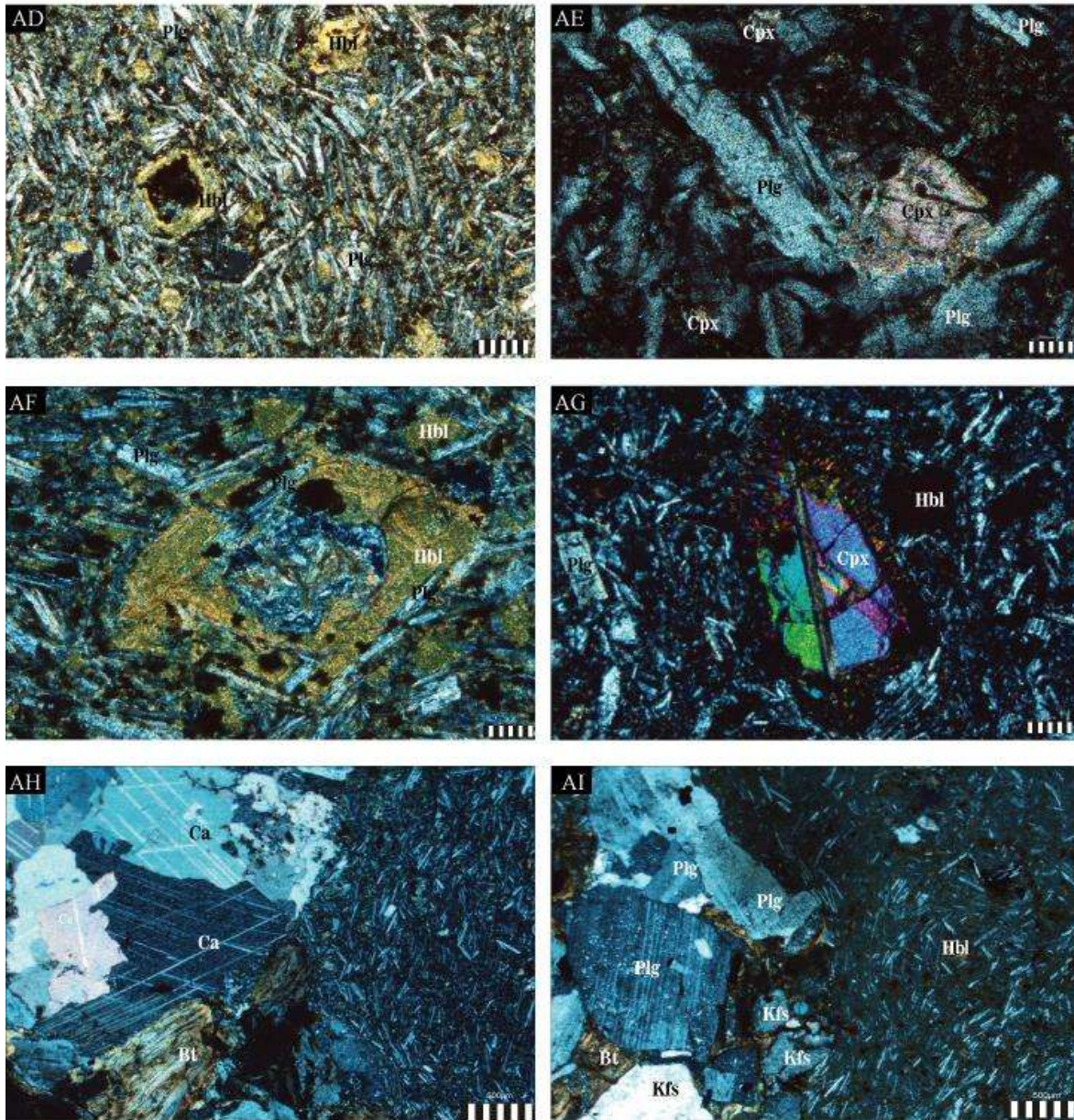
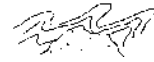


Figura 32: Fotomicrografías de diques dioríticos tardomagmáticos. AD y AF) fenocristales de anfíbol con texturas poiquilíticas inmersos en una textura microlítica traquítica porfídica; AE y AG) cristales de Cpx xenomorfos con bordes parcialmente asimilados y recrystalizados; AH y AI) contacto con el EPD.



## 6.4 Geoquímica

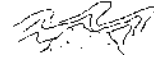
Se presenta el resultado de un total de 21 muestras analizadas por elementos mayores y traza. De estas, 18 corresponden al EPSD; 13 de ellas de unidades félsicas y cuatro a la UDNS (máfica), una perteneciente al dique, dos de las PLP y una de la LSD. En la tabla 2 se presentan los datos obtenidos, los cuales fueron agrupados de acuerdo a su unidad geológica. Con fines de comparación, en los diagramas geoquímicos de incluyen los valores de las areniscas y la pillow lava de San Diego.

### 6.4.1 Elementos mayores

| Unidades                     | Clave de muestra  | SiO2              | TiO2   | Al2O3  | FeO    | MnO   | MgO   | CaO    | Na2O  | K2O   | P2O5  | PXC   | SUMA    |         |
|------------------------------|-------------------|-------------------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
| LSD                          | CSD01_arenisca    | 82.274            | 0.591  | 10.175 | 1.461  | 0.002 | 0.217 | 0.07   | 1.934 | 1.139 | 0.047 | 2.09  | 100     |         |
| PLP                          | CSD03_PillowR     | 45.344            | 0.903  | 15.632 | 12.648 | 0.19  | 7.447 | 14.138 | 1.886 | 0.385 | 0.068 | 1.36  | 100.001 |         |
|                              | CSD04_PillowP     | 43.409            | 1.437  | 13.428 | 12.727 | 0.169 | 7.51  | 16.441 | 2.248 | 0.342 | 0.128 | 2.16  | 99.999  |         |
| E<br><br>P<br><br>S<br><br>D | SD                | CSD02_SDPuenteA   | 68.395 | 0.591  | 15.917 | 3.87  | 0.051 | 1.491  | 2.635 | 3.542 | 2.033 | 0.055 | 1.42    | 100     |
|                              |                   | CSD02_SDPuenteB   | 68.192 | 0.621  | 16.13  | 4.094 | 0.051 | 1.562  | 2.62  | 3.375 | 1.985 | 0.06  | 1.31    | 100     |
|                              |                   | CSD-30_Estancia   | 65.305 | 0.631  | 15.827 | 4.14  | 0.058 | 2.231  | 1.878 | 3.875 | 2.658 | 0.128 | 3.27    | 100.001 |
|                              |                   | CSD31_Juntitas    | 65.057 | 0.759  | 16.786 | 4.466 | 0.055 | 1.842  | 2.403 | 3.265 | 3.044 | 0.214 | 2.11    | 100.001 |
|                              | FT                | CSD21_Pilon       | 60.185 | 0.956  | 17.871 | 5.486 | 0.083 | 3.269  | 5.146 | 3.377 | 1.562 | 0.194 | 1.87    | 99.999  |
|                              |                   | CSD22_Pilon2      | 59.82  | 0.769  | 16.278 | 5.726 | 0.062 | 4.716  | 4.752 | 3.007 | 1.276 | 0.134 | 3.46    | 100     |
|                              | NP                | CSD42_potrerillos | 62.146 | 0.802  | 17.369 | 4.838 | 0.063 | 2.416  | 4.734 | 3.332 | 2.068 | 0.152 | 2.08    | 100     |
|                              |                   | CSD11_capilla     | 70.627 | 0.342  | 15.632 | 2.043 | 0.028 | 0.938  | 1.205 | 3.856 | 3.699 | 0.12  | 1.51    | 100     |
|                              |                   | CSD12_Patambo     | 64.23  | 0.69   | 15.52  | 5.1   | 0.06  | 3.04   | 3.47  | 3.34  | 2.81  | 0.17  | 1       | 99.43   |
|                              |                   | CSD13_Snico       | 67.505 | 0.627  | 16.758 | 3.434 | 0.02  | 1.22   | 2.447 | 3.484 | 2.578 | 0.207 | 1.72    | 100     |
|                              | D                 | CSD13B_veta       | 66.326 | 0.68   | 15.403 | 3.906 | 0.059 | 2.508  | 2.542 | 3.622 | 3.035 | 0.149 | 1.77    | 100     |
|                              |                   | Mi-14 Patámbo     | 64.23  | 0.69   | 15.52  | 5.1   | 0.06  | 3.04   | 3.47  | 3.34  | 2.81  | 0.17  | 1.26    | 99.69   |
| CSD15_Caracuaro              |                   | 67.312            | 0.498  | 16.695 | 3.318  | 0.034 | 0.756 | 2.768  | 3.756 | 2.814 | 0.159 | 1.89  | 100     |         |
| UDNS                         |                   | CSD18_Zapote      | 53.411 | 1.308  | 19.149 | 8.034 | 0.124 | 5.111  | 7.298 | 3.074 | 0.995 | 0.237 | 1.26    | 100.001 |
|                              | CSD20_Sjuan       | 50.803            | 1.063  | 20.109 | 7.581  | 0.106 | 5.801 | 7.513  | 2.995 | 1.48  | 0.22  | 2.33  | 100.001 |         |
|                              | CSD40_Salto       | 56.781            | 0.981  | 19.312 | 6.726  | 0.091 | 3.42  | 5.584  | 3.768 | 1.532 | 0.237 | 1.57  | 100.002 |         |
|                              | CSD45_Coyol_Ga    | 53.804            | 1.259  | 17.35  | 7.946  | 0.165 | 5.716 | 6.901  | 3.423 | 1.309 | 0.196 | 1.93  | 99.999  |         |
| Dique                        | CDS33_Juntitas Di | 50.805            | 1.587  | 16.682 | 8.677  | 0.142 | 5.16  | 4.041  | 5.046 | 1.599 | 0.501 | 5.76  | 100     |         |

Tabla 2: Elementos mayores y traza del EPSD y las unidades de roca encajonante descritas como: LSD (Litarenitas San Diego) y PLP (Pillow Lavas el Puente).

Los diagramas binarios tipo Harker (figura 33) permiten observar que las concentraciones más bajas de SiO<sub>2</sub> que corresponden a la unidad Frontera (FT) con valores de 59.8-62.1 wt% y en las más altas a las unidades de San Diego (SD) y Nocupétaro (NP) el rango oscila entre los 64.2-70.6 wt%. Los valores de sílice en la UDNS, van de 50.8 wt% a 56.7 wt%. Las LSD alcanzan valores de 82.2 wt% y las PLP rondan los 43.4-45.3 wt%. Las unidades del EPSD muestran rangos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que van de 15.4-17.8 wt% y los valores más altos distribuidos en la UDNS entre 17.3 y 20.1 wt%. Las PLP tienen valores de 13.4 y 15.6 wt% y las LSD 10.1 wt%. Las mayores concentraciones de CaO (5.5-7.5 wt%) corresponden a la UDNS, resultando inversamente proporcional al contenido de SiO<sub>2</sub>, mientras que para las unidades félsicas los porcentajes son bajos, excepto en la unidad FT (4.7-5.1 wt%). El K<sub>2</sub>O tiene un comportamiento opuesto al del CaO, reuniendo los valores altos en NP y SD (1.9-3.6



wt%) y la unidad FT se agrupa con la UDNS (0.9-2 wt%). Por su parte, el  $\text{Na}_2\text{O}$  se concentra de manera homogénea para las unidades del EPSD y la UDNS dentro del rango de 2.9-3.8 wt%.

Los contenidos de  $\text{FeO}_t$  y  $\text{MgO}$  resultan inversamente proporcionales al porcentaje de  $\text{SiO}_2$ . La UDNS tiene valores de  $\text{FeO}_t$  entre 7.5-8 wt% y sólo una muestra con valores de 6.7 wt%, el dique 8.6 wt% y las PLP 12.6 y 12.7 wt%. El EPSD es ligeramente heterogéneo, pero permite apreciar cierta tendencia en concordancia con su composición félsica y granítica, siendo la unidad FT la de valores más altos en el porcentaje de  $\text{FeO}$  (4.8-5.8 wt%) seguido de la unidad SD con poca variación (3.8-4.4 wt%) y la unidad NP es la que cuenta con los porcentajes más variables con rangos de 2.0-5.1 wt%. El  $\text{MgO}$  muestra un comportamiento heterogéneo en todas las unidades, solo la UDNS agrupa 3 muestras de 5.1-5.8 wt% y una aislada con 3.4 wt%. El dique exhibe un valor de 5.1 wt% y las PLP 7.4 wt% y 7.5 wt%. El EPSD tiene dispersión en sus valores y sólo la unidad SD agrupa rangos de 1.4-2.2 wt%. Por su parte, las unidades NP y FT tienen tendencia inversamente proporcional al  $\text{SiO}_2$ , pero valores muy dispersos (0.7-3 wt% y 2.4-4.7 wt%, respectivamente).

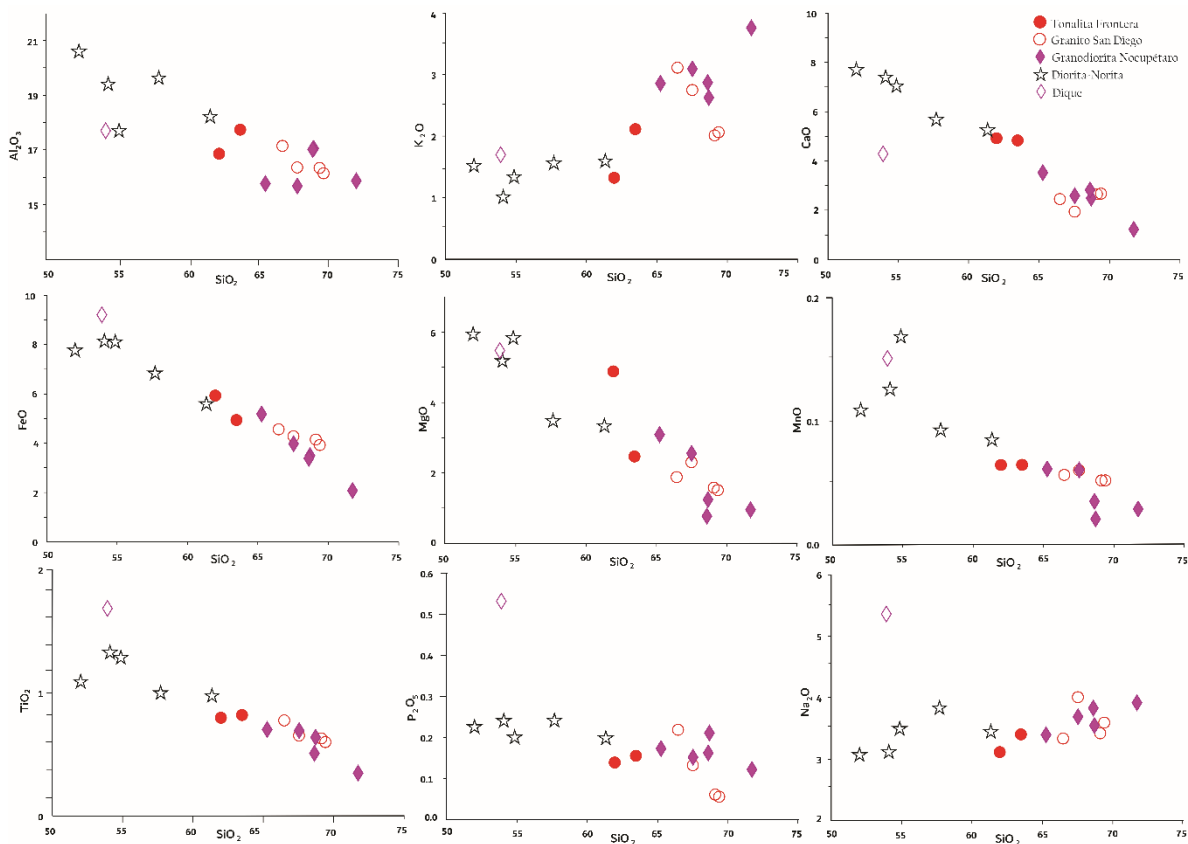
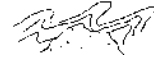


Figura 33: Diagramas tipo Harker del EPSD. La simbología está agrupada por las unidades descritas del EPSD.



En el diagrama TAS para rocas plutónicas, modificado por Wilson (1989), en la figura 34 se grafican los valores  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (álcalis) contra  $\text{SiO}_2$  (sílice) donde se puede observar una distribución del EPSD. Las muestras de FT grafican dentro del campo de las dioritas y las granodioritas, la unidad SD se distribuye en la línea de las granodioritas con transición a granito, y finalmente, la unidad NP grafica en el campo de la granodiorita con la mayoría de sus muestras en la transición a granito y una muestra bien establecida en el campo de los granitos. La UDNS grafica en el campo de los gabros-dioritas con una muestra en las dioritas, en consonancia con la descripción petrográfica. Considerando el diagrama TAS de rocas volcánicas las muestras de PLP grafican en el campo de los basaltos. De acuerdo con la curva de álcalis de Miyashiro (1978), las muestras yacen dentro de la afinidad subalcalina y solamente el dique lo hace en el campo de afinidad alcalina.

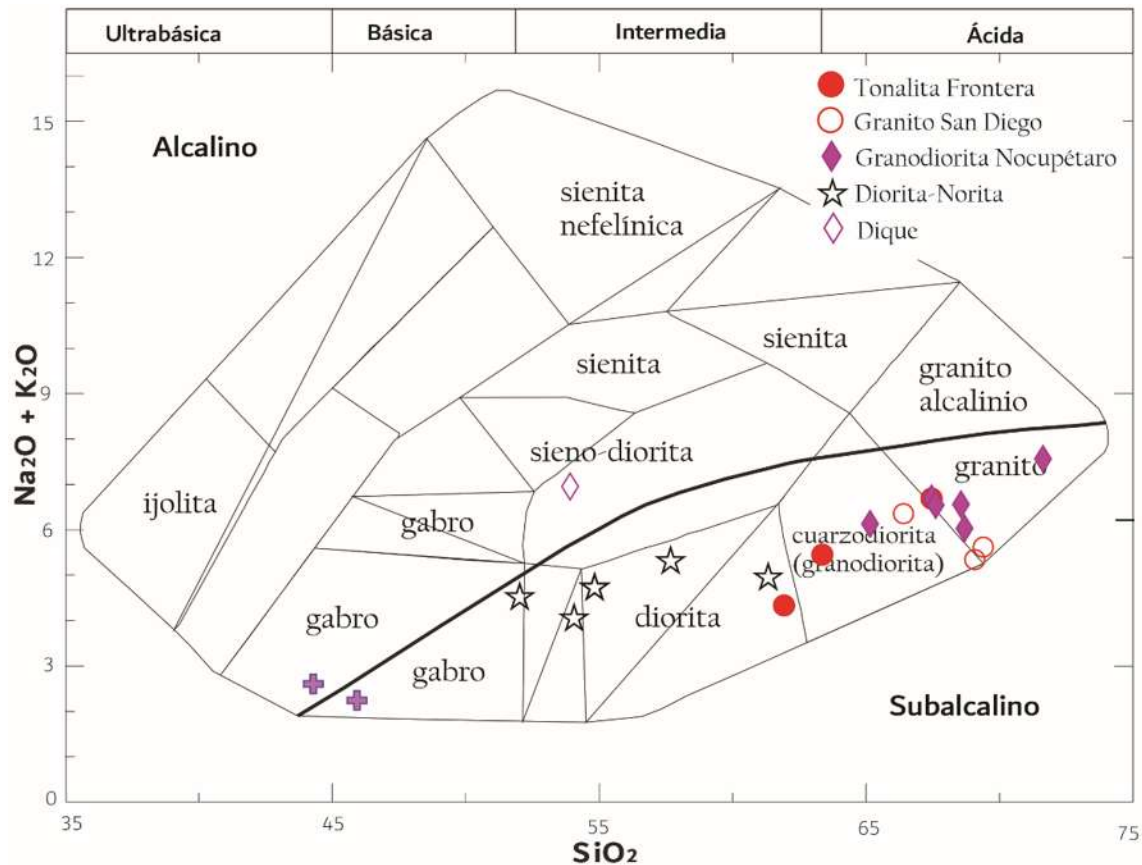


Figura 34: Diagrama de clasificación TAS para rocas plutónicas, Wilson (1989). La simbología está agrupada por las unidades descritas del EPSD

Al graficar los datos en el diagrama AFM de Irvine y Baragan (1971) (figura 35), considerando la relación  $\text{FeO}^*$ -álcalis-MgO para determinar la serie magmática toleítica vs calciocalina, se puede



observar una tendencia paralela a la curva de transición de firmas, con una tendencia en aumento de álcalis y enriquecimiento de MgO con respecto al FeO\*. Las firmas se concentran por completo en el campo de los magmas calcialcalinos, agrupando las muestras del EPSD con enriquecimiento en álcalis y un ligero incremento de FeO\* para la UDNS. Solamente dos de las muestras graficadas corresponden al campo toleítico, las cuales pertenecen al grupo de las pillow-lavas que, como se ha mencionado, derivan de la formación Charapo.

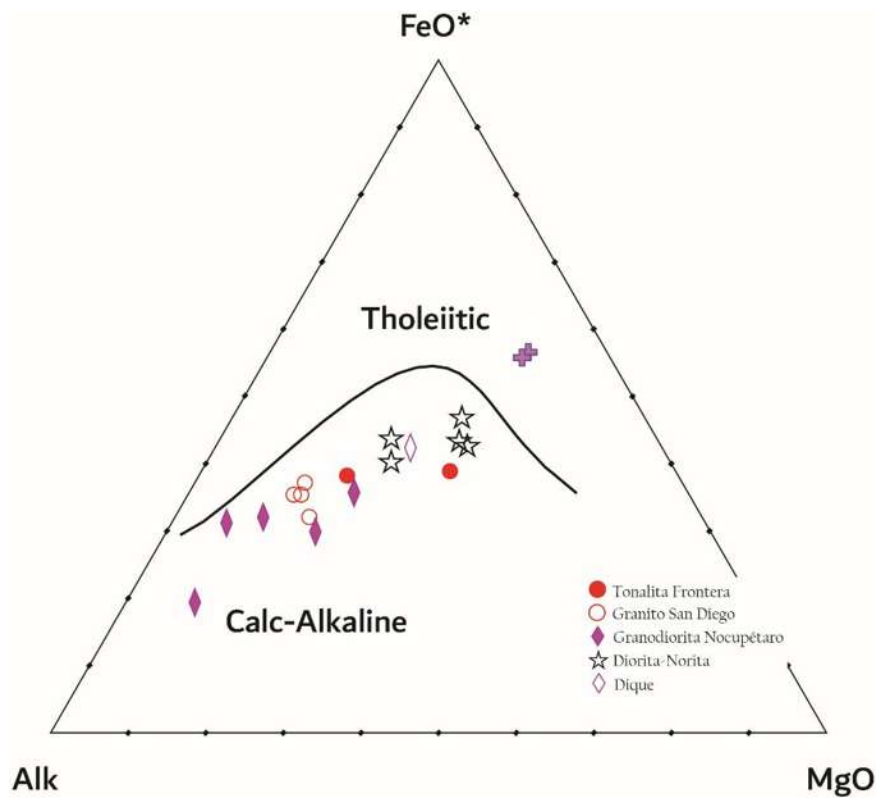


Figura 35: Diagrama para serie magmática de Irvine y Baragan (1971) con el grafico de las muestras correspondientes al área de estudio.

En la figura 36, se presenta el diagrama de clasificación de los magmas peraluminosos-metaluminosos (Maniar & Piccoli, 1989) basado en el índice de saturación de alúmina (índice de Shand), considerando la relación  $Al/(Na+K)$  vs  $Al/(Ca+Na+K)$ . Se puede observar que todas las muestras presentan valores de ASI >1 concentrados en los rangos 1.1 -1.5 indican un peraluminoso.

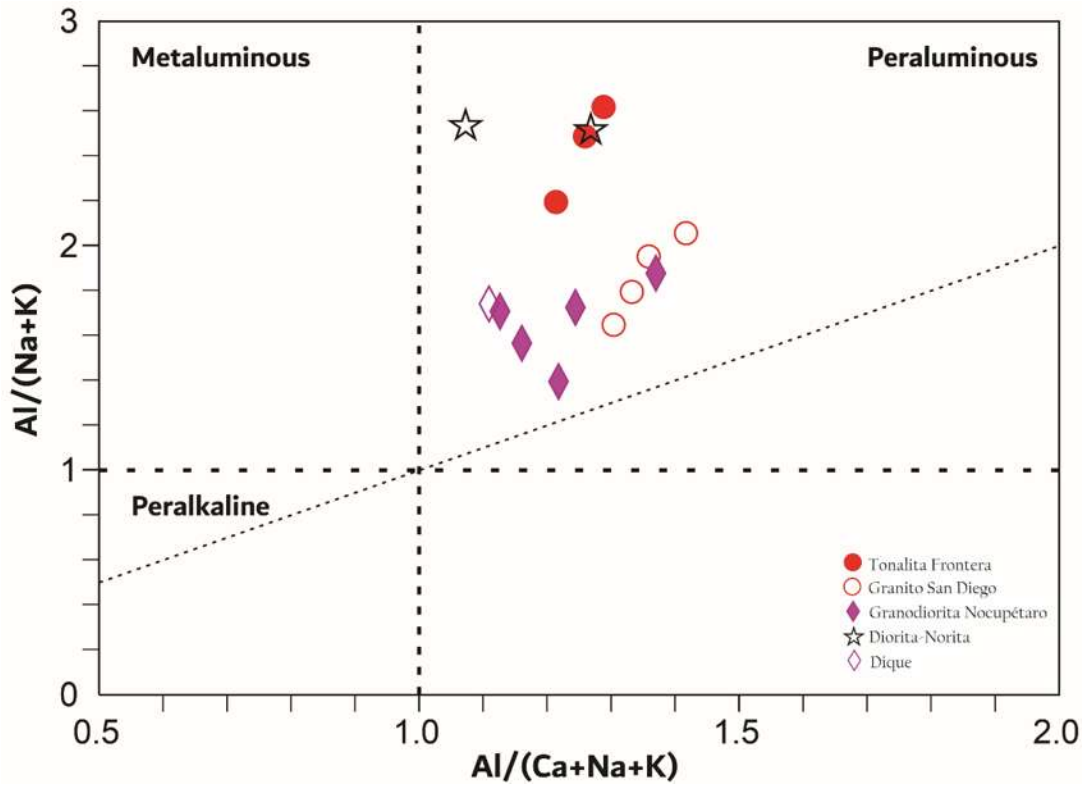
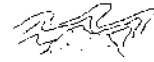


Figura 36: Diagrama de índice de saturación de alúmina de Shand's (Maniar-Piccoli 1989), las muestras presentes corresponden al EPSD y la UDNS. Valores  $>1$  considerados como campo peraluminoso y valores  $<1$  correspondientes al campo metaluminoso en la relación  $Al/(Ca+Na+K)$ .

Considerando que debido a las texturas de deformación asociadas a recristalización dinámica y desarrollo de cuarzo y reducción de grano principalmente de los feldespatos, no se realizó un análisis modal o de conteo de puntos. Sin embargo, para realizar una clasificación normativa de An-Ab-Or de las unidades de EPSD y la UDNS se utilizó el diagrama ternario normativo de Barker (1979) (figura 37). En este diagrama podemos observar una concentración de las UDNS en el campo de las tonalitas, al igual que la unidad FT que resulta congruente con las observaciones petrográficas. La composición de las unidades SD y NP concentran la mayoría de las muestras en el campo de las granodioritas, con una ligera cercanía a los límites del campo tonalítico para la unidad SD y una de sus muestras en el límite de los granitos-trondhjemitita. La unidad NP se clasifica con una muestra en el campo de los granitos y el resto de muestras cercanas a la transición granodiorita-granito.

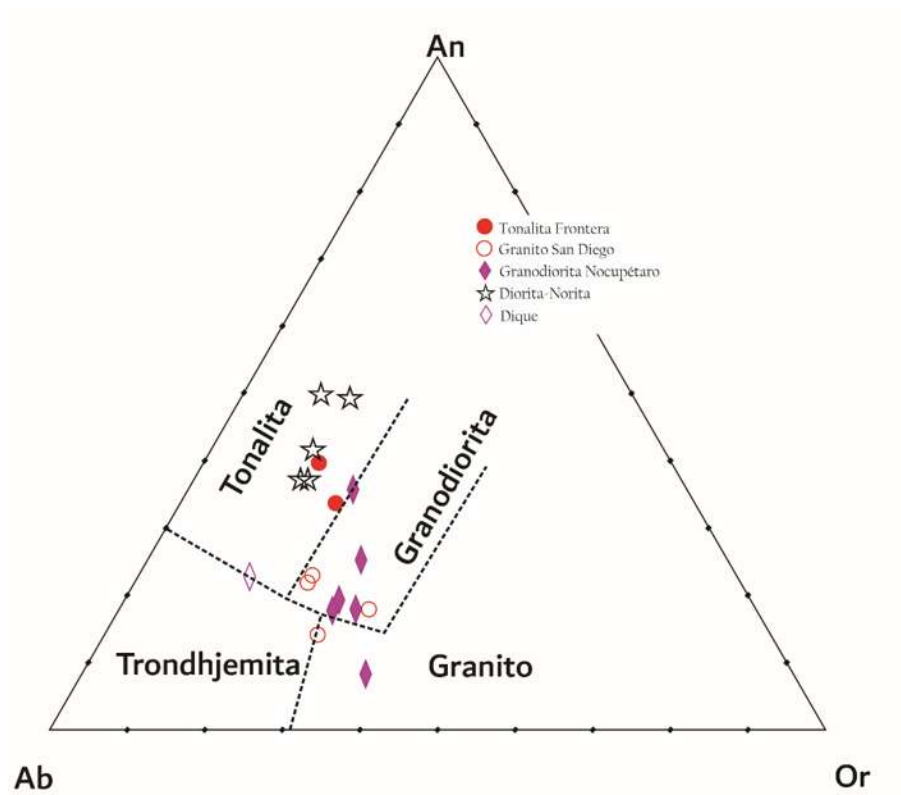


Figura 37: Diagrama ternario de clasificación normativa de Barker (1979) Ab-An-Or.

#### 6.4.2 Elementos Traza

Al graficar los elementos traza incluidas las tierras raras (REE) en el diagrama de Sun y McDonough (1989) normalizado con N-MORB (figura 38), se puede apreciar un comportamiento homogéneo en las muestras del EPSD, la UDNS y el dique con un enriquecimiento de los elementos LILE con respecto a los HFSE. Se pueden observar ligeras anomalías positivas de K y Pb, al igual que anomalías negativas poco marcadas de Th y Nb, con unas muy marcadas de P y Ti. Estas tendencias pueden estar relacionadas con un ambiente de arco volcánico.

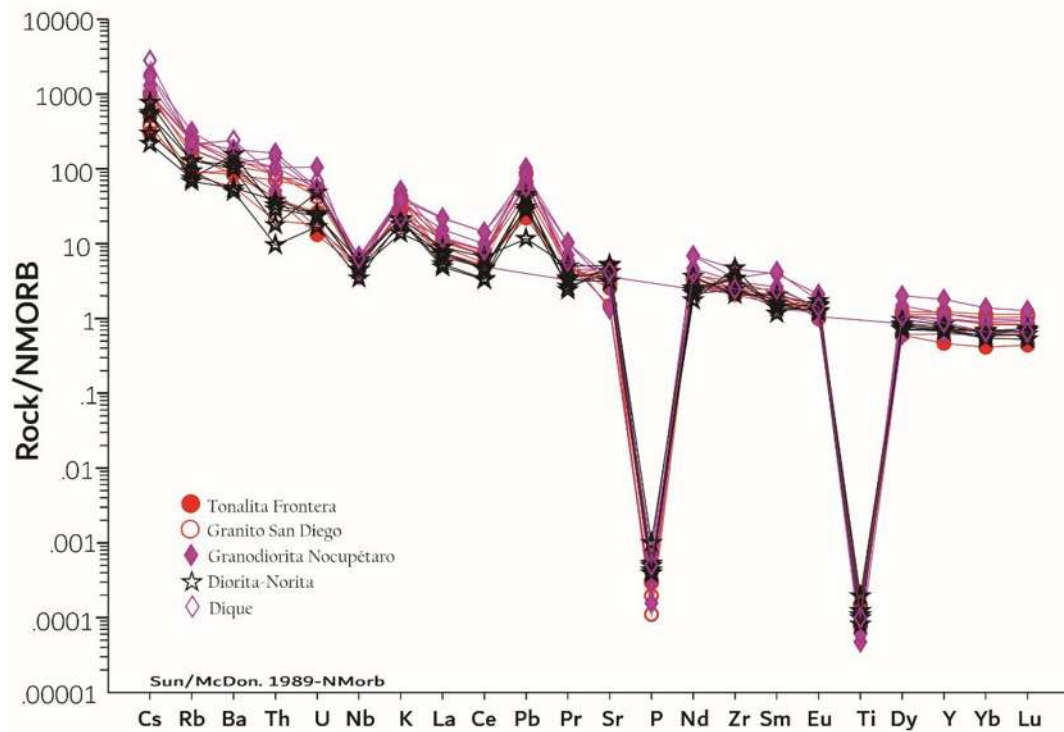


Figura 38: Diagrama multielemental, normalizado con N-MORB (Sun y McDonough 1989) graficadas las muestras del EPSD y la UDNS.

En cuanto a los diagramas multielementales de tierras raras normalizados con condritas de Sun y McDonough (1989; figura 39 a), es posible observar un enriquecimiento de los LREE respecto a los HREE que siguen una tendencia casi horizontal. Esta tendencia es bien definida en todas las unidades félsicas y máficos sin diferencias notables, aún en el dique. La unidad NP muestra una anomalía negativa de Eu que resulta más marcada respecto de las demás unidades. En la figura 39 b se puede observar el diagrama de Tierras Raras de Sun y McDonough (1989) normalizado con condritas con un enriquecimiento de los HREE con respecto de los LREE siguiendo una tendencia casi horizontal.



|              |                   | Ba    | La    | Ce    | Pr   | Nd   | Sm    | Eu   | Tb   | Gd   | Dy   | Ho   | Er   | Yb   | Lu   | Hf   | Ta   | W    | Ti   | Pb    | Th    | U    |
|--------------|-------------------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| <b>LSD</b>   | CSD01_arenisca    | 371.3 | 23.86 | 45.05 | 5.64 | 21.3 | 4.57  | 1.09 | 0.64 | 4.34 | 3.42 | 0.67 | 1.92 | 1.85 | 0.29 | 4.99 | 0.52 | 1.27 | 0.29 | 7.68  | 6.24  | 1.77 |
| <b>PLP</b>   | CSD03_PillowR     | 83.81 | 1.75  | 3.83  | 0.71 | 4.39 | 2.14  | 0.88 | 0.67 | 3.56 | 5.37 | 1.19 | 3.33 | 3.45 | 0.5  | 1.45 | 0.06 | 0.66 | 0.18 | 0.31  | 0.01  | 0.01 |
|              | CSD04_PillowP     | 365.5 | 2.49  | 6.67  | 1.28 | 7.53 | 2.95  | 1.21 | 0.65 | 3.91 | 4.56 | 0.94 | 2.5  | 2.27 | 0.33 | 2.11 | 0.07 | 0.6  | 0.07 | 1.21  | 0.02  | 0.13 |
| <b>SD</b>    | CSD02_SD PuenteA  | 529.8 | 27.11 | 54.07 | 6.45 | n.d. | 5.34  | 1.18 | 0.84 | 5.14 | 5.18 | 1.05 | 3.09 | 3.09 | 0.47 | 4.85 | 0.91 | 4.55 | 0.57 | 14.24 | 8.42  | 2.57 |
|              | CSD02_SD PuenteB  | 361.4 | 16.43 | 35.87 | 4.77 | 20.1 | 4.8   | 1.31 | 0.78 | 4.86 | 4.91 | 0.99 | 2.73 | 2.59 | 0.38 | 3.98 | 0.64 | 0.48 | 0.39 | 8.31  | 2.42  | 0.84 |
|              | CSD-30_Estancia   | 846.2 | 29.03 | 59.27 | 7.3  | 27.4 | 5.76  | 1.31 | 0.87 | 5.34 | 5.63 | 1.2  | 3.48 | 3.47 | 0.52 | 5.97 | 0.91 | 0.83 | 0.99 | 26.05 | 10.21 | 2.41 |
|              | CSD31_Juntas      | 687   | 25.97 | 52.22 | 6.51 | 24.7 | 5.41  | 1.01 | 0.81 | 5.12 | 4.88 | 0.97 | 2.7  | 2.55 | 0.37 | 4.2  | 0.9  | 0.65 | 0.78 | 19.81 | 10.31 | 1.96 |
| <b>FT</b>    | CSD21_Pillon      | 629.5 | 13.35 | 25.4  | 3.17 | 12.8 | 3.07  | 1.75 | 0.51 | 3.3  | 3.32 | 0.7  | 2.01 | 2.1  | 0.33 | 8.18 | 0.82 | 0.62 | 0.56 | 13.52 | 2.14  | 2.27 |
|              | CSD22_Pillon2     | 528.9 | 22.57 | 41.37 | 5.16 | 20.2 | 4     | 1.27 | 0.52 | 3.88 | 2.73 | 0.53 | 1.4  | 1.26 | 0.2  | 4.23 | 0.4  | 0.29 | 0.41 | 6.57  | 4.84  | 0.62 |
|              | CSD42_potrerillos | 536.5 | 18.98 | 38.66 | 4.84 | 19.2 | 4.06  | 1.69 | 0.6  | 3.94 | 3.54 | 0.71 | 1.96 | 1.79 | 0.27 | 3.6  | 0.62 | 0.71 | 0.36 | 8.97  | 4.79  | 1.23 |
| <b>NP</b>    | CSD11_capilla     | 921.5 | 29.08 | 50.97 | 5.8  | 19.9 | 3.6   | 1.21 | 0.48 | 3.2  | 2.76 | 0.58 | 1.74 | 1.86 | 0.28 | 4.46 | 1.36 | 1.63 | 1.15 | 30.77 | 12.42 | 4.93 |
|              | CSD12_Patambo     | 701   | 17.6  | 36.87 | 4.31 | 17.9 | 4.59  | 1.08 | 0.65 | 4.17 | 3.88 | 0.85 | 2.01 | 2.1  | 0.29 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 30.77 | 6     | n.d. |
|              | CSD13_Snicco      | 768.8 | 38.6  | 74.49 | 9.28 | 34   | 6.89  | 1.39 | 0.93 | 6.2  | 5.01 | 1    | 2.87 | 2.72 | 0.42 | 5.67 | 0.79 | 0.8  | 0.9  | 24.02 | 12.56 | 2.55 |
|              | CSD13B_vetana     | 741.7 | 55.01 | 106.6 | 13.4 | 50.5 | 10.35 | 2.14 | 1.34 | 9.24 | 6.74 | 1.2  | 3.21 | 2.96 | 0.43 | 7.86 | 1.17 | 1.05 | 0.93 | 25.41 | 17.11 | 2.41 |
|              | Mi-14 Patámbo     | 701   | 17.6  | 36.87 | 4.31 | 17.9 | 4.59  | 1.08 | 0.65 | 4.17 | 3.88 | 0.85 | 2.01 | 2.1  | 0.29 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d.  | 6     | n.d. |
|              | CSD15_Caracuaro   | 1138  | 54.65 | 107.2 | 13.6 | 50   | 11.06 | 1.76 | 1.68 | 10.7 | 9.11 | 1.75 | 4.83 | 4.21 | 0.58 | 6.12 | 1.08 | 0.68 | 0.92 | 20.59 | 19.46 | 2.6  |
| <b>UDNS</b>  | CSD18_Zapote      | 349.7 | 19.04 | 35.84 | 4.57 | 18.5 | 4.14  | 1.48 | 0.64 | 4.24 | 3.82 | 0.77 | 2.12 | 2.04 | 0.31 | 5.46 | 0.65 | 0.55 | 0.26 | 9.12  | 4.53  | 1.17 |
|              | CSD20_Sjuan       | 314.6 | 12.25 | 24.68 | 3.5  | 15.8 | 4.13  | 1.24 | 0.68 | 4.24 | 4.35 | 0.87 | 2.35 | 1.88 | 0.31 | 3.77 | 0.4  | 0.51 | 0.39 | 8.29  | 1.15  | 0.79 |
|              | CSD40_Salto       | 980.8 | 22.31 | 43.88 | 6.58 | 26.6 | 5.34  | 1.56 | 0.66 | 4.69 | 3.6  | 0.69 | 1.87 | 1.65 | 0.24 | 3.47 | 0.83 | 0.63 | 0.4  | 3.5   | 3.49  | 1.1  |
|              | CSD45_CoyolGa     | 713   | 17.88 | 34.17 | 4.31 | 17.1 | 3.7   | 1.29 | 0.54 | 3.56 | 3.24 | 0.66 | 1.83 | 1.82 | 0.28 | 6.03 | 0.58 | 1    | 0.59 | 12.33 | 3.93  | 1.17 |
| <b>Dique</b> | CDS33_Juntitas_Di | 1513  | 30.09 | 61.64 | 7.7  | 29.7 | 6.44  | 1.45 | 0.87 | 5.87 | 4.85 | 0.9  | 2.35 | 2.02 | 0.3  | 4.46 | 0.97 | 1.07 | 0.9  | 17.32 | 9.28  | 3.23 |

Tabla 3: Tabla de resultados de elementos traza del EPSD y las unidades de roca encajonante descritas como: LSD (Litarenitas San Diego) y PLP (Pillow Lavas el Puente).

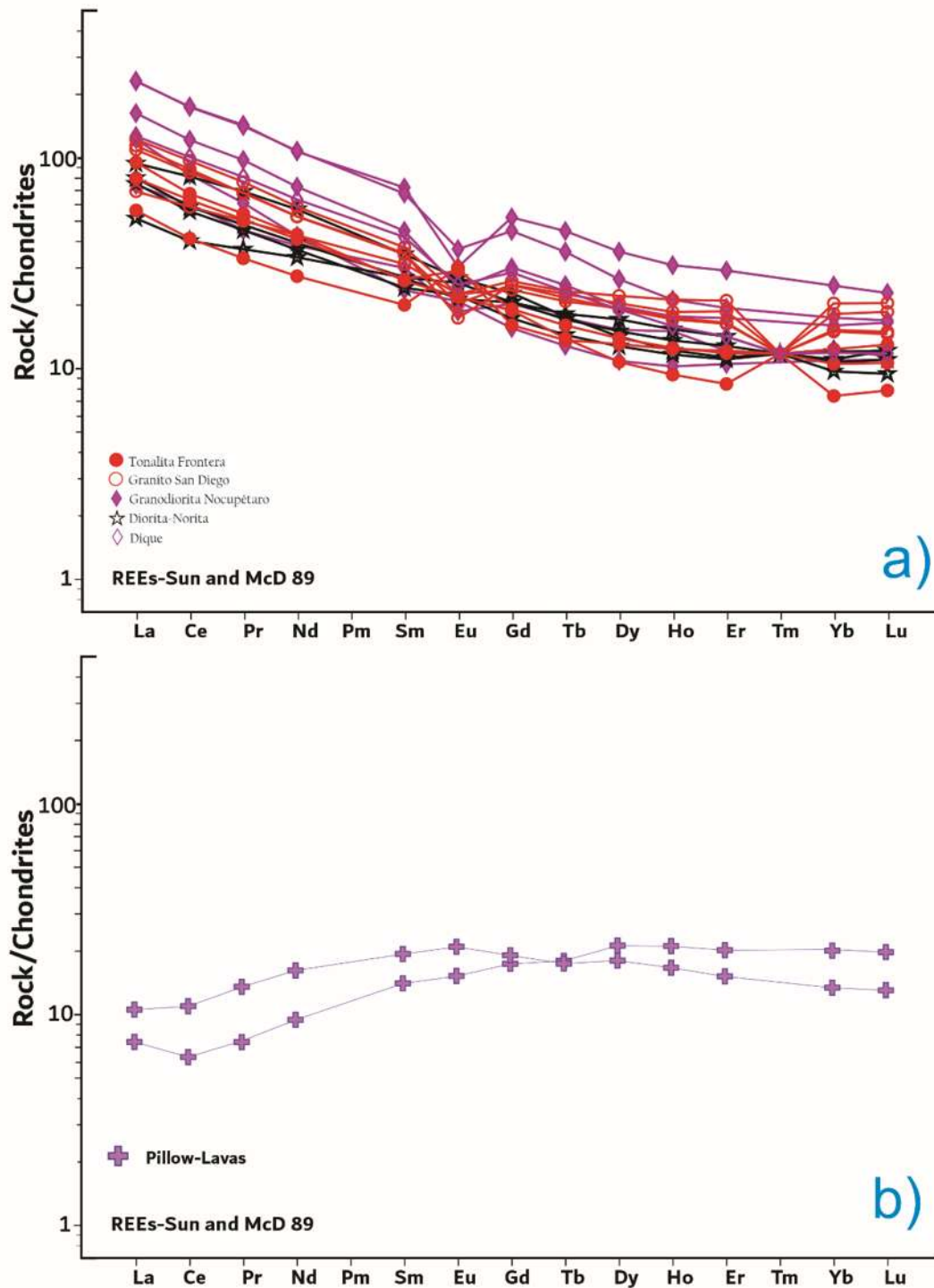
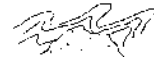


Figura 39: Diagrama de elementos de Tierras Raras normalizado con Condrita (Sun y McDonough 1989) graficadas las muestras del EPSD y la UDNS (a); b) mismo diagrama multielemental con la gráfica de las PLP.

En la fig. 40 se muestra el comportamiento y clasificación de las muestras que corresponden a la unidad de las pillow lavas en un diagrama ternario de Meschede (1986)  $Zr/4-Nb \cdot 2-Y$ , donde se observa que grafican en el campo tipo N-MORB.

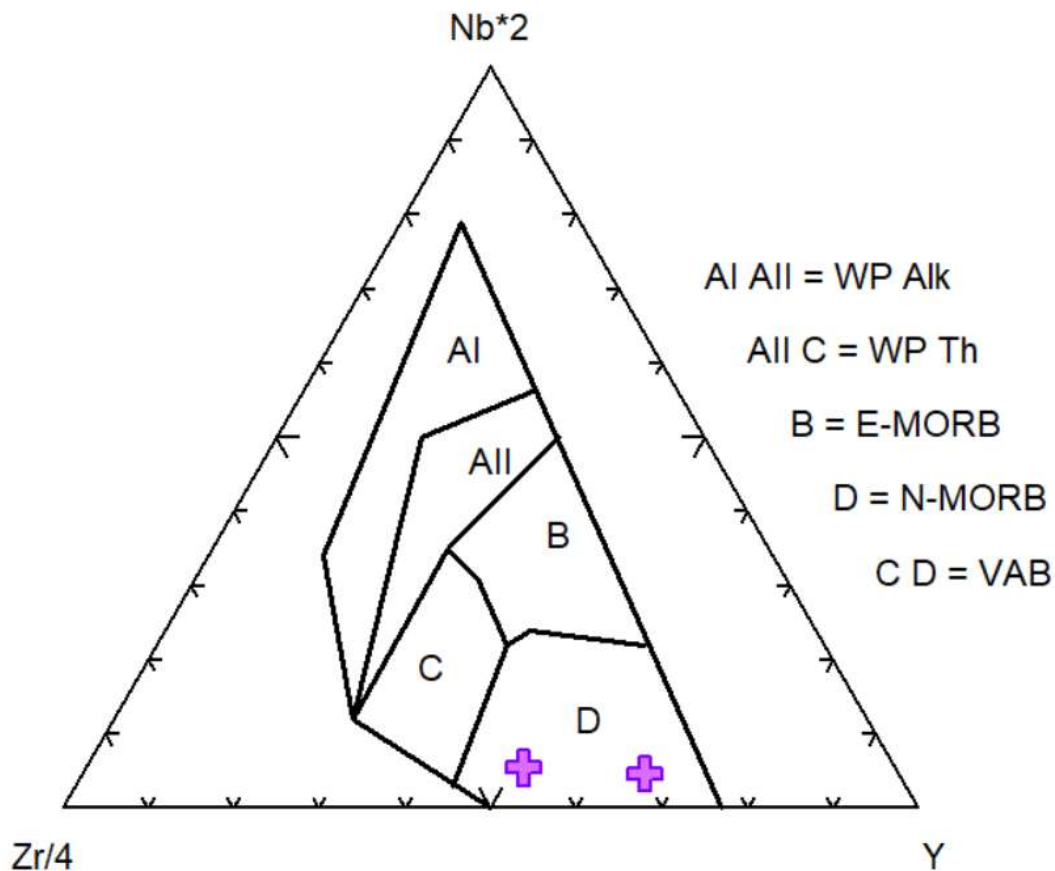


Figura 40: Diagrama de discriminación basáltica de Meschede (1982) donde se grafican las muestras de la unidad de PLP considerando la relación  $Zr/4-Nb*2-Y$ .

Se muestran los datos en los diagramas de discriminación tectónica de Pearce et al. (1984) (figura 41), donde se considera la relación de Rb en contra de  $Y+Nb$ . La mayoría de las muestras yacen en el campo de los VAG, con una tendencia a los granitos de intra-placa (WPG). La unidad NP es la más dispersa con una tendencia semi horizontal. Únicamente la muestra CSD-15 entra en el campo de los granitos de intra-placa, mientras que la muestra CSD-11 es cercana a los límites de los granitos sin-colisionales (syn-COLG) debido a su alto contenido en Rb. Ambas muestras pertenecen a la unidad NP.

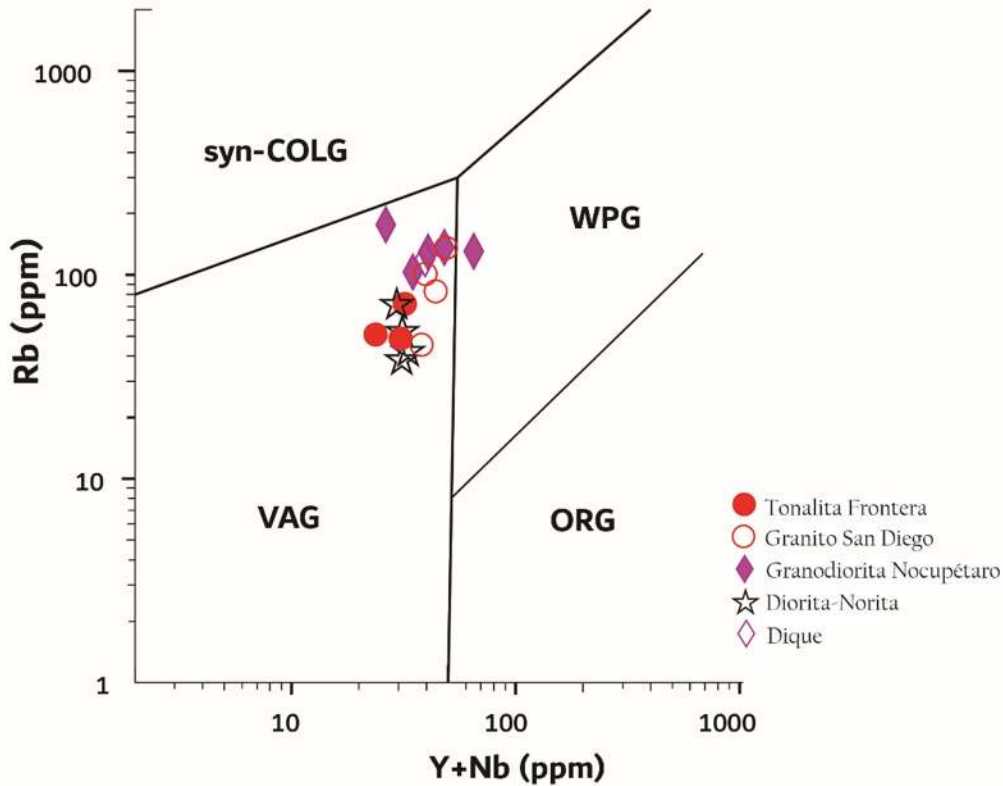
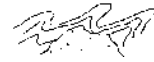


Figura 41: Diagrama de discriminación tectónica de Pearce et al. (1984) considerado para rocas graníticas. (VAG = granitos de arco volcánico; ORG = granitos orogénicos; WPG = granitos intraplaca; syn-COLG = granitos sinorogénicos).

#### 6.4.3 Geoquímica Isotópica Sr y Nd

Se presentan los resultados isotópicos de siete muestras (tabla 4) de los cuales, cinco pertenecen al granitoide del EPSD y dos pertenecen a la UDNS. En la misma tabla, se presentan las concentraciones elementales y relaciones isotópicas de  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  y  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ . Los valores iniciales de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  y  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  se calcularon a partir de una edad de 163 Ma. Los valores considerados para el manto empobrecido para calcular edades modelos son: DM  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513114$  y  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.222$  y los valores para el Reservorio Condritico Uniforme son: chondritic uniform reservoir (CHUR) =  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$  y  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$ .



| Muestra                                            | CSD02    | CSD11    | CSD15    | CSD18    | CSD21    | CSD22    |
|----------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$                    | 1.008    | 1.130    | 1.515    | 0.247    | 0.403    | 0.438    |
| $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$                    | 0.708862 | 0.707953 | 0.710089 | 0.705982 | 0.706636 | 0.706698 |
| 1 sd*                                              | 35       | 30       | 25       | 22       | 31       | 28       |
| 1 SE(M)                                            | 5        | 4        | 3        | 3        | 4        | 4        |
| n                                                  | 57       | 58       | 58       | 55       | 57       | 57       |
| $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$                  | 0.123    | 0.104    | 0.127    | 0.140    | 0.140    | 0.122    |
| $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$                  | 0.512400 | 0.512448 | 0.512416 | 0.512450 | 0.512439 | 0.512443 |
| 1 sd*                                              | 14       | 13       | 15       | 13       | 20       | 20       |
| 1 SE(M)                                            | 2        | 2        | 2        | 2        | 2        | 3        |
| n                                                  | 68       | 68       | 68       | 66       | 53       | 53       |
| $\epsilon\text{Nd}$                                | -4.64    | -3.71    | -4.33    | -3.67    | -3.88    | -3.80    |
| 1 sd                                               | 0.27     | 0.25     | 0.29     | 0.25     | 0.39     | 0.39     |
| Concentración<br>diluición<br>isotópica en<br>ppm) | Sm       | 4.31     | 3.10     | 8.29     | 4.06     | 3.54     |
|                                                    | Nd       | 21.11    | 17.98    | 39.31    | 17.59    | 17.57    |
|                                                    | Rb       | 67.62    | 140.26   | 115.92   | 33.38    | 57.09    |
|                                                    | Sr       | 194.06   | 359.12   | 221.45   | 391.50   | 410.21   |

Tabla 4: Resultados y relaciones isotópicas de  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  y  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  de los análisis de roca total de las unidades félsicas y máficas del EPSD.

En la figura 42 se presenta el diagrama de Paolo y Wasseburg (1979) en donde se grafican las relaciones de  $\epsilon\text{Nd}_i$  vs  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$  para las muestras del EPSD y la unidad de diorita-norita. En este diagrama se observa que todas las muestras registran una importante influencia cortical.

Las relaciones de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$  para el EPSD muestran una variación entre 0.705334 y 0.706578 y para  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_i$  es de 0.512263 y 0.512337, los valores para el  $\epsilon\text{Nd}_i$  son todos <0 (negativos) de -3.23 a -1.79. Las edades modelo ( $T_{\text{DM}}$ ) van de 0.31 a 0.62 Ga. Respecto a la UDNS, las relaciones isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$  muestra una variación entre 0.705411 y 0.705703, mientras que de  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_i$  0.512289 a 0.512301 graficando en el campo cortical. Los valores de  $\epsilon\text{Nd}_i$  resultan <0 siendo consistentes con el campo cortical -2.70 a -2.48. Sus edades modelo ( $T_{\text{DM}}$ ) presentan valores de 0.5 a 0.53 Ga.

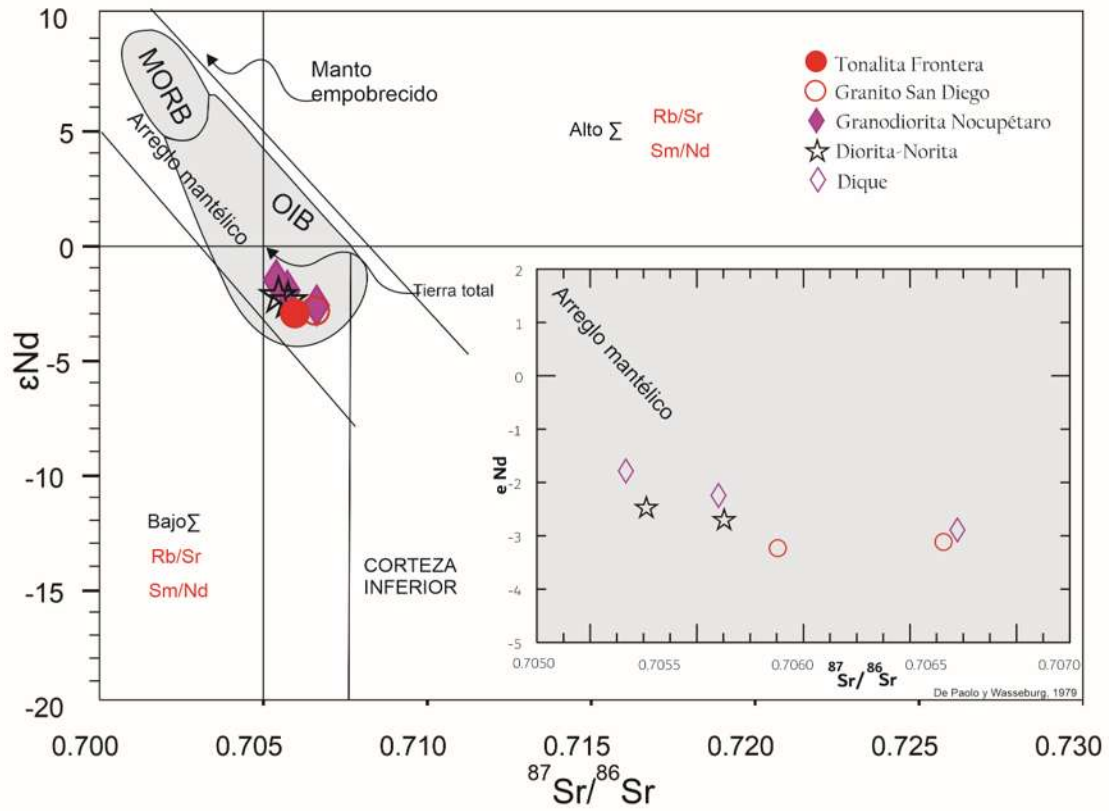
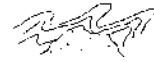
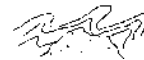


Figura 42: Diagrama De Paolo y Wasseburg (1979), se grafican las relaciones iniciales de  $\epsilon Nd_i$  vs  $^{87}Sr/^{86}Sr_{init}$  para las muestras del EPSD y la unidad de Diorita-Norita.



## 6.5 Geocronometría U/Pb en circones

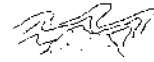
Se presenta la descripción del conjunto de circones separados y concentrados correspondientes a ocho muestras (Figuras 43 y 44): seis muestras del EPSD (CSD-12, CSD-15, CSD-20, CSD-22, CSD02\_SDPuenteA y CSD02\_SDPuenteB), una muestra de la LSD (CSD 01) y una muestra del UDNS (CSD-45). Se obtuvieron concentrados de 100 cristales por cada una de ellas. La totalidad de los datos se puede consultar en los Anexos.

Primero, se presenta la tipificación morfológica de los circones de cada muestra (Pupin, 1980) por medio de catodoluminiscencia y considerando su morfología e identificación de inclusiones, bordes y núcleos. Posteriormente se presentan los resultados de los análisis de isotopía de U-Pb, y finalmente los diagramas de promedio y de concordia donde se calcula la edad de las diferentes unidades.

### 6.5.1 Tipología de circones

La mayoría de los cristales presentan buen estado o grado de conservación, los que llegan a conservar sus dos pirámides son >70%, mientras que entre el 90 y 100 % aún conservan su prisma, esto dentro de las muestras de granito (figura 43). En la muestra de arenisca LSD, los cristales muestran un grado de conservación >60% en sus formas prismáticas, mientras que sus pirámides se conservan <40% del total de circones. La unidad máfica UDNS tiene un porcentaje <50% en la conservación de sus dos pirámides y >70% de conservación de los prismas. Los cristales que se encuentran mal conservados de las caras son al menos un 25% en muestras del EPSD y la UDNS; por otra parte, más del 75% están bien conservados de sus caras. Con respecto al tamaño de los cristales, se presenta una gran variabilidad, distinguiéndose al menos 3 familias de circones: la primera de ellas con tamaños <40  $\mu\text{m}$ ; la segunda con tamaños >90  $\mu\text{m}$  y la tercera superando los 170  $\mu\text{m}$ . La muestra CSD-21-15 es la que presenta menor homogeneidad en el tamaño de los circones en la unidad del EPSD. Las tonalidades que se pueden observar bajo luz paralela y nícoles cruzados, muestran variaciones que van de tornasol, azul índigo, azul grisáceo, rosa pálido, verde tenue a intenso y con tendencia a tonos ligeramente más fuertes en verde y rosa.

Las inclusiones observadas en general son menores de 18  $\mu\text{m}$ , son cristales prismáticos de circón con formas elongadas, subredondeadas y pocas veces se observan dos pirámides, presentando generalmente birrefringencia alta. No obstante, se pueden observar pequeñas inclusiones amorfas que pudieran estar relacionadas con fluidos/gases. La abundancia de las inclusiones no queda restringida a una tipología de circón ni a alguna unidad en específico.



*Figura 43: Fotografías de los concentrados de circones para dar continuidad con el proceso de montaje y pulido, se hace notar la diversidad de tamaños obtenidos en cada muestra.*

La imagen de cátodoluminiscencia no muestra gran variabilidad, quedando dentro de un nivel intermedio en cuanto a la intensidad de luminiscencia, con un rango de colores amarillentos, blanquecinos y azules tenues-opacos. Estos cambios de intensidad se asocia a diferentes etapas del circón bajo el criterio de luminiscencia, sin embargo, los colores blanquecinos en estas muestras están asociados a circones con bordes concéntricos (consultar anexos).

Respecto a su morfología, las muestras exhiben un hábito de cristalización relacionado a prismas bipiramidales con pocos cristales de prismas modificados por fragmentación en sus terminaciones. En porciones mínimas las pirámides parecen fragmentadas, en especial para los circones de tipo  $G_1$ ,  $L_5$  y ocasionalmente  $P_1$ . Tomando la propuesta tipológica de la clasificación de Pupin (1980 y 1988; Figura 45) se considera una abundancia relativa de tipologías en los campos  $G_1$  y  $S_5$ , mientras que las proporciones disminuyen ligeramente en los campos  $P_1$  y  $L_5$ . En menor proporción, marcando una tercera familia, se identifican los de tipo  $S_{10}$  y  $P_2$ . Se lograron observar tipologías de los campos  $S_{15}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{17}$ ,  $P_3$  y  $L_4$  con cantidades menores a 7 y mayores a 3. Y en proporciones menores a 2 individuos se presentan  $S_8$ ,  $S_4$ ,  $S_{14}$ ,  $G_2$ ,  $P_4$ ,  $S_{20}$ ,  $S_9$ ,  $S_3$  y  $P_5$ . La muestra que concentra la mayor variabilidad corresponde a la arenisca CSD-01, mientras que, dentro de las



plutónicas, la de mayor variabilidad es representada por las muestras CSD-12 y la CSD02\_SDPuenteA. En la muestra obtenida de la unidad diorítica-noritica CSD-45 el predominio de los circones se genera en la tipología  $P_2$  con una sucesión de las tipologías  $P_1$  y  $P_4$ , siendo los de menor contenido los de tipología  $S_{10}$ ,  $S_5$ ,  $L_5$ ,  $P_3$ ,  $S_2$ ,  $S_{15}$ ,  $S_{18}$  y  $Q_2$ , todos ellos con menos de tres individuos.

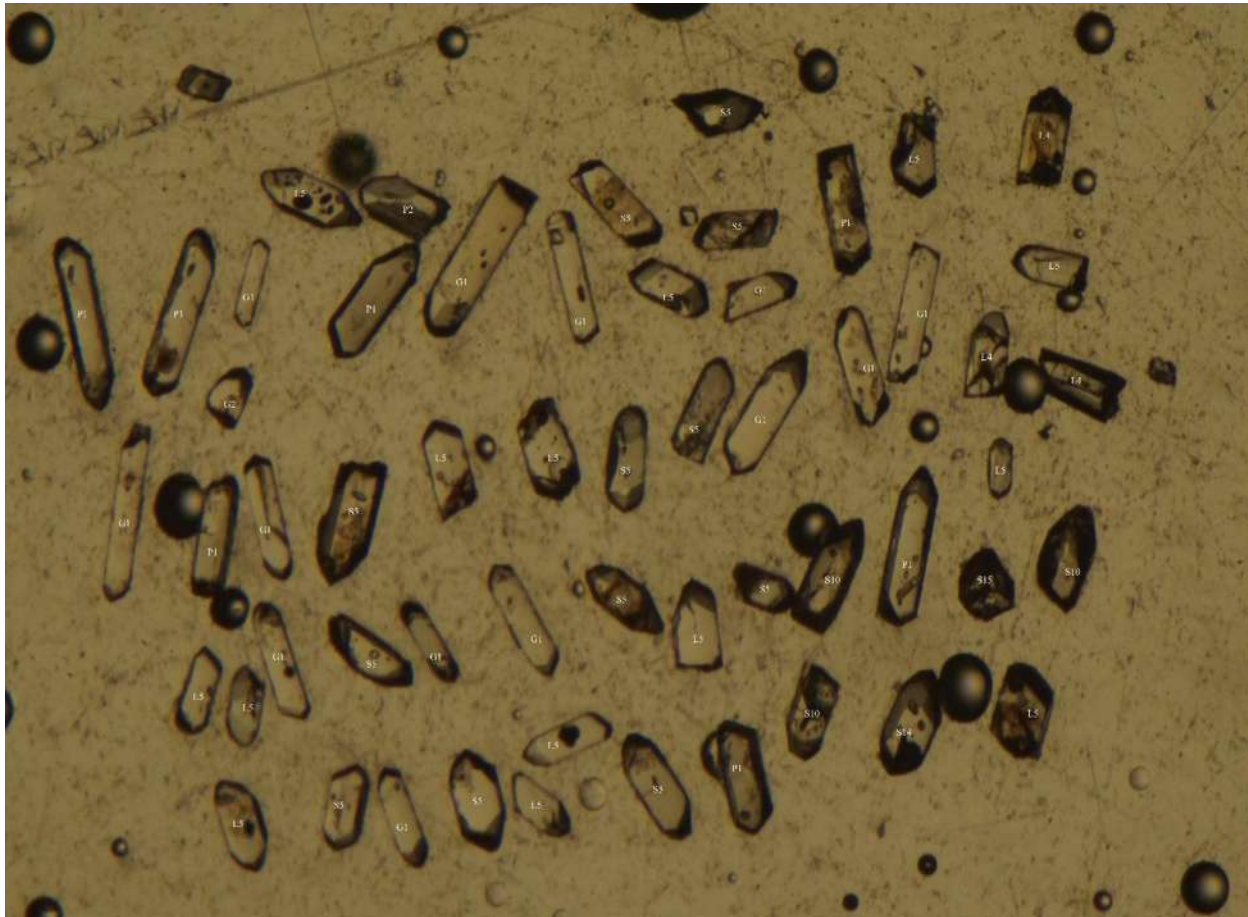


Figura 44: Clasificación morfológica Pupin (1980), de los circones del EPSD.

El predominio de poblaciones de circones para la unidad granítica UGSD está determinada por la tipología  $S_5$  y  $G_1$  con valores tres veces mayores a otras poblaciones inmersas en esta unidad. La unidad tonalítica UTF tiene un predominio de circones tipo  $P_1$ ,  $S_5$  y  $P_2$  con poca variabilidad en su forma.

Las tipologías  $G_1$ ,  $S_{10}$  y  $L_5$  son las de mayor proporción en la unidad granodiorítica UGN. Con base en estos datos podemos ver que los circones  $S_5$  están asociados a la composición granítica,



mientras que las tipologías  $P_1$  se asocian a la composición tonalítica y por su parte el tipo  $G_1$  está asociado a la composición granodiorítica. Por su parte, la unidad diorita-norita exhibe un contenido de circones tipo  $P_2$  como tipología característica y/o asociado a esta composición.

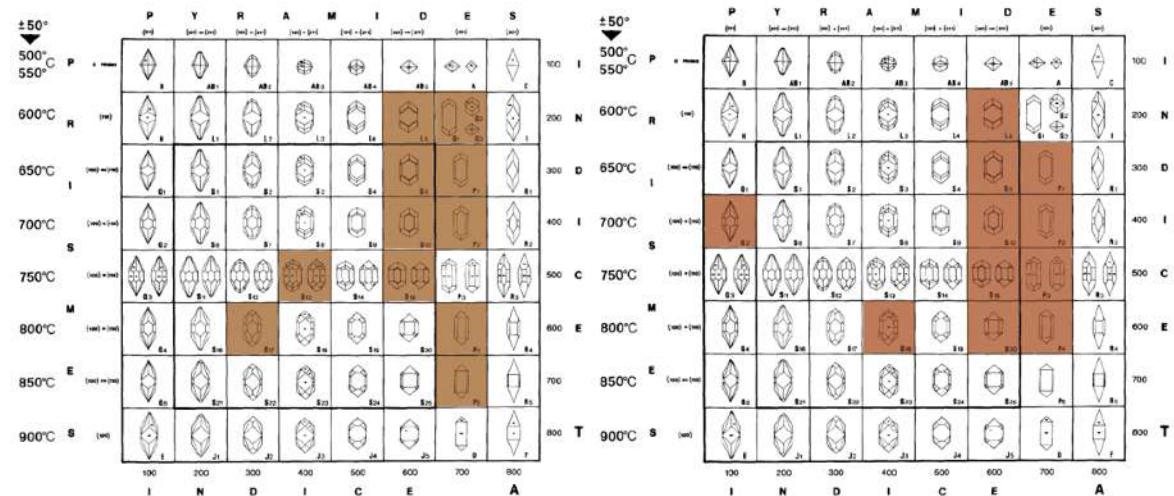
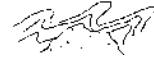


Figura 45: Tabla de clasificación propuesta por Pupin (1980) donde se considera el desarrollo de pirámides y prismas asociadas a temperatura de cristalización en los magmas. Las tipologías identificadas en el EPSD se señalan en las dos imágenes, las unidades félsicas con recuadros en color café en la imagen izquierda y en color marrón (lado derecho) las tipologías identificadas en la UDNS.

Finalmente, con base en el diagrama de clasificación de Pupin (1980), es posible hacer una primera estimación de la temperatura de cristalización del EPSD, la cual muestra un rango que va de 600°-700 °C para el EPSD y 650°- 800 °C para la UDNS.

## 6.6 Isotopía y edad U-Pb en circones

Para determinar la temporalidad de emplazamiento del EPSD en relación con las otras unidades se realizaron análisis isotópicos de ocho muestras empleando el método isotópico U-Pb ( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  y  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ). Seis muestras pertenecen al EPSD (CSD02\_SDPuenteA, CSD02\_SDPuenteB, CSD12, CSD15, CSD20 y CSD22), una a la UDNS (CSD45) y una perteneciente a las LSD (CSD1). En todas ellas se consideraron bordes y núcleo. Al emplear este método isotópico se obtiene la edad de cristalización de estos cuerpos plutónicos, así como las edades de procedencia de la principal unidad encajonante (LSD).



Una vez analizados los diferentes puntos por medio del método de ICPMS-LA, el procesamiento de los datos para obtener el cálculo de edades fue llevado a cabo por medio del software IsoplotR. En los diagramas de concordia y discordia se muestran las relaciones  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  y  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  de los cristales y sus intersecciones con las curvas.

En las gráficas se puede observar una buena reproducibilidad de las edades obtenidas de las muestras del EPSD. Las muestras de la unidad Frontera son las que presentan mayor homogeneidad en cuanto a su reproducibilidad, las dispersas se asocian con áreas de análisis como bordes o núcleos. Todos los circones que presentan zoneamientos son concordantes con un núcleo relativamente viejo y bordes respectivamente más jóvenes.

### 6.6.1 Edad de la Unidad del Granito de San Diego (UGSD)

Las muestras de la UGSD registran una edad promedio de  $164.10 \pm 0.81$  Ma con un total de 68 datos (Figura 46), con una desviación métrica cuadrática ponderada (MSWD) de 1.3 y sólo una muestra rechazada. Se pueden observar algunas muestras que, incluido el error, sobrepasan la edad de 180 Ma; estas edades se retoman en el apartado de discusión.

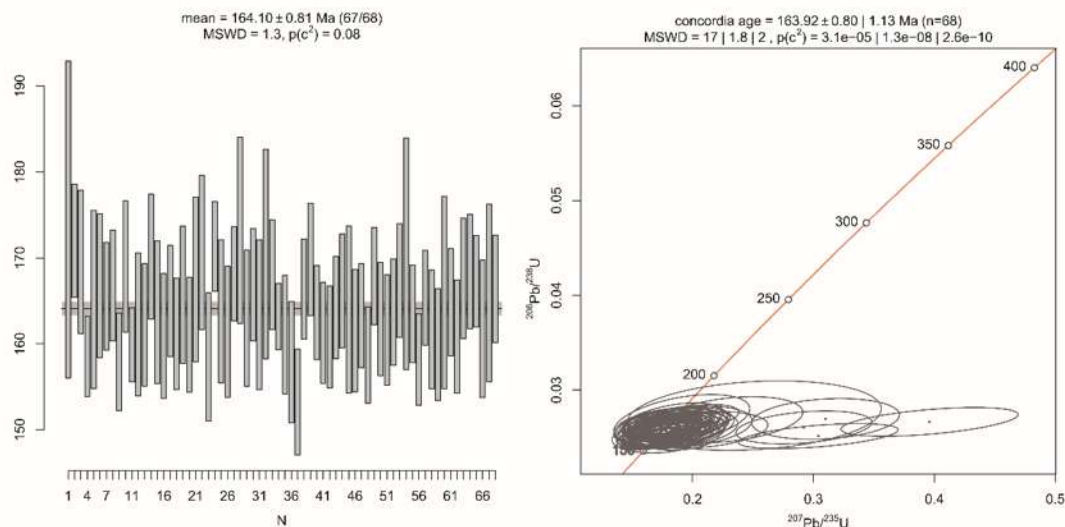
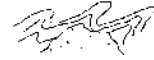


Figura 46: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la Unidad San Diego.

En el diagrama de concordia se obtuvieron edades de  $163.92 \pm 0.80$  Ma, la mayoría de las fracciones grafican por debajo de la concordia con una tendencia casi horizontal producida por un error  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  relativamente alto. No se observa una relación entre la tipología de los circones y



las variaciones de edades, sin embargo, los circones de esta muestra presentan zoneamiento en gran parte de los individuos.

### 6.6.2 Edad de Unidad Tonalita Frontera (UTF)

El análisis de la unidad tonalítica Frontera se realizó con 27 cristales de los cuales se analizaron bordes y núcleos (Figura 46). La edad promedio  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  -  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  es de  $160.82 \pm 1.80$  Ma con una desviación métrica cuadrática ponderada de 1.8, estando la mayoría de las muestras concentradas en el campo de la media, con algunos cristales que, como en la muestra anterior, superan los 180 Ma y pocos de ellos también por debajo de los 150 Ma.

El diagrama de concordia (Figura 47) muestra edades de  $160.81 \pm 1.81$  Ma. Las edades más bajas corresponden a bordes de 151.04 Ma y el valor más alto corresponde a 184.1 Ma. Todas las muestras grafican por debajo de la concordia y generalmente están agrupadas cerca de la concordia a excepción de uno de ellos que tiene un error  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  relativamente alto. La edad de 200 Ma corresponde a los datos obtenidos en el núcleo de un circón tipo  $S_5$  que presenta zoneamiento.

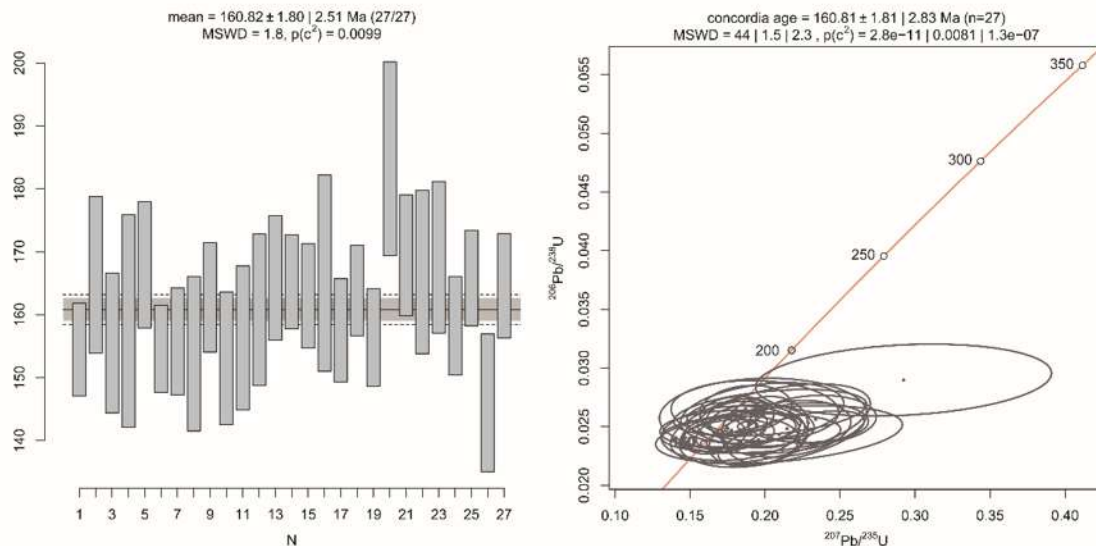
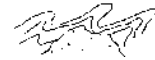


Figura 47: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la Unidad Frontera.

### 6.6.3 Edad de Unidad del Granito de Nocupétaro (UN)

El análisis de la unidad Nocupétaro se realizó en 53 cristales considerando bordes y núcleos (Figura 48). El promedio de las edades obtenidas de  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  -  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  corresponde a  $162.22 \pm$



1.31 Ma con una desviación métrica cuadrática ponderada de 2, siendo también una de las muestras con mayor número de cristales con edades altas y bajas, tema que se aborda en el apartado de discusiones.

En el diagrama de concordia tenemos una edad de  $161.25 \pm 1.28$  Ma. Las edades más jóvenes corresponden a 142.17 Ma y el valor más antiguo corresponde a 180.27 Ma, todos los valores de igual forma grafican por debajo de la concordia semi-agrupados con ciertos grados de incertidumbre medianamente altos. Los datos 6 y 7 pertenecen a un mismo circón. La edad de 200 Ma está relacionada con un análisis que, al observar las imágenes de catodoluminiscencia, se logra apreciar un crecimiento de un núcleo claro que posiblemente pertenece a un antecristal o xenocristal químicamente diferente y evidentemente más antiguo. La edad de 140 Ma, corresponde al análisis en el borde de un cristal con la morfología de acuerdo con Pupin corresponde a la tipología L<sub>5</sub>. La misma relación se logra apreciar en los datos 53 y 52 donde se obtuvo un análisis en el borde y otro en el núcleo. La tipología del circón es de tipo S<sub>10</sub>; en este individuo no se tiene una imagen muy clara, pero sí se aprecia un ligero zoneamiento.

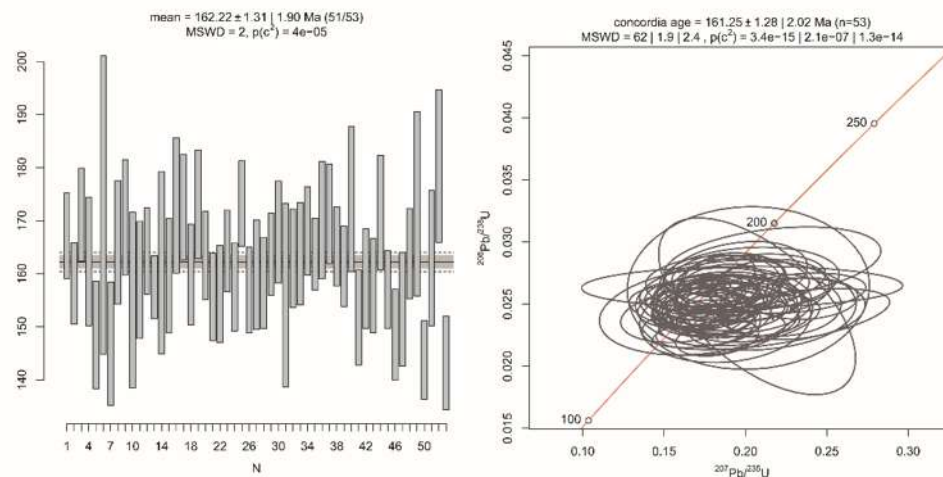
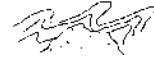


Figura 48: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la Unidad Nocupétaro.

#### 6.6.4 Edad de Unidad Diorita-Norita Salitre (UDNS)

En la muestra correspondiente a la Unidad Diorita-Norita el Salitre (UDNS), se analizaron 35 cristales considerando bordes y núcleos (Figura 49). El promedio de las edades obtenidas de  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  -  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  es de  $155.22 \pm 2.09$  Ma con una desviación métrica cuadrática ponderada de



7.7. Este divide en dos grupos, los que corresponden a edades mayores a 165 Ma localizados en la porción izquierda y los del rango 165 – 130 Ma. Las tipología predominante de los circones de la porción izquierda es  $P_2$ , incluyendo algunos individuos de tipologías  $S_{10}$ ,  $S_{18}$ ,  $S_5$ ,  $P_1$  y  $S_2$ , de las cuales se estiman rangos de temperatura entre 650 – 800 °C.

El diagrama de concordia muestra una edad de  $155.14 \pm 2.09$  Ma. La edad más joven es de 130.4 Ma y el valor más alto corresponde a 195.9 Ma. Como se pudo observar en la primera gráfica, el diagrama de concordia muestra los individuos de la porción izquierda graficando por arriba de la concordia, mientras que los de la porción derecha grafican por debajo de ella. Para esta unidad se consideran tres grupos: los que grafican en los rangos de 180 a 220 Ma, el grupo de 150 a 170 Ma y finalmente el grupo de 120 a 140 Ma (figura 49).

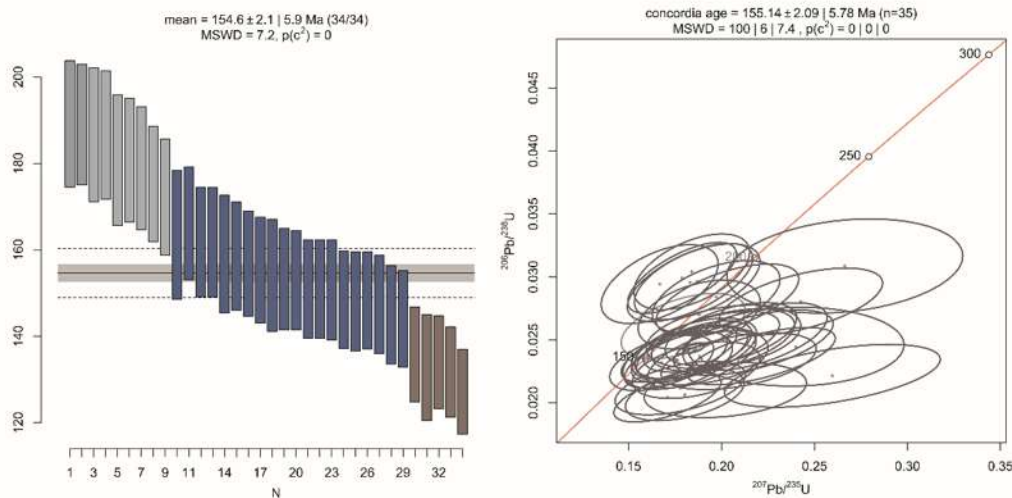
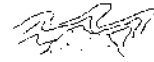


Figura 49: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la UDNS.

#### 6.6.5 Edades de procedencia de la Unidad de Litarenitas de San Diego (LSD)

De la unidad de Litarenitas se analizaron 38 individuos considerando bordes y núcleos; en la diversidad de edades encontradas se puede observar en promedio de las edades obtenidas de  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  -  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ :  $404.79 \pm 3.80$  Ma con una desviación métrica cuadrática ponderada de 580, y edades que superan los 1500 Ma. Estas edades fueron obtenidas de núcleos de circones ligeramente redondeados tipo  $S_{17}$ .



El diagrama de concordia (Figura 50) muestra una edad correspondiente a  $371.04 \pm 3.83$  Ma. Sin embargo, se pueden observar tres grupos principales que corresponden con edades de 1000 a 1300 Ma, 600 a 800 Ma y finalmente 500 a 250 Ma. Todos ellos yaciendo sobre la línea de la concordia, mientras que sólo el segundo grupo presenta algunos valores graficando por debajo de la concordia.

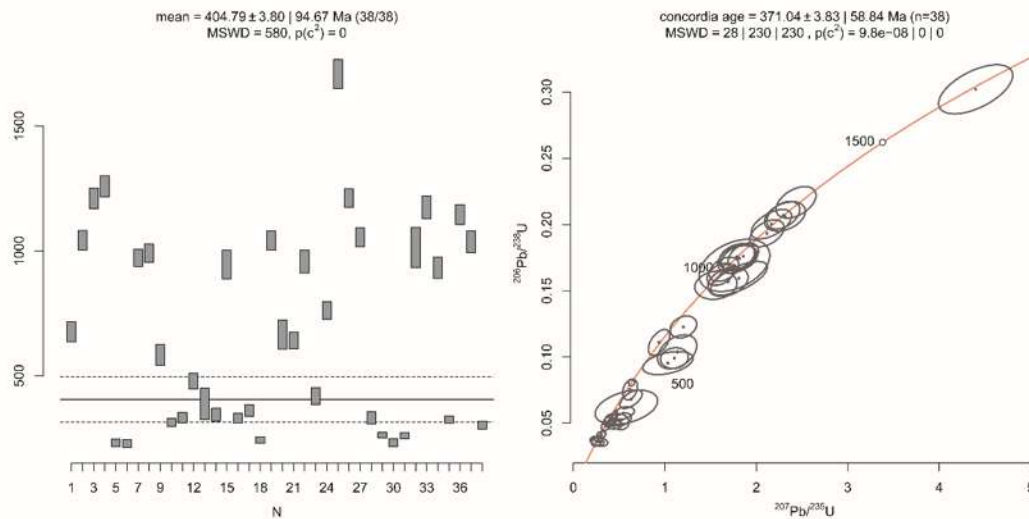
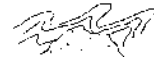


Figura 50: Grafico tipo histograma de edades promedio y de concordia para los circones de la LSD.



## 7.- Discusión

### 7.1 Distribución espacial del EPSD

El EPSD representa hasta ahora el cuerpo plutónico más meridional identificado en la Franja Plutónica Jurásica dentro del Terreno Guerrero. El EPSD es uno de los cuerpos jurásicos mejor expuestos, así como uno de los cuerpos auríferos más importantes del estado de Michoacán. Su emplazamiento conlleva a la intrusión en rocas metasedimentarias de tipo litarenitas del subterreno Zihuatanejo.

En el área de estudio, el área aflorante del EPSD (Figura 18) es de 86.84 km<sup>2</sup> y representa el 12.86 % del área cartografiada; por su parte el Complejo Arteaga comprende un área de 82 km<sup>2</sup> y representa el 11.9 % del área cartografiada. La distribución del EPSD y en gran parte la roca encajonante del Terreno Guerrero coincide con zonas bajas que no superan los 1250 msnm y en promedio los 800 msnm que coincide con los bloques morfoestructurales dispuestos en la porción centro oriental. Estos bloques están caracterizados por formas de montaña de baja pendiente, delimitadas por grandes escarpes y profundas cañadas desarrolladas en las secuencias volcánicas terciarias (figura 16). La transición entre estos dominios morfoestructurales, considerando la diferencia de edad entre las unidades, sugiere la exposición del EPSD como producto de una ventana tectónica que marca la transición hacia la Depresión del Balsas con el modelado del río meandriforme de San Diego asociado con una estructura orientada NNW, que, en sus porciones occidental y oriental se relacionan con zonas de cizalla en la localidad de Patambo y San Diego, como será explicado en la siguiente sección.

Además de la notable reducción de la superficie estimada del EPSD en comparación con la cartografía previa del SGM y Tapia-Cruz (2012), por medio del reconocimiento de campo de las demás unidades encajonantes y cobertura, en el mapa de la figura 18 se ha optado por eliminar la propuesta de un cuerpo hipabisal de tipo pórfido riolítico (figura 10) debido a que en la revisión de diversos puntos de control de esta unidad coincide con un cuerpo ignimbrítico y probablemente no ha sido bien caracterizado desde el punto de vista petrográfico.



## 7.2 Deformación post-magmática y estructura regional del ESPD

La orientación cartográfica NNW del ESPD resulta relevante, en el contexto de la cartografía regional de los complejos plutónicos jurásicos del suroccidente de México. El ESPD es el único que presenta una geometría alargada con tendencia N-S que sugiere una distribución originada por deformación post-emplazamiento controlado por estructuras compresivas laramídicas de primer orden.

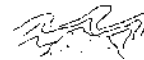
Con base en la cartografía y evidencias de campo, la identificación de grandes estructuras de plegamiento son visibles, como se muestra en las imágenes (figuras 19 A1 y A2). Los sistemas de pliegues han sido interpretados con base en los datos de campo de las unidades del Arco Amengarícuaro y el conglomerado de la formación Playitas y se han definido como un conjunto de pliegues de tipo anticlinal de la sierra del Coyol al NE de Nocupétaro (Figura 23 D5).

Esta orientación regional se asocia con estructuras locales, ya sea en las unidades graníticas del ESPD, en la localidad de Patambo generando estructuras de tipo sigmoides, así como estructuras de segundo orden con planos oblicuos o de Riedel tipo R-R' y así estimando  $\sigma_1$  en dirección W-SE; así como la deformación de la roca encajonante con la generación de pliegues disarmónicos asociados a la unidad de meta-areniscas LSD.

Es oportuno mencionar que la estructura regional del ESPD y de las unidades de roca encajonantes implican además que serían paralelas a la orientación regional del sistema de deformación laramídica NNW que prevalece en la región de Huetamo y Zitácuaro (Centeno et al., 2011). Por lo tanto, confirma su correlación con los procesos de deformación y acreción del Terreno Guerrero y del subterreno Zihuatanejo.

## 7.3 Variaciones petrológicas y geoquímicas del ESPD

Las unidades del ESPD presentan una asociación mineral poco variable que corresponde con Kfs + Plg + Qz + Bt  $\pm$  Ms en sus variaciones félsicas y Plg + Cpx + Hbl para la variación máfica. Sin embargo, es oportuno mencionar la abundante presencia de cuarzo de recristalización relacionado con los procesos de deformación y metamorfismo de bajo grado en las unidades del ESPD, originando un contenido de cuarzo entre el 20-60 wt% que no puede ser considerada para el conteo modal y utilizar el diagrama tipo Streckeisen. Sin embargo, las unidades félsicas convergen en el rango composicional granito, granodiorita, tonalita. La distribución espacial de estas composiciones indican que la unidad granítica cubre la porción septentrional, la unidad tonalítica la porción central



y la unidad granodiorítica prevalece en la porción meridional. Por su parte, la Unidad de Diorita-Norita está expuesta principalmente en la zona oriental de la zona de estudio. La variación en el tamaño de los cristales nos indica una variación en la tasa de cristalización, esta evidencia es perfectamente distinguible en el crecimiento de minerales intersticiales gobernados por filosilicatos (Bt y Ms).

La textura hipidiomórfica y los puntos triples en los minerales indican una fase de crecimiento simultáneo en la asociación  $Kfs + Plg + Qz + Bt \pm Ms$ , mientras que las texturas de exsolución como las de tipo parches de Plg en Kfs indican una fase de desmezcla a altas temperaturas producida por un enfriamiento que fue desestabilizado. Esta última observación también resulta consistente con el zoneamiento registrado en algunas Plg. Estas variaciones en el contenido de An en la plagioclasa pueden originarse en procesos de mezcla física y química de intensidad variable entre las unidades graníticas y las unidades máficas (figura 31 R). Estas variaciones son además consistentes con la presencia de anfíbol con textura de pseudomorfo o xenomorfo, caracterizado por mostrar bordes corroídos y de aspecto esquelético presente en las unidades félsicas.

Se considera que la presencia de los anfíboles es evidencia de una primera etapa de cristalización de la unidad diorítica-norítica que posteriormente mantiene un equilibrio relativo durante los procesos de mezcla con las unidades félsicas, donde la asociación de  $Plg1 + Cpx + Hbl$  muestra bordes difusos o de reacción con texturas sobrepuestas con la asociación  $Plg + Bt + Qz$ .

Las unidades del EPSD se caracterizan por mostrar una clara afinidad de tipo calciocalina. Las diferencias significativas en la química de las unidades félsicas vs Diorita-Norita son marcadas por la relación de elementos mayores. Las unidades máficas muestran gran variación en el contenido de sílice y de todos los óxidos de elementos mayores, mientras que las unidades félsicas muestran un contenido de sílice con menor variabilidad. Sin embargo, también hay una clara tendencia en todas las unidades del EPSD con un enriquecimiento de  $Al_2O_3$ , no obstante, existe mayor enriquecimiento en la unidad Tonalita Frontera y en la Diorita-Norita con respecto a las muestras de granito y granodiorita.

En relación con los elementos traza, también muestran un comportamiento relativamente homogéneo puesto que al graficar en los diagramas de discriminación tectónica (figura 41) y los diagramas multielementales (figura 39), revelan un enriquecimiento en los LREE y LILE y un



empobrecimiento de HREE con anomalía negativa de europio, la normalización con N-MORB revela anomalías negativas de Nb, Ti, Ta y P que de acuerdo con Pearce (2008) resultan de tipo VAG.

Por su parte, las relaciones isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  y de  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ , calculadas con un valor de 163 Ma, muestran características de un magma derivado del manto. Los valores iniciales de  $\epsilon\text{Nd}$  resultan negativos (-3.23 a -1.79), mientras que los valores iniciales  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  son comprendidos en el rango 0.705334 y 0.706578 (figura 42), por tanto, se asume un aporte radiogénico importante de origen probablemente cortical. La unidad máfica a diferencia de las unidades félsicas muestra menor afinidad cortical sugiriendo un ascenso relativo rápido. Por otra parte, las muestras de las unidades félsicas tienen mayor influencia cortical, lo cual que resulta consistente con un magma más diferenciado.

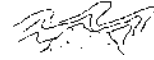
#### 7.4 Edad del emplazamiento del EPSD

De acuerdo con los antecedentes, a las unidades del EPSD le han asignado una edad del Oligoceno (Romero-Rojas et al., 2015), clasificándolo como granito-granodiorita y lo han denominado Granito El Hondable (Montiel-Escobar et al., 1998).

Utilizando los resultados del análisis U-Pb ( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  y  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ) en cristales de circones los clusters (grupos) de las diferentes unidades del EPSD se interpretan al menos tres etapas de cristalización: i) La primera etapa comprende edades de 220 - 180 Ma, considerada como un primer o “precoz” pulso magmático asociado con el inicio de la subducción; ii) un segundo período de cristalización que se considera el pico térmico de cristalización del EPSD entre 170 – 140 Ma emplazado y estacionado en corteza superior y iii) finalmente una etapa de recalentamiento o recrystalización de 130- 120 Ma que se asocia con la evolución del vulcanismo cretácico de arco magmático.

Estos tres grupos de edades deben ser interpretados en el contexto de un sistema plutónico complejo, que lleva consigo procesos amalgamación, así como de asimilación cortical, relacionado con evidencias en campo como xenolitos y texturales como xenocristales.

La cristalización en un sistema magmático compuesto ha sido conceptualizada por Miller *et al.* (2007) donde sugiere interpretar los circones de acuerdo a diferentes etapas evolutivas de un sistema magmático, ya sea como cristales magmáticos simples o bien como autocristales, antecristales, o incluso como la incorporación de xenocristales y cristales heredados asociados a un



sistema magmático de gran volumen generado por intrusiones múltiples en escala de millones de años (figura 51).

La primera fase de cristalización de circones con edades entre 220 - 150 Ma sugieren un estadio inicial asociado con un rápido ascenso emplazando un magma en niveles de corteza media-superior.

La segunda fase de cristalización con una edad promedio para el EPSD de  $163.12 \pm 0.64$  Ma, se considera la edad de cristalización del EPSD, donde es importante mencionar que en una etapa tardía y de subsólidos se genera el emplazamiento de diques dioríticos tardo-magmáticos a través de estructuras extensionales.

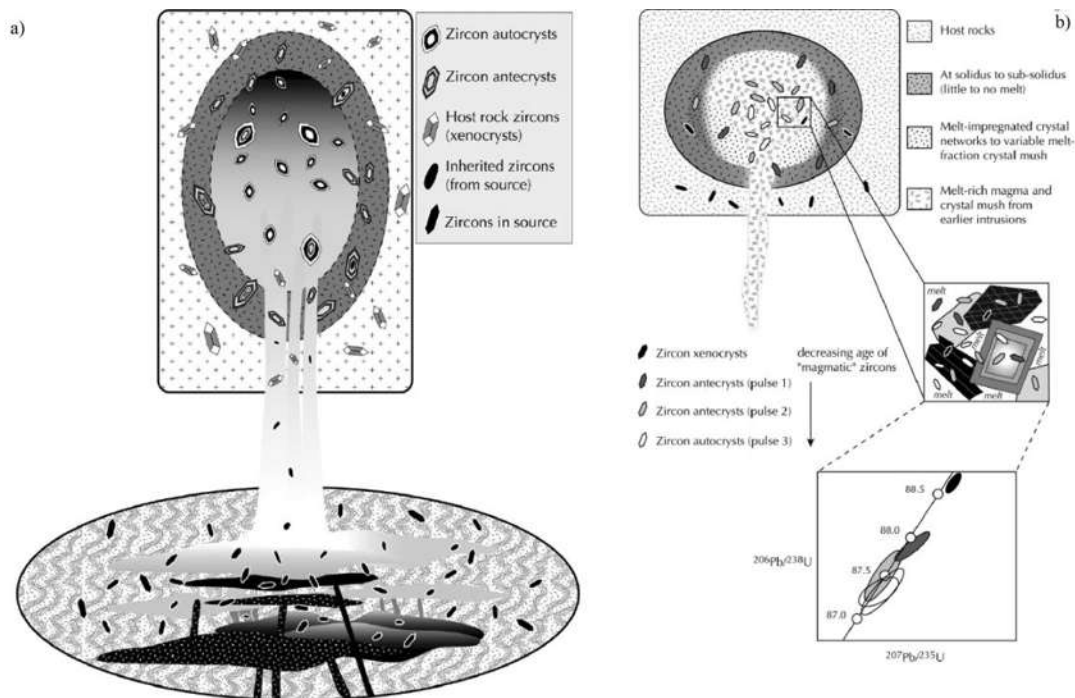
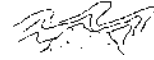


Figura 51: Modelos de Miller et al., 2007 a) posible origen de los circones en un sistema magmático compuesto en un sistema típico de arco continental maduro; b) modelo idealizado del reciclado de circones a medida que se inyectan pulsos magmáticos sucesivos acumulando circones que crecen desde un fundido inicial, reciclando antecristales y posiblemente xenocristales (roca caja), que podrán generar rangos de edades distintas asociadas a un componente de edad más joven como se muestra en el diagrama de concordia.

Finalmente, los circones correspondientes a las edades entre 130 -120 Ma estarían asociados al recalentamiento o recristalización de circones influenciados con los procesos



magmáticos post-plutónicos y asociados con el vulcanismo del Arco Amengarcuaro y por lo tanto con la secuencia volcánico-sedimentaria del Cretácico Inferior del Terreno Guerrero.

### 7.5 Mecanismo y condiciones físicas de emplazamiento del EPSD

Para determinar las condiciones físicas de emplazamiento del EPSD se recurrirá a las relaciones estructurales observadas en campo, en particular las relaciones de contacto, concluyendo con una aproximación basada en la termometría Ti-in en circones.

Las relaciones de contacto del EPSD en campo muestran que el plutón se ha emplazado en la roca encajonante en condiciones de fallamiento con contactos relativamente netos. Como evidencia de ello en la porción este, en las inmediaciones de la localidad del Real, se logra apreciar un contacto neto, sin embargo, las zonas de contacto no son siempre visibles e impiden observar la relación que guarda con el encajonante. De igual forma, en la porción W es imposible observar esta relación. Otra evidencia es la presencia común de xenolitos de origen metamórfico rotados y parcialmente asimilados que sugieren un tiempo relativamente contemporáneo entre el emplazamiento y el proceso de cristalización.

La intensidad de fracturamiento del EPSD se encuentra gobernada por un evento post-magmático donde las estructuras predominantes son las de dirección NE-SW, mientras que las de primer orden siguen una tendencia NNW-SSE. Estas estructuras de primer orden rigen el emplazamiento del EPSD y se encuentran asociadas a un régimen compresivo contemporáneo. Las observaciones petrográficas en las unidades félsicas no señalan foliación magmática, sin embargo, en las muestras de la Unidad Diorita-Norita, los minerales máficos sí muestran una orientación asociada a foliación.

La mayor evidencia para interpretar las condiciones de emplazamiento se refiere a la presencia frecuente de zonas con metamorfismo de contacto que presentan una asociación de andalucita, biotita, plagioclasa y cuarzo, con porfiroblastos alargados y asociados a un evento de deformación relativamente contemporáneo (Figura 52). En todo caso, esta asociación mineralógica de contacto sugiere condiciones de emplazamiento con una baja presión <4.5 kb y relativa alta temperatura >550 – 800 °C, por lo que se determina que el emplazamiento del EPSD se llevó a cabo en condiciones de corteza superior.

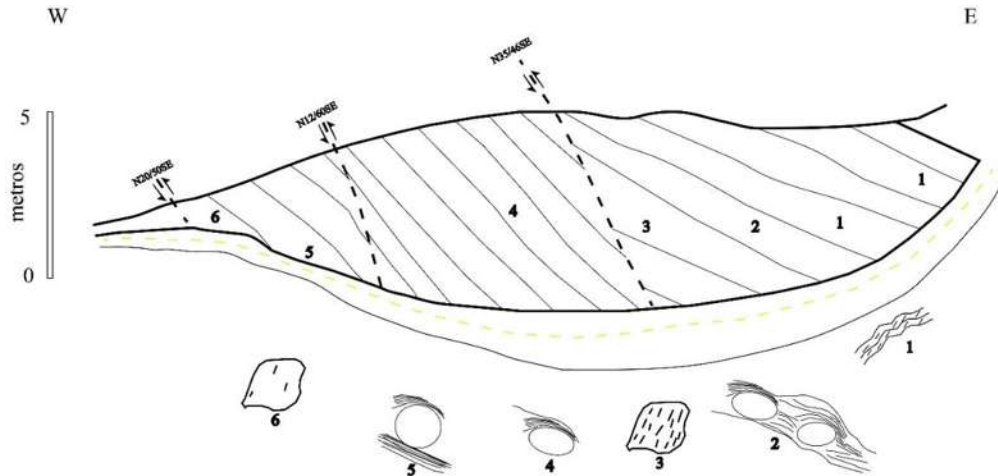
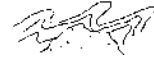


Figura 52: Esquema de perfil realizado en campo; afloramiento de la evidencia del metamorfismo de contacto (hornfels) con la generación de porfidoblastos alargados 2 y 4 con la sobresaturación de andalucita 1 y 3 al igual que la evidencia de los clastos rotados en todo el afloramiento como evidencia de un emplazamiento en zona compresiva. Las líneas amarillas representan el trayecto que sigue la carretera, para mayor detalle consultar el apartado de anexos.

A partir de estas evidencias, se procedió a estimar la temperatura con base en los datos obtenidos de los circones. En principio, los cristales de circón para las muestras obtenidas conservan en su mayoría sus dos pirámides y su prisma, se identificaron al menos tres familias de circones que permiten establecer etapas de cristalización correspondientes al EPSD. El predominio de las tipologías de acuerdo a la clasificación de Pupin (1980, 1988) se asocia a tipologías  $G_1$  y  $S_5$ . De acuerdo con este autor, el estimado de temperatura concentraría la etapa de cristalización dentro del rango 600 - 700 °C.

Por otro lado, aplicando el termómetro Ti-in-circón & Zr-in-rutilo de Ferry & Watson (2007) en los cristales de las unidades félsicas, se obtienen temperaturas (promedio) de 760°C con una desviación estándar que va de 42 a 67, estos resultados son consistentes con los obtenidos mediante el análisis tipológico lo que permite interpretar como la temperatura del granitoide. Por otra parte, la temperatura promedio de la unidad máfica es de 747.78 °C, con una desviación estándar de 47.25. Estos datos resultan contrastantes, puesto que se esperaría una temperatura mayor para esta unidad, sin embargo, la temperatura obtenida podría estar asociada con un reajuste térmico relacionado con el magma granítico de temperatura más baja (Figura 53), esto considerando que de acuerdo a la clasificación de Pupin (1980) las tipologías identificadas en la UDN corresponden con temperaturas en el rango de los 850 °C (ver figura 45).

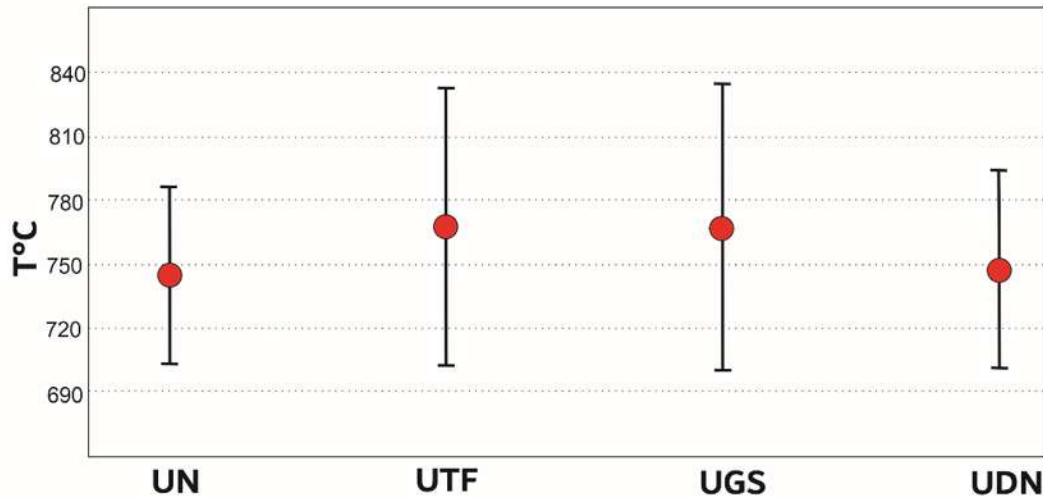
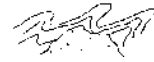


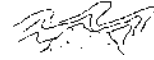
Figura 53. Resultado de termometría (Ti-in-circón & Zircón-in-rutilo de Ferry & Watson (2007) para el EPSD y la UDN.

## 7.6 Modelo de emplazamiento sin-orogénico (D1) del EPSD

En principio se observa que las relaciones de campo del EPSD nos muestran que el plutón se ha emplazado en la corteza superior en un régimen de baja presión y relativa alta temperatura  $>750^{\circ}\text{C}$ , en una roca encajonante que ya presenta evidencias de deformación (figura 54 etapa 3). El plutón corta estructuras de foliación y estructuras de plegamiento de tipo dúctil-frágil y presenta con frecuencia xenolitos de origen metamórfico rotados y parcialmente asimilados.

Por otro lado, el EPSD no presenta evidencias de foliación magmática, presenta una composición y estructuras magmáticas relativamente homogéneas y al parecer se asocia a una etapa de emplazamiento tardo-magmática relativamente extensional relacionada con el emplazamiento de diques andesíticos de composición relativamente alcalina.

Teniendo en consideración las relaciones de campo y los datos antes mencionados, el emplazamiento del EPSD estaría caracterizado por un magmatismo de tipo sin-deformacional, cortando estructuras de tipo orogénico y sucesivamente emplazado probablemente a través de una serie de dilataciones y zonas de cizalla, con zonas de contacto dinámicas con desarrollo de porfiroblastos alargados sin-cinemáticos en las aureolas metamórficas en un régimen aparentemente de tipo transtensional. Su consolidación y proceso tardío de cristalización se asocia al emplazamiento extensional de diques andesíticos en condiciones de sub-sólidos.



Por otro lado, la composición geoquímica del EPSD nos muestra una clara afinidad calcalcalina con firmas de arco magmático, pero también una tendencia con firmas de tipo peraluminosas potencialmente asociada a un proceso de asimilación cortical.

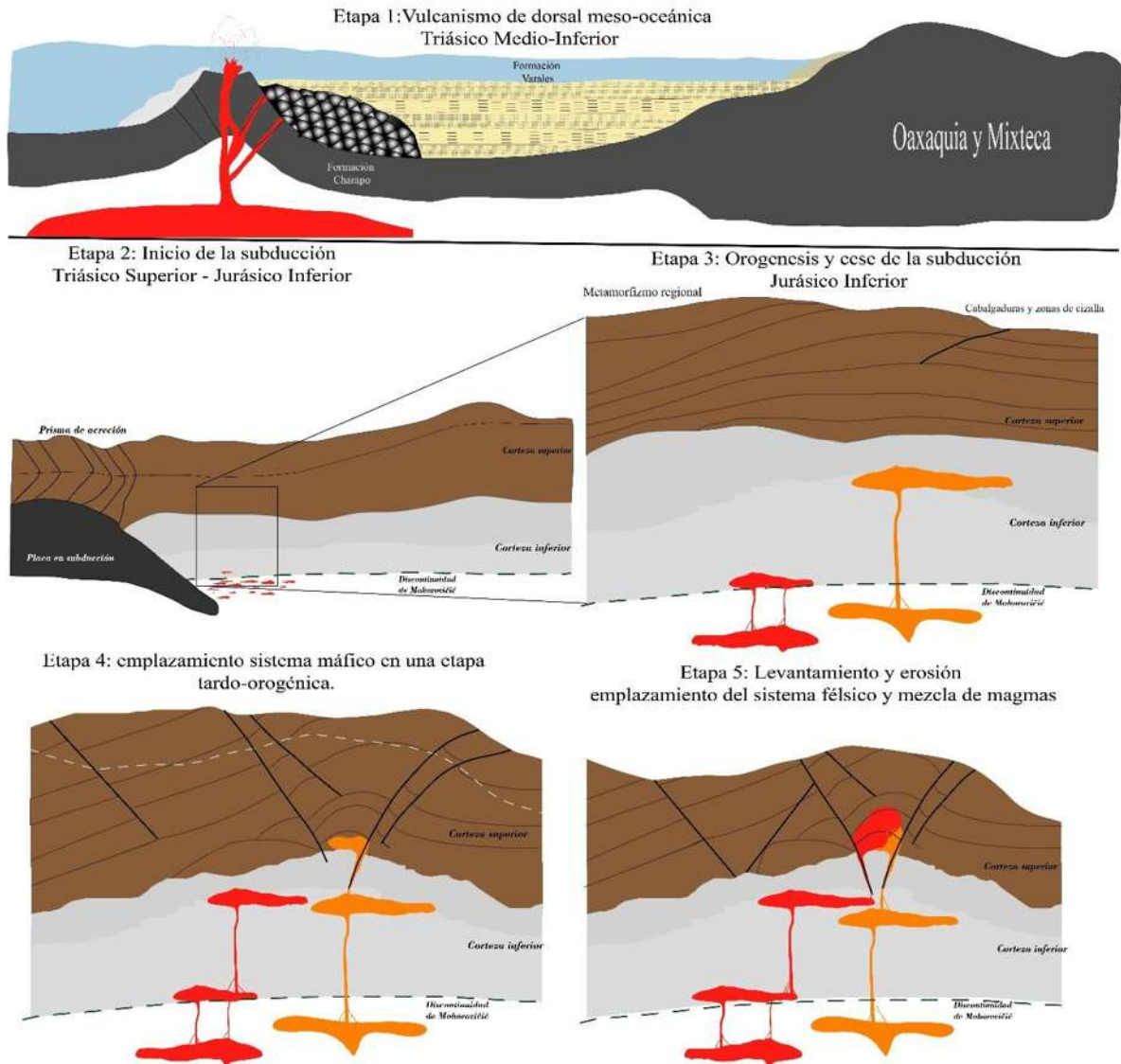


Figura 54: Modelo de emplazamiento del EPSD: Etapa 1- modelo de depósito de la secuencia de intercalación de areniscas, lutitas y horizontes de pedernal correspondiente a la Formación Varales, mientras se desarrolla el vulcanismo de dorsal meso-oceánica que da origen a las lavas almohadilladas; Etapa 2- inicio de la subducción, prisma de acreción e inicio del ascenso de los cuerpos magmáticos; Etapa 3- emplazamiento de los cuerpos magmáticos en una corteza relativamente delgada con un rápido ascenso de la unidad máfica, la acreción del TG genera cabalgaduras y zonas de cizalla; Etapa 4- emplazamiento de la unidad máfica en corteza superior dentro de estructuras compresivas que lo alojan en el anticlinal, a su vez el granitoide asciende con mayor diferenciación, en superficie se generan nuevas estructuras e inicia la erosión; Etapa 5- emplazamiento del granitoide (unidad félsica) por medio de las estructuras de cizalla que fungen como rampas de ascenso, mixing y mingling con la UDN, alojamiento en el anticlinal, levantamiento y erosión de la Formación Varales.



El emplazamiento de los cuerpos magmáticos se rige por un ascenso que se asocia con zonas de extensión o compresión y depende en gran medida de su viscosidad, por consiguiente, un magma de menor viscosidad fluiría con mayor facilidad en un medio rocoso. Sin embargo, en estudios recientes, Ferré et al. (2012) han determinado que el emplazamiento de un cuerpo magmático no depende únicamente de su viscosidad para desplazarse en un medio rocoso, sino de las estructuras que funcionan como rampas en el ascenso de dichos cuerpos generando formas que se rigen por la orientación de las mismas estructuras (figura 54 etapa 4).

Considerando las relaciones estructurales, composición y condiciones de emplazamiento del EPSD, se asocia a un sistema magmático con afinidad de arco que ascendió en una primera fase alrededor de 220-180 Ma (figura 54 etapa 2) a través de la corteza continental relativamente delgada o adelgazada. Este ascenso podría estar relacionado a un régimen compresivo que de manera simultánea deformaba con pliegues y zonas de cizalla a la roca encajonante (figura 54 etapa 5), generando zonas de dilatación y rampas de ascenso para los cuerpos magmáticos que deben su forma en gran medida a las estructuras generadas. El sistema plutónico se mantuvo por un cierto tiempo en la zona de corteza superior y en un ambiente dúctil-frágil para generar las aureolas de contacto alrededor de  $163.12 \pm 0.64$  Ma. Las condiciones de emplazamiento se habrían llevado a cabo en una transición corteza media-superior y en un régimen dúctil-frágil, en el que a medida que el magma asciende debido al gradiente geotérmico, las estructuras se pueden generar a partir de una crenulación de extensión que levanta al orógeno y se genera un colapso que facilitaría el emplazamiento del EPSD.

Por su parte, la distribución de los diques tardo-magmáticos localizados en la porción septentrional y occidental muestra planos NW-SE que indicarían un sistema extensional orientado al NE (esfuerzo principal) asociado a la etapa de relajación del emplazamiento sin-magmático en el cuerpo plutónico que permite el emplazamiento de estos cuerpos tabulares.

## 7.7 Implicaciones tectónicas

El EPSD se encuentra asociado al arco magmático jurásico en la margen cordillerana del occidente de México. Sus firmas deberían ser típicas de granitos cordilleranos, donde las unidades félsicas y la unidad de diorita-norita estarían formando parte de un mismo reservorio. Sin embargo, la firma cortical permite ampliar el criterio a considerar un modelo de emplazamiento del EPSD mucho más complejo, considerando su tendencia geoquímica de relativa peraluminosidad, en particular, los resultados isotópicos que indican un aporte de corteza superior considerable. Es



oportuno mencionar que no se tienen evidencias que permitan considerar a este cuerpo plutónico como generado a partir de un proceso de fusión por anatexis, puesto que no se han identificado migmatitas o estructuras que revelen proceso de fusión parcial cortical.

Basado en los datos obtenidos, geoquímicos, geocronológicos, isotópicos y petrográficos del EPSD, se puede correlacionar en el contexto del Terreno Guerrero, que ha sido interpretado como un proceso de acreción jurásica de la secuencia sedimentaria triásico-jurásica de la cuenca del Abanico Submarino Potosino, con estructuras de plegamiento con vergencia hacia el continente, que genera un acortamiento y un prisma de acreción y metamorfismo regional (Centeno-García et al., 2008; 2011). Es decir, el magmatismo jurásico se asocia con un proceso de subducción en lo que se ha denominado el arco magmático jurásico.

Con la finalidad de comparar los resultados geoquímicos del EPSD con otros ensambles contemporáneos en la margen continental mexicana, se han consultado las bases de datos de trabajos previos. Es decir, se plantea analizar la relación que guarda con otros cuerpos plutónicos jurásicos entre 150 – 170 Ma en el occidente de México: El Complejo Sonobari (Sarmiento-Villagrana et al., 2017; Vega-Granillo et al., 2012); el ensamble plutónico de Tumbiscatío (Guevara-Alday 2020); Isla María (Pompa-Mera et al., 2013) y Cuale (Valencia et al., 2013). La distribución espacial y una breve descripción de estos cuerpos plutónicos ya se han expuesto en el capítulo 3 de este documento. Cabe mencionar que en este apartado solo se consideran los datos de rocas graníticas o protolitos graníticos, puesto que para el caso del cuerpo riolítico de Cuale no pudieron obtenerse los datos geoquímicos que de acuerdo al autor (Bissig et al., 2008) se consideran alterados por su asociación al yacimiento de sulfuros masivos.

En la figura 55, se presenta el diagrama TAS modificado por Wilson (1989), donde se observa que la mayoría de los cuerpos plutónicos grafican dentro del campo de la granodiorita – granito. En la figura 55a, se observa que de acuerdo con el diagrama de saturación de alúmina (ASI) de Shand (1927) que los mismos cuerpos plutónicos muestran una relativa peraluminosidad.

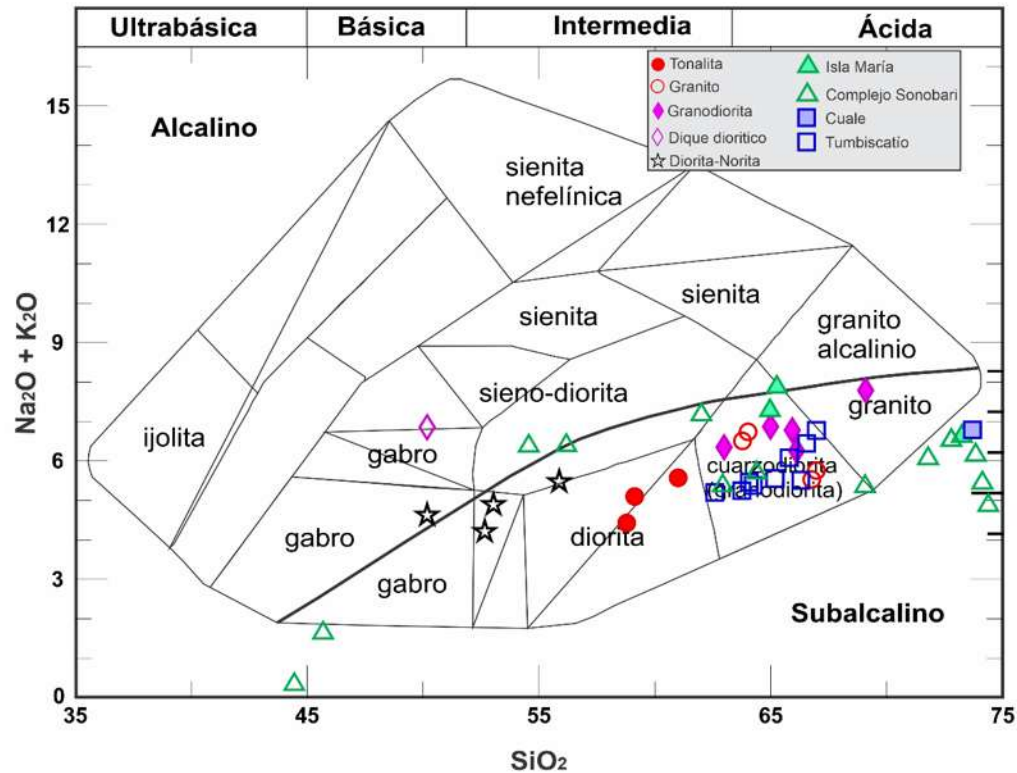
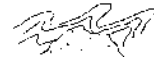
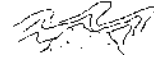


Figura 55: Diagrama TAS modificado por Wilson (1989) para rocas plutónicas del EPSD comparadas con la franja plutónica jurásica (FPJ): Complejo Sonobari (Sarmiento-Villagrana et al., 2017; Vega-Granillo et al., (2012); el ensamble plutónico de Tumbiscatio (Guevara-Alday 2020); Isla María (Pompa-Mera et al., 2013) y Cuale (Valencia et al., 2013).

El EPSD tiene una mayor similitud con las muestras del complejo Sonobari, el Ensamble de Tumbiscatio y las Islas Marías en sus variaciones de granito y granodiorita, mientras que las muestras de la diorita y la tonalita se aíslan de todas las muestras, esto se cree que puede estar estrechamente relacionado por una mayor asimilación de material pelítico, como se puede observar en la figura 23-D2.

Por otra parte, como se puede observar en la figura 56A, la muestra del granito de dos micas de Cuale se muestra relativamente menos peraluminoso que los demás cuerpos plutónicos. El EPSD, de acuerdo con su carácter peraluminoso, está asociado con los granitos tipo S, ya que, de acuerdo con Chappell (1999); Clemens y Stevens (2012), una de las características distintivas es el comportamiento del  $P_2O_5$  que se distribuye de forma moderada al disminuir la  $SiO_2$ , lo que resulta concordante con los resultados del EPSD (Figura 33). Los granitos tipo S poseen un factor relevante: la variación en la saturación de aluminio y su relación A/CNK, que se encuentra constante o que disminuye ligeramente al aumentar el  $SiO_2$ , lo cual se puede observar en la muestra de la granodiorita y granito de las unidades del EPSD (Figura 36). En contraste con los granitos tipo I, que



en general tiende a disminuir el  $P_2O_5$  al aumentar la  $SiO_2$ , además de cambiar gradualmente del campo metaluminosos al campo peraluminosos con el aumento de  $SiO_2$  en los diagramas de saturación de alúmina.

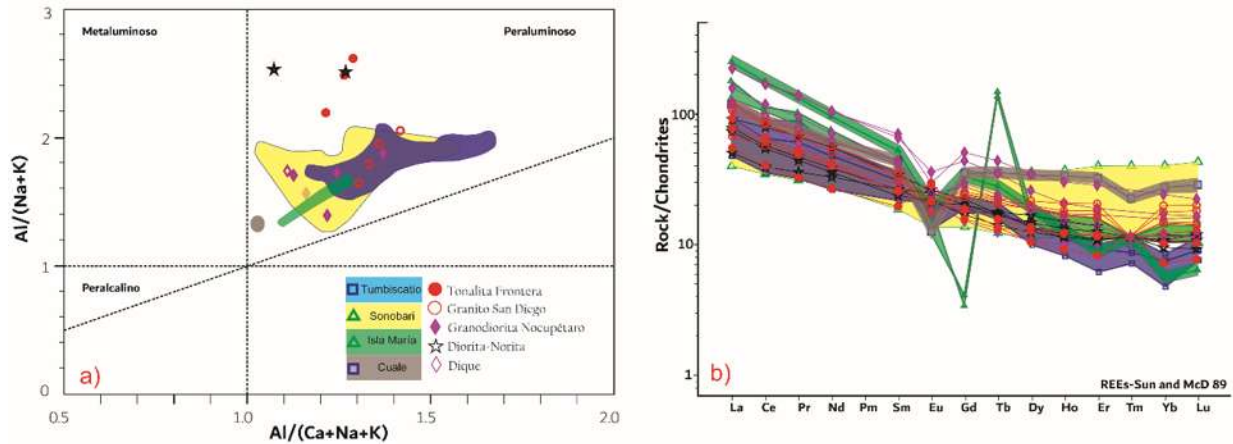


Figura 16: B) Diagramas de clasificación geoquímica; A) Índice de saturación de alúmina o Shand's index de Maniar & Piccoli (1989) para rocas plutónicas del EPSD comparadas con la franja plutónica jurásica (FPI). Simbología como en Figura 55. Patrones normalizados con condritas para REE Sun y McDonough (1989). La simbología corresponde con la figura 54.

En la figura 56b, se proyectan los elementos traza donde se observa una buena correlación con los cuerpos plutónicos. La variación granodiorítica muestra enriquecimiento de LREE, sin embargo, las unidades de Tonalita y Granito del EPSD muestran mayor similitud con el Ensamble Plutónico de Tumbiscatío y una de las muestras de las Islas Marías.

Por otro lado, en la figura 57a, se presenta el diagrama de la relación Rb vs Y+Nb de discriminación tectónica de Pearce et al. (1984). Gran parte de las muestras grafican dentro de los granitos de arco volcánico (VAG), siguiendo una tendencia casi vertical y cercanos a la línea de transición con los granitos de intraplaca (WPG). Las muestras que presentan un comportamiento muy similar con el EPSD corresponden a las del Ensamble de Tumbiscatío y las Islas Marías.

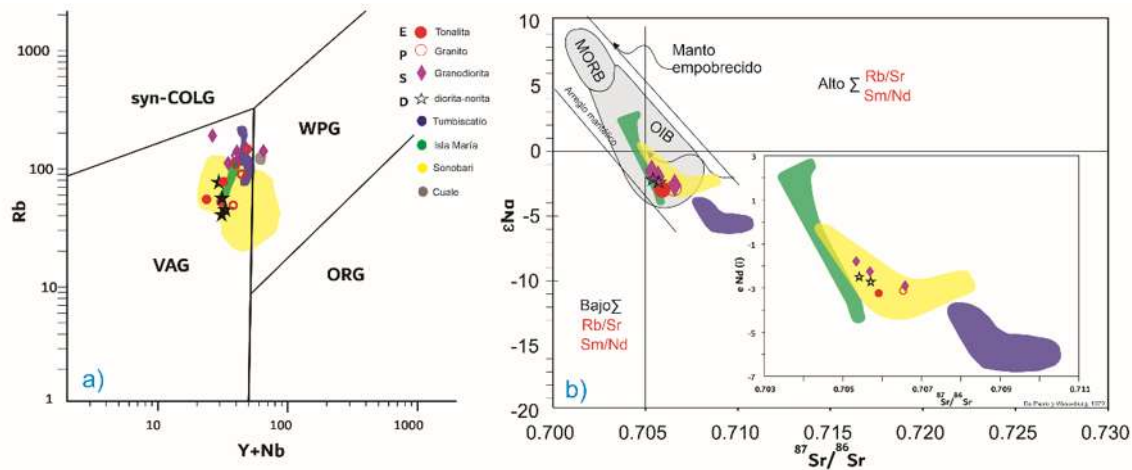
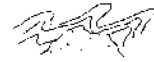


Figura 57: Diagrama de discriminación tectónica para granitoides de Pearse et al. (1984) relación Rb vs Y+Nb. Parámetros iniciales de  $\epsilon Nd_i$  vs  $^{87}Sr/^{86}Sr_i$ . Las bases de datos corresponden con las antes mencionadas en la figura 55.

En la figura 57b, se presenta el diagrama  $\epsilon Nd_i$  vs  $^{87}Sr/^{86}Sr_i$  que permite apreciar las muestras bien agrupadas en la transición del arreglo del manto con una mayor contaminación en las muestras Tumbiscatío y el Complejo Sonobari, mientras que las muestras de la Isla María registran firmas que parten de un manto empobrecido en el campo OIB y firmas que reflejan su contaminación cortical.

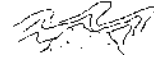
En síntesis, el EPSD muestra una buena correlación geocronológica y composicional con los plutones jurásicos de occidente de México contenidos dentro del Terreno Guerrero. Por lo tanto, en este trabajo se propone el origen en un proceso de subducción o de arco magmático para todos los cuerpos magmáticos jurásicos. Sin embargo, las variaciones composicionales y su relativa peraluminosidad dan evidencia de contaminación cortical, por lo que se sugiere un proceso de emplazamiento mucho más complejo que en otras regiones de magmatismo cordillerano que podría asociarse a una etapa acrecional debido a que el EPSD cortan un sistema de plegamiento, como también ha sido reportado en otros trabajos (Guevara-Alday, 2020).

Se propone también que el emplazamiento el EPSD se llevó a cabo a través de estructuras compresivas y de plegamiento, así como posibles zonas de cizalla que fungen como rampas en el ascenso de los magmas en un ambiente dúctil-frágil. Las evidencias que demuestran este emplazamiento sin-orogénico radican en su asociación con grandes estructuras que pueden formar parte de una cizalla NNW consistentes con la dirección de acreción del TG, esta orientación se ve reflejada en la forma del EPSD y en las zonas de contacto (porfiroblastos alargados en aureola metamórfica).



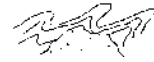
Este proceso sin-deformacional o sin-orogénico se asociaría al proceso acortamiento jurásico durante el proceso la acreción del TG asociado a la generación de prismas de acreción dentro de una corteza en ese momento delgada que permite un rápido ascenso del EPSD. La amalgamación del TG genera cabalgaduras y zonas de cizalla que forman las rampas de ascenso para los cuerpos magmáticos de tipo “sin-orogénico”.

Posterior al proceso de la amalgamación del orógeno jurásico, se llevaría a cabo el inicio de un proceso de subducción asociado con el emplazamiento de las sucesiones volcánico-sedimentarias del Arco Amengarícuaro durante el Aptiano ~130 Ma, para sucesivamente ser deformadas con un sistema de plegamientos de anticlinales y sinclinales con orientación NNW que re-orienta todas las secuencias incluyendo el Complejo Arteaga y el EPSD.



## Conclusiones

- 1) El área de San Diego Curucupatzeo alberga unidades del Triásico al Pleistoceno. La exposición del EPSD cubre un área de 12.86 % del área cartografiada, con una extensión de 86.84 km<sup>2</sup> y una orientación N-S donde su exposición se encuentra relacionada con dominios morfoestructurales de pendientes suaves y ventanas tectónicas que rigen la transición de la Depresión del Balsas.
- 2) Las estructuras de primer orden siguen una tendencia NNW-SSE asociadas al emplazamiento del EPSD y a la generación de anticlinales y sinclinales que desarrolla estructuras de segundo orden de forma oblicua.
- 3) Las estructuras de D<sub>1</sub> indican un emplazamiento del EPSD en un ambiente dúctil-frágil asociado con un sistema de pliegues y zonas de cizalla y a su vez genera una aureola de metamorfismo de contacto con asociación andalucita, plagioclasa, biotita y cuarzo como evidencia de una baja presión (<4 kbar) y alta temperatura > 550 – 800 °C, consistente con el termómetro Ti-*in*- circon entre 773.6-775.8 °C.
- 4) La deformación D<sub>2</sub> (post-magmática) consiste en una cizalla tipo dúplex que genera anticlinales y sinclinales NNO asociados a la orogenia Laramide y texturas tipo “kink band” en los filosilicatos y el cuarzo, así como plegamiento compartido del encajonante y el EPSD.
- 5) Las variaciones petrológicas muestran unidades félsicas de granito, granodiorita y tonalita con asociaciones mineralógicas de Kfs + Plg + Qz + Bt ± Ms y de una unidad máfica diorita-norita con Plg + Cpx + Hbl.
- 6) El contenido de sílice, álcalis y alúmina de las unidades félsicas, máficas y el dique, muestran firmas calciálicas pero con tendencias peraluminosas.
- 7) Los elementos traza del EPSD muestran un registro dentro del campo de tipo arco volcánico (VAG) con tendencia a los granitos de tipo sin-colisionales (Syn-COLG) y una muestra dentro del campo de los granitos de tipo intra-placa (WPG).
- 8) Las formas de los cristales de circones tiene un predominio de tipologías tipo G1 y S5 con temperaturas promedio de 600 – 700 °C de acuerdo con la clasificación de Pupin (1980). La isotopía U-Pb registra dos etapas de cristalización 220-180 Ma como un primer pulso magmático (precoz) y 170 – 140 Ma que condiciona la etapa de cristalización. Finalmente muestra una etapa tardía de recristalización comprendida entre 130 y 120 Ma. La edad de cristalización del EPSD se considera 163.12 ± 0.64 Ma.



- 9) El EPSD muestra gran afinidad geoquímica, cronológica y mineralógica con los cuerpos plutónicos jurásicos reportados en el Terreno Guerrero.
- 10) Se propone que el origen tectónico del EPSD sea un arco magmático, así como con un emplazamiento asociado con estructuras de plegamiento y zonas de cizalla que sirven como rampa de ascenso durante la acreción del Terreno Guerrero al continente durante el Jurásico Medio.

## Referencias

- Arrieta-García, GF, 2016, Caracterización geoquímica e isotópica de las rocas intrusivas y del basamento del área de Mazatlán, Sinaloa [M.Sc. tesis]: Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, 146 p.
- Bento Dos Santos, T., Tassinari, C., Fonseca, P. E., & Munhá, J. (2014). Geodynamic evolution of the Ribeira Fold Belt (SE Brazil): preliminary geochronological and geochemical evidence for diachronic collision, slab break-off and underplating. *Especial I*, 101, 49–52. <http://www.ineg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/185>
- Bissig, T., Mortensen, J. K., Tosdal, R. M., & Hall, B. V. (2008). The Rhyolite-Hosted Volcanogenic Massive Sulfide District of Cuale, Guerrero Terrane, West-Central Mexico: Silver-Rich, Base Metal Mineralization Emplaced in a Shallow Marine Continental Margin Setting. *Economic Geology*, 103(1), 141–159. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.103.1.141>
- Campa, M. F., & Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040–1051. <https://doi.org/10.1139/e83-094>
- Campa Uranga, M. F., Ramírez E, J., & Coney, P. J. (1981). Conjuntos estratotectónicos de la Sierra Madre del Sur, región comprendida entre los estados de Guerrero, Michoacán, México y Morelos. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 42(1–2), 26–67.
- Castro, A., Moreno Ventas, I., & De La Rosa, J. D. (1994). Rocas plutónicas híbridas y mecanismo de hibridación en el Macizo Ibérico Hercínico. *Boletín Geológico y Minero*, 105(3), 285–305.
- Castro Dorado, A. (2015). *Petrografía de Rocas Ígneas y Metamórficas* (M. J. López Raso, A. Cerviño González, P. Paz Otero, & C. Lara Carmona, Eds.; 1st ed.). Ediciones Paraninfo, SA.
- Centeno Garcia, E., Corona Chavez, P., Talavera Mendoza, O. & Iriondo, A. (2003, April 4-6). Geology and tectonic evolution of the western Guerrero terrane a transect from Puerto Vallarta to Zihuatanejo, Mexico. *Guidebook of the field trips of the 99th. Geological Society of America Cordilleran, Field Trip 9*, 201-228.
- Centeno-García, E. (2017). Mesozoic tectono-magmatic evolution of Mexico: An overview. *Ore Geology Reviews*, 81, 1035–1052. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.010>
- Centeno-García, E., Busby, C., Busby, M., & Gehrels, G. (2011). Evolution of the Guerrero composite terrane along the Mexican margin, from extensional fringing arc to contractional continental arc. *Bulletin of the Geological Society of America*, 123(9–10), 1776–1797. <https://doi.org/10.1130/B30057.1>
- Centeno-García, E., Guerrero-Suastegui, M., & Talavera-Mendoza, O. (2008). The Guerrero Composite Terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra-subduction zone. *Special Paper of the Geological Society of America*, 436, 279–308. [https://doi.org/10.1130/2008.2436\(13\)](https://doi.org/10.1130/2008.2436(13))

- Centeno-García, E., Ruíz, J., Coney, P. J., Patchett, P. J., & Ortega-Gutiérrez, F. (1993). Guerrero terrane of Mexico: Its role in the Southern, Cordillera from new geochemical data. *Geology*, 21(5), 419–422. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0419:GTOMIR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0419:GTOMIR>2.3.CO;2)
- Corona Chávez, P. (1999). El basamento litológico y tectónico del estado de Michoacán. Carta geológica de Michoacán, escala 1:250 000. *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 10–26.
- Damon, P. E. (1979). K-Ar data of samples from Michoacán, México Cooperative research projet with CRM. Tucson, University of Arizona, Isotope Geothemistry Lab. *Sociedad Geológica Mexicana. X Convención Geológica Nacional.*, 83.
- Espinoza Maya, A., & Bollo Manent, M. (2017). La Cartografía de las Unidades Inferiores de la Regionalización Físico-Geográfica (RFG) de Michoacán. *Terra Digitalis*, 1(1). <https://doi.org/10.22201/IGG.TERRADIGITALIS.2017.1.4>
- Ferré, E. C., Galland, O., Montanari, D., & Kalakay, T. J. (2012). Granite magma migration and emplacement along thrusts. *International Journal of Earth Sciences*, 1673–1688. <https://doi.org/10.1007/s00531-012-0747-6>.
- Ferry, J.M. & Watson, E.B., 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology* (154): 429–437.
- Gómez-Vasconcelos, M., Pantoja, U., Garduño Monroy, V., Hernandez-Madriral, V., & Layer, P. (2015). La Caldera de Villa Madero: vulcanismo explosivo del cuaternario en el borde sureste del campo volcánico Michoacán-Guanajuato. *Ciencia Nicolaita*, 65, 12–35.
- Groulier, P. A., Indares, A., Dunning, G., Moukhsil, A., & Jenner, G. (2018). Syn-orogenic magmatism over 100 m.y. in high crustal levels of the central Grenville Province: Characteristics, age and tectonic significance. *Lithos*, 312–313, 128–152. <https://doi.org/10.1016/J.LITHOS.2018.04.025>
- Guevara-Alday, DA, 2020, *Petrogénesis magmática del Ensamble plutónico de Tumbiscatío, Michoacán*. [Tesis de maestría]: Morelia Mich, *Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra*, 112 pag.
- Harrison, M. T., Lovera, O. M., & Grove, M. (1997). New insights into the origin of two contrasting Himalayan . *Geology*, 25(10), 899–902.
- Miller, J. S., Matzel, J. E. P., Miller, C. F., Burgess, S. D., & Miller, R. B. (2007). Zircon growth and recycling during the assembly of large, composite arc plutons. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167(1–4), 282–299. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.04.019>
- Montes Alva, O., Garduño Monroy, V. H., Cervantes Solano, M., Gogichaishvili, A., Morales Contreras, A. M., Soler Arechalde, Maciel Peña, R., Alva Valdivia, L., Rosas Elguera, J., & Urrutia Fucugauchi, J. (2015). Estudio paleomagnético de la secuencia volcánica Mil Cumbres (Michoacán, México). *LATINMAG Letters*, 5(5), 1–19.

- Montiel Escobar, J. E., Corona Chávez, P., & Salinas Prieto, J. C. (2015). Yacimientos de oro en Michoacán. *Ciencia Nicolaita*, 65, 36–55. <https://doi.org/10.35830/cn.vi65.268>
- Montiel Escobar, J. E., Librado Flores, José., Salazar Reyes, Joaquín., Sánchez Garrido, Eduardo., & Bustamante García, J. (1998). *Informe final complementario a la cartografía Geológico-Minera y Geoquímica de la Carta Morelia (E14-1) esc.1:250,000*.
- Munguía Rojas, Pedro., & Rosales Díaz, U. (2007). *Informe de la carta Geológico-Minera Carácuaro E14-A43 escala 1:50,000 Estado de Michoacán*.
- Ortiz-Gómez, J., & Molina-Garza, R. (2019). Fábrica magnética e implicaciones de emplazamiento del Granito de Comanja, Centro de México. In *Latinmag Letters* (Vol. 9).
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño, V. H., Tibaldi, A., & Vezzoli, L. (1991). Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacán, México. *Geological Society of America Map and Chart Series MCH072*.
- PEARCE, J. A., HARRIS, N. B. W., & TINDLE, A. G. (1984). Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4), 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Pompa-Mera, v., 2014, Estudio geológico, geoquímico y geocronológico de la Isla María Madre, Nayarit [Ph.D. tesis]: México DF, Universidad Nacional Autónoma de México, 270 pag.
- Pompa-Mera, V., Schaaf, P., Hernández-Treviño, T., Weber, B., Solís-Pichardo, G., Villanueva-Lascurain, D., & Layer, P. (2013). Geology, geochronology, and geochemistry of Isla María Madre, Nayarit, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30(1), 1–23. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57226227003>
- Pupin, J. P., & Stabilit, R. (1980). Zircon and Granite Petrology. In *Contrib. Mineral. Petrol* (Vol. 73).
- Pupin, J.-P. (1988). *Granites as indicators in paleogeodynamics* (Vol. 43, Issue 2).
- Ramírez-Peña, C. F., Chávez-Cabello, G., Fitz-Díaz, E., Aranda-Gómez, J. J., & Valdés, R. S. (2019). Uplift and syn-orogenic magmatism in the Concepción del Oro Block: A thick-skinned (Laramide style?) contractional structure in the Mexican Fold-Thrust Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 93, 242–252. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2019.04.012>
- Resendiz Zarco, E., 2020. *Análisis de Geología Económica en el municipio de Senguio, Michoacán* [Tesis de licenciatura] Tacámbaro Mich, Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro, 96 pag.
- Romero Rojas, P., González Partida, E., Tapia Cruz, M. A., Farfán Panamá, J., Romero Rojas, W., & González Ruiz, L. (2015). Comportamiento geoquímico de las rocas intrusivas relacionadas a mineralizaciones polimetálicas de la región de Curucupatzeo, Mich. México. *Geomimet*, 42(313), 29–32.
- Sabanero Sosa, M. A., Campa Uranga, M. F., Chacón, S. J. E., Montiel Escobar, J. E., & De La Teja Segura, M. A. (1997). *Informe final de la carta geológica minera y geoquímica Acuyo escala 1:50 000*. Consejo de Recursos Minerales.

- Sarmiento Villagrana, A., Vega Granillo, R., Talavera Mendoza, O., & Vidal Solano, J. R. (2016). New age constraints on magmatism and metamorphism of the Western Sonobari Complex and their implications for an earliest Late Cretaceous orogeny on northwestern México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(2), 170–182.
- Sarmiento-Villagrana, A., Vega-Granillo, R., Talavera-Mendoza, O., Salgado-Souto, S. A., & Gómez-Landa, J. R. (2017). Geochemical and isotopic study of Mesozoic magmatism in the Sonobari Complex, western Mexico: Implications for the tectonic evolution of southwestern North America. *Geosphere*, 14(1), 304–324. <https://doi.org/10.1130/GES01540.1>
- Schaaf, P., Díaz-López, F., Gutiérrez-Aguilar, F., Solís-Pichardo, G., Hernández-Treviño, T., Arrieta-García, G., Solari, L., & Ortega-Obregón, C. (2020). Geochronology and geochemistry of the Puerto Vallarta igneous and metamorphic complex and its relation to Cordilleran arc magmatism in northwestern Mexico. *Lithos*, 352–353. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105248>
- Shand, S. (1927). Eruptive Rocks: their Genesis, Composition, Classification, and their Relation to Ore-Deposits; with a Chapter on Meteorites. *Nature*, 120(3033), 872. <https://doi.org/10.1038/120872a0>
- Talavera Mendoza, O. (2000). Mélanges in southern Mexico: geochemistry and metamorphism of Las Ollas complex (Guerrero terrane). *Canadian Journal of Earth Sciences*, 37(9), 1309–1320. <https://doi.org/10.1139/e00-033>
- Tapia Cruz, MÁ, 2012, *Reconocimiento Geológico en la Región de San Diego Curucupatzco y Tepetates, Michoacán, México*. [Tesis de maestría] Santiago de Chile, Universidad de Chile 161 pag.
- Tapia Cruz, M. Ángel., & Rosales Díaz, Uver. (2008). *Carta Geológico-Minera Villa Madero E14-A33 escala 1:50,000*.
- Valencia, V. A., Righter, K., Rosas-Elguera, J., López-Martínez, M., & Grove, M. (2013). The age and composition of the pre-Cenozoic basement of the Jalisco Block: implications for and relation to the Guerrero composite terrane. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166, 801–824. <https://doi.org/10.1007/s00410-013-0908-z>
- Vega-Granillo, R., Salgado-Souto, S., Herrera-Urbina, S., Valencia, V., Ruiz, J., Meza-Figueroa, D., & Talavera-Mendoza, O. (2008). U-Pb detrital zircon data of the Rio Fuerte Formation (NW Mexico): Its peri-Gondwanan provenance and exotic nature in relation to southwestern North America. *Journal of South American Earth Sciences*, 26(4), 343–354. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2008.08.011>

**Anexo de resultados isotopicos: técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo por ablación láser (LA-ICP-MS).  $\pm 2\sigma$  abs= error absoluto considerando dos desviaciones estándar; Rho =Coeficiente de correlación de error.**

| CORRECTED RATIOS2 |         |            |        |          |          |        |          |          |          |        |          | CORRECTED AGES (Ma) |        |          |        |           |        |          |        |      |        |
|-------------------|---------|------------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|--------|----------|---------------------|--------|----------|--------|-----------|--------|----------|--------|------|--------|
| Muestra           | U (ppm) | 1 Th (ppm) | 1 Th/U | 207Pb/20 |          | 207Pb/ |          | 208Pb/23 |          | Rho    |          | 206Pb/23            |        | 207Pb/23 |        | 207Pb/206 |        | Best age |        |      |        |
|                   |         |            |        | 6Pb      | ±2se abs | 235U   | ±2se abs | 206Pb/23 | ±2se abs | 2Th    | ±2se abs | (6/8v7/5 )          | 8U     | ±2se     | 5U     | ±2se      | Pb     | ±2se     | (Ma)   | ±2se | Disc % |
| Formación Varales |         |            |        |          |          |        |          |          |          |        |          |                     |        |          |        |           |        |          |        |      |        |
| CSD-21-01_Zrn-01  | 260.0   | 35.8       | 0.14   | 0.0614   | 0.0027   | 0.9361 | 0.0478   | 0.1111   | 0.0040   | 0.0441 | 0.0043   | 0.51                | 678.6  | 23.1     | 668.1  | 24.6      | 627.5  | 94.4     | 678.6  | 23.1 | -1.6   |
| CSD-21-01_Zrn-02  | 197.8   | 71.8       | 0.36   | 0.0728   | 0.0031   | 1.7869 | 0.0795   | 0.1756   | 0.0041   | 0.0583 | 0.0037   | 0.13                | 1042.7 | 22.4     | 1038.7 | 29.1      | 1015.2 | 75.9     | 1042.7 | 22.4 | -0.4   |
| CSD-21-01_Zrn-03  | 281.8   | 147.3      | 0.52   | 0.0809   | 0.0030   | 2.3138 | 0.0914   | 0.2061   | 0.0045   | 0.0633 | 0.0032   | 0.16                | 1207.7 | 24.1     | 1214.9 | 28.1      | 1210.3 | 74.6     | 1207.7 | 24.1 | 0.6    |
| CSD-21-01_Zrn-04  | 216.7   | 38.5       | 0.18   | 0.0813   | 0.0027   | 2.4343 | 0.0892   | 0.2168   | 0.0049   | 0.0648 | 0.0035   | 0.24                | 1264.6 | 25.7     | 1250.8 | 26.4      | 1230.3 | 60.2     | 1264.6 | 25.7 | -1.1   |
| CSD-21-01_Zrn-05  | 227.4   | 187.1      | 0.82   | 0.0522   | 0.0070   | 0.2588 | 0.0307   | 0.0364   | 0.0014   | 0.0110 | 0.0009   | -0.33               | 230.8  | 8.9      | 232.6  | 25.1      | 152.6  | 374.8    | 230.8  | 8.9  | 0.8    |
| CSD-21-01_Zrn-06  | 552.1   | 502.5      | 0.91   | 0.0518   | 0.0045   | 0.2569 | 0.0239   | 0.0361   | 0.0013   | 0.0108 | 0.0007   | 0.26                | 228.3  | 8.1      | 231.5  | 19.3      | 225.7  | 218.2    | 228.3  | 8.1  | 1.4    |
| CSD-21-01_Zrn-07  | 237.6   | 27.1       | 0.11   | 0.0718   | 0.0025   | 1.6113 | 0.0609   | 0.1625   | 0.0034   | 0.0557 | 0.0035   | 0.18                | 970.4  | 18.9     | 972.9  | 23.7      | 966.6  | 72.8     | 970.4  | 18.9 | 0.3    |
| CSD-21-01_Zrn-08  | 152.3   | 37.8       | 0.25   | 0.0717   | 0.0027   | 1.6463 | 0.0661   | 0.1662   | 0.0037   | 0.0530 | 0.0034   | 0.22                | 991.1  | 20.6     | 986.0  | 25.3      | 961.0  | 77.3     | 991.1  | 20.6 | -0.5   |
| CSD-21-01_Zrn-09  | 165.5   | 60.1       | 0.36   | 0.0773   | 0.0077   | 1.0335 | 0.1122   | 0.0955   | 0.0036   | 0.0398 | 0.0060   | 0.07                | 587.7  | 21.0     | 715.6  | 56.6      | 1084.3 | 215.3    | 587.7  | 21.0 | 17.9   |
| CSD-21-01_Zrn-10  | 323.6   | 175.6      | 0.54   | 0.0660   | 0.0051   | 0.4496 | 0.0335   | 0.0489   | 0.0014   | 0.0179 | 0.0012   | -0.16               | 307.7  | 8.3      | 375.3  | 23.5      | 747.4  | 176.1    | 307.7  | 8.3  | 18.0   |
| CSD-21-01_Zrn-11  | 691.7   | 37.6       | 0.05   | 0.0563   | 0.0038   | 0.4074 | 0.0264   | 0.0523   | 0.0019   | 0.0223 | 0.0025   | 0.15                | 328.7  | 11.5     | 346.6  | 19.1      | 449.1  | 147.0    | 328.7  | 11.5 | 5.2    |
| CSD-21-01_Zrn-12  | 270.8   | 298.2      | 1.10   | 0.0596   | 0.0034   | 0.6206 | 0.0333   | 0.0755   | 0.0032   | 0.0241 | 0.0014   | 0.29                | 469.0  | 19.0     | 489.6  | 20.9      | 573.3  | 118.9    | 469.0  | 19.0 | 4.2    |
| CSD-21-01_Zrn-13  | 153.1   | 118.7      | 0.77   | 0.0671   | 0.0150   | 0.5805 | 0.1397   | 0.0621   | 0.0053   | 0.0217 | 0.0034   | 0.25                | 388.2  | 32.2     | 460.9  | 89.0      | 765.2  | 507.2    | 388.2  | 32.2 | 15.8   |
| CSD-21-01_Zrn-14  | 191.4   | 103.2      | 0.54   | 0.0717   | 0.0072   | 0.5056 | 0.0417   | 0.0512   | 0.0025   | 0.0160 | 0.0017   | -0.30               | 322.1  | 15.2     | 414.1  | 28.1      | 922.9  | 216.5    | 322.1  | 15.2 | 22.2   |
| CSD-21-01_Zrn-15  | 187.6   | 98.8       | 0.53   | 0.0807   | 0.0044   | 1.8105 | 0.1265   | 0.1594   | 0.0052   | 0.0509 | 0.0030   | 0.68                | 953.3  | 28.9     | 1044.9 | 45.6      | 1197.7 | 105.9    | 953.3  | 28.9 | 8.8    |
| CSD-21-01_Zrn-16  | 215.0   | 167.8      | 0.78   | 0.0544   | 0.0036   | 0.4027 | 0.0297   | 0.0524   | 0.0017   | 0.0162 | 0.0009   | 0.25                | 329.4  | 10.5     | 341.1  | 21.4      | 327.1  | 173.1    | 329.4  | 10.5 | 3.4    |
| CSD-21-01_Zrn-17  | 150.1   | 82.5       | 0.55   | 0.0662   | 0.0055   | 0.5469 | 0.0490   | 0.0576   | 0.0020   | 0.0233 | 0.0017   | -0.13               | 361.0  | 11.9     | 439.9  | 31.5      | 796.4  | 194.0    | 361.0  | 11.9 | 17.9   |
| CSD-21-01_Zrn-18  | 406.0   | 233.2      | 0.57   | 0.0519   | 0.0031   | 0.2749 | 0.0167   | 0.0383   | 0.0011   | 0.0120 | 0.0008   | 0.15                | 242.1  | 6.8      | 245.8  | 13.4      | 220.5  | 145.8    | 242.1  | 6.8  | 1.5    |
| CSD-21-01_Zrn-19  | 119.7   | 50.9       | 0.43   | 0.0748   | 0.0032   | 1.8147 | 0.0803   | 0.1744   | 0.0039   | 0.0550 | 0.0028   | 0.07                | 1036.4 | 21.6     | 1047.5 | 29.1      | 1041.4 | 87.9     | 1036.4 | 21.6 | 1.1    |
| CSD-21-01_Zrn-20  | 117.6   | 42.9       | 0.36   | 0.0795   | 0.0059   | 1.1356 | 0.0875   | 0.1039   | 0.0053   | 0.0138 | 0.0015   | 0.49                | 636.7  | 30.8     | 765.5  | 43.3      | 1141.7 | 154.9    | 636.7  | 30.8 | 16.8   |
| CSD-21-01_Zrn-21  | 175.0   | 82.9       | 0.47   | 0.0798   | 0.0049   | 1.1048 | 0.0623   | 0.0992   | 0.0032   | 0.0212 | 0.0015   | -0.15               | 609.5  | 18.7     | 753.8  | 30.4      | 1167.6 | 121.3    | 609.5  | 18.7 | 19.1   |
| CSD-21-01_Zrn-22  | 69.3    | 26.4       | 0.38   | 0.0773   | 0.0040   | 1.6911 | 0.0897   | 0.1568   | 0.0045   | 0.0519 | 0.0051   | 0.23                | 938.8  | 25.1     | 1002.7 | 34.7      | 1111.6 | 106.9    | 938.8  | 25.1 | 6.4    |
| CSD-21-01_Zrn-23  | 140.2   | 50.4       | 0.36   | 0.0668   | 0.0042   | 0.6308 | 0.0498   | 0.0681   | 0.0028   | 0.0269 | 0.0021   | 0.56                | 424.3  | 17.0     | 492.9  | 30.1      | 787.6  | 130.0    | 424.3  | 17.0 | 13.9   |
| CSD-21-01_Zrn-24  | 369.7   | 227.1      | 0.61   | 0.0703   | 0.0035   | 1.2030 | 0.0593   | 0.1227   | 0.0034   | 0.0387 | 0.0016   | 0.09                | 745.9  | 19.4     | 801.1  | 27.0      | 926.1  | 101.4    | 745.9  | 19.4 | 6.9    |
| CSD-21-01_Zrn-25  | 103.7   | 42.5       | 0.41   | 0.1049   | 0.0033   | 4.3987 | 0.1656   | 0.3021   | 0.0076   | 0.0904 | 0.0048   | 0.61                | 1700.9 | 37.4     | 1713.9 | 33.5      | 1705.0 | 57.1     | 1705.0 | 57.1 | 0.8    |
| CSD-21-01_Zrn-26  | 276.8   | 41.1       | 0.15   | 0.0803   | 0.0024   | 2.2955 | 0.0739   | 0.2070   | 0.0043   | 0.0664 | 0.0034   | 0.11                | 1212.8 | 22.9     | 1210.0 | 22.7      | 1198.9 | 59.5     | 1212.8 | 22.9 | -0.2   |
| CSD-21-01_Zrn-27  | 120.1   | 71.3       | 0.59   | 0.0766   | 0.0026   | 1.8579 | 0.0677   | 0.1761   | 0.0041   | 0.0555 | 0.0024   | 0.19                | 1045.3 | 22.3     | 1064.6 | 23.9      | 1098.8 | 69.2     | 1045.3 | 22.3 | 1.8    |
| CSD-21-01_Zrn-28  | 309.6   | 67.0       | 0.22   | 0.0730   | 0.0052   | 0.5341 | 0.0416   | 0.0527   | 0.0020   | 0.0355 | 0.0032   | 0.38                | 331.2  | 12.0     | 432.9  | 27.1      | 983.0  | 142.5    | 331.2  | 12.0 | 23.5   |
| CSD-21-01_Zrn-29  | 381.7   | 205.2      | 0.54   | 0.0536   | 0.0035   | 0.3050 | 0.0196   | 0.0413   | 0.0010   | 0.0140 | 0.0008   | 0.04                | 261.0  | 6.2      | 269.8  | 15.4      | 315.3  | 159.5    | 261.0  | 6.2  | 3.3    |
| CSD-21-01_Zrn-30  | 497.0   | 330.6      | 0.67   | 0.0569   | 0.0086   | 0.2818 | 0.0384   | 0.0362   | 0.0014   | 0.0126 | 0.0008   | -0.38               | 228.9  | 8.9      | 251.2  | 30.2      | 418.9  | 336.7    | 228.9  | 8.9  | 8.9    |
| CSD-21-01_Zrn-31  | 413.4   | 593.2      | 1.43   | 0.0538   | 0.0035   | 0.3052 | 0.0206   | 0.0411   | 0.0011   | 0.0125 | 0.0006   | 0.08                | 259.8  | 6.6      | 269.4  | 16.0      | 301.2  | 157.6    | 259.8  | 6.6  | 3.6    |
| CSD-21-01_Zrn-32  | 35.7    | 12.8       | 0.36   | 0.0762   | 0.0064   | 1.7604 | 0.1581   | 0.1692   | 0.0080   | 0.0596 | 0.0068   | 0.40                | 1006.5 | 44.4     | 1018.6 | 58.1      | 1024.8 | 179.2    | 1006.5 | 44.4 | 1.2    |
| CSD-21-01_Zrn-33  | 295.5   | 29.0       | 0.10   | 0.0778   | 0.0027   | 2.1652 | 0.0903   | 0.2003   | 0.0045   | 0.0656 | 0.0044   | 0.45                | 1176.7 | 24.4     | 1172.1 | 26.3      | 1156.7 | 68.1     | 1176.7 | 24.4 | -0.4   |

|                         |        |        |      |        |        |        |        |        |        |        |        |       |        |      |        |      |        |       |        |      |      |
|-------------------------|--------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|------|--------|------|--------|-------|--------|------|------|
| CSD-21-01_Zrn-34        | 459.9  | 51.1   | 0.11 | 0.0726 | 0.0046 | 1.5586 | 0.0941 | 0.1543 | 0.0044 | 0.0511 | 0.0045 | -0.06 | 924.7  | 24.5 | 952.5  | 37.2 | 989.6  | 131.5 | 924.7  | 24.5 | 2.9  |
| CSD-21-01_Zrn-35        | 736.4  | 576.0  | 0.78 | 0.0538 | 0.0031 | 0.3817 | 0.0208 | 0.0513 | 0.0013 | 0.0159 | 0.0007 | -0.17 | 322.2  | 8.0  | 327.7  | 15.4 | 329.1  | 141.2 | 322.2  | 8.0  | 1.7  |
| CSD-21-01_Zrn-36        | 337.0  | 147.6  | 0.44 | 0.0790 | 0.0026 | 2.1170 | 0.0763 | 0.1934 | 0.0041 | 0.0600 | 0.0026 | 0.35  | 1139.5 | 22.3 | 1153.2 | 24.9 | 1164.2 | 64.5  | 1139.5 | 22.3 | 1.2  |
| CSD-21-01_Zrn-37        | 137.7  | 106.3  | 0.77 | 0.0743 | 0.0033 | 1.7871 | 0.0847 | 0.1742 | 0.0045 | 0.0537 | 0.0027 | 0.21  | 1035.0 | 24.5 | 1037.6 | 30.6 | 1028.4 | 93.6  | 1035.0 | 24.5 | 0.3  |
| CSD-21-01_Zrn-38        | 364.4  | 251.7  | 0.69 | 0.0537 | 0.0031 | 0.3555 | 0.0213 | 0.0479 | 0.0013 | 0.0158 | 0.0009 | 0.23  | 301.6  | 8.2  | 307.6  | 15.8 | 303.2  | 132.1 | 301.6  | 8.2  | 1.9  |
| Granodiorita Nocupétaro |        |        |      |        |        |        |        |        |        |        |        |       |        |      |        |      |        |       |        |      |      |
| CSD-21-12_Zrn-01        | 435.7  | 182.4  | 0.42 | 0.0679 | 0.0041 | 0.2365 | 0.0133 | 0.0254 | 0.0007 | 0.0103 | 0.0005 | 0.06  | 161.9  | 4.3  | 215.0  | 10.9 | 838.9  | 115.0 | 161.9  | 4.3  | 24.7 |
| CSD-21-12_Zrn-02        | 531.5  | 113.5  | 0.21 | 0.0539 | 0.0029 | 0.1851 | 0.0107 | 0.0248 | 0.0006 | 0.0087 | 0.0006 | 0.23  | 157.9  | 3.9  | 172.0  | 9.1  | 352.8  | 104.9 | 157.9  | 3.9  | 8.2  |
| CSD-21-12_Zrn-03        | 756.5  | 188.6  | 0.25 | 0.0543 | 0.0024 | 0.2003 | 0.0095 | 0.0267 | 0.0007 | 0.0091 | 0.0005 | 0.42  | 169.8  | 4.5  | 185.1  | 8.0  | 354.1  | 98.8  | 169.8  | 4.5  | 8.3  |
| CSD-21-12_Zrn-04        | 738.3  | 205.2  | 0.28 | 0.0672 | 0.0058 | 0.2279 | 0.0187 | 0.0246 | 0.0010 | 0.0115 | 0.0011 | 0.08  | 157.0  | 6.4  | 208.1  | 15.5 | 806.5  | 185.3 | 157.0  | 6.4  | 24.6 |
| CSD-21-12_Zrn-05        | 720.7  | 265.0  | 0.37 | 0.0632 | 0.0044 | 0.2055 | 0.0164 | 0.0237 | 0.0008 | 0.0095 | 0.0008 | 0.52  | 150.8  | 5.2  | 189.1  | 14.0 | 700.1  | 150.3 | 150.8  | 5.2  | 20.3 |
| CSD-21-12_Zrn-06        | 891.6  | 371.6  | 0.42 | 0.0565 | 0.0101 | 0.2018 | 0.0304 | 0.0263 | 0.0027 | 0.0138 | 0.0027 | 0.11  | 167.3  | 16.8 | 186.2  | 25.6 | 413.7  | 388.2 | 167.3  | 16.8 | 10.1 |
| CSD-21-12_Zrn-07        | 810.7  | 253.5  | 0.31 | 0.0655 | 0.0077 | 0.2168 | 0.0294 | 0.0238 | 0.0010 | 0.0114 | 0.0008 | 0.62  | 151.6  | 6.3  | 198.6  | 24.6 | 742.9  | 272.3 | 151.6  | 6.3  | 23.6 |
| CSD-21-12_Zrn-08        | 2340.1 | 445.0  | 0.19 | 0.0635 | 0.0054 | 0.2184 | 0.0165 | 0.0249 | 0.0010 | 0.0105 | 0.0014 | -0.12 | 158.7  | 6.5  | 200.5  | 13.7 | 717.5  | 179.6 | 158.7  | 6.5  | 20.8 |
| CSD-21-12_Zrn-10        | 955.2  | 199.1  | 0.21 | 0.0526 | 0.0039 | 0.1906 | 0.0129 | 0.0265 | 0.0010 | 0.0107 | 0.0012 | 0.09  | 168.7  | 6.2  | 177.0  | 11.0 | 283.1  | 163.8 | 168.7  | 6.2  | 4.7  |
| CSD-21-12_Zrn-11        | 1143.3 | 520.8  | 0.46 | 0.0576 | 0.0070 | 0.1875 | 0.0215 | 0.0238 | 0.0014 | 0.0086 | 0.0012 | 0.17  | 151.5  | 9.0  | 174.3  | 18.4 | 482.0  | 267.3 | 151.5  | 9.0  | 13.1 |
| CSD-21-12_Zrn-12        | 597.4  | 293.9  | 0.49 | 0.0587 | 0.0055 | 0.1930 | 0.0162 | 0.0243 | 0.0010 | 0.0096 | 0.0008 | -0.11 | 154.9  | 6.1  | 178.8  | 13.8 | 503.1  | 220.4 | 154.9  | 6.1  | 13.4 |
| CSD-21-12_Zrn-13        | 2045.1 | 1278.2 | 0.62 | 0.0650 | 0.0048 | 0.2306 | 0.0177 | 0.0259 | 0.0007 | 0.0099 | 0.0005 | 0.22  | 164.7  | 4.2  | 210.3  | 14.4 | 739.7  | 154.4 | 164.7  | 4.2  | 21.7 |
| CSD-21-12_Zrn-14        | 1290.6 | 293.3  | 0.23 | 0.0516 | 0.0026 | 0.1718 | 0.0081 | 0.0246 | 0.0005 | 0.0084 | 0.0005 | -0.01 | 156.8  | 3.3  | 160.8  | 7.0  | 236.7  | 115.1 | 156.8  | 3.3  | 2.5  |
| CSD-21-12_Zrn-15        | 662.4  | 177.4  | 0.27 | 0.0582 | 0.0087 | 0.2002 | 0.0277 | 0.0249 | 0.0015 | 0.0094 | 0.0010 | -0.15 | 158.7  | 9.3  | 184.9  | 23.3 | 475.9  | 349.9 | 158.7  | 9.3  | 14.2 |
| CSD-21-12_Zrn-16        | 514.4  | 202.0  | 0.39 | 0.0532 | 0.0052 | 0.1788 | 0.0151 | 0.0247 | 0.0010 | 0.0081 | 0.0005 | -0.05 | 157.6  | 6.4  | 166.8  | 13.0 | 290.3  | 216.8 | 157.6  | 6.4  | 5.5  |
| CSD-21-12_Zrn-17        | 1207.7 | 267.8  | 0.22 | 0.0538 | 0.0060 | 0.2025 | 0.0225 | 0.0270 | 0.0011 | 0.0098 | 0.0010 | 0.00  | 171.8  | 6.6  | 186.9  | 19.0 | 317.6  | 269.7 | 171.8  | 6.6  | 8.1  |
| CSD-21-12_Zrn-18        | 379.6  | 103.3  | 0.27 | 0.0511 | 0.0040 | 0.1898 | 0.0144 | 0.0270 | 0.0009 | 0.0094 | 0.0008 | 0.06  | 172.0  | 5.3  | 176.0  | 12.3 | 174.7  | 189.9 | 172.0  | 5.3  | 2.3  |
| CSD-21-12_Zrn-19        | 397.1  | 173.4  | 0.44 | 0.0544 | 0.0053 | 0.1847 | 0.0169 | 0.0249 | 0.0008 | 0.0078 | 0.0006 | 0.00  | 158.3  | 5.2  | 171.6  | 14.5 | 313.6  | 225.6 | 158.3  | 5.2  | 7.8  |
| CSD-21-12_Zrn-20        | 559.0  | 183.9  | 0.33 | 0.0591 | 0.0042 | 0.2168 | 0.0142 | 0.0264 | 0.0009 | 0.0110 | 0.0010 | -0.08 | 168.1  | 5.6  | 199.0  | 11.9 | 536.5  | 159.9 | 168.1  | 5.6  | 15.5 |
| CSD-21-12_Zrn-21        | 484.9  | 152.5  | 0.31 | 0.0521 | 0.0044 | 0.1838 | 0.0156 | 0.0256 | 0.0007 | 0.0088 | 0.0005 | 0.11  | 163.0  | 4.3  | 170.7  | 13.3 | 204.7  | 193.8 | 163.0  | 4.3  | 4.5  |
| CSD-21-12_Zrn-22        | 969.2  | 382.4  | 0.39 | 0.0525 | 0.0038 | 0.1761 | 0.0121 | 0.0242 | 0.0007 | 0.0078 | 0.0006 | -0.26 | 154.3  | 4.5  | 164.5  | 10.5 | 262.7  | 190.1 | 154.3  | 4.5  | 6.2  |
| CSD-21-12_Zrn-23        | 609.6  | 292.3  | 0.48 | 0.0522 | 0.0043 | 0.1749 | 0.0133 | 0.0243 | 0.0008 | 0.0087 | 0.0006 | -0.11 | 154.9  | 5.0  | 163.4  | 11.5 | 252.3  | 191.4 | 154.9  | 5.0  | 5.2  |
| CSD-21-12_Zrn-24        | 281.6  | 62.0   | 0.22 | 0.0492 | 0.0038 | 0.1763 | 0.0134 | 0.0258 | 0.0006 | 0.0087 | 0.0006 | -0.16 | 164.3  | 4.0  | 164.1  | 11.5 | 96.2   | 166.5 | 164.3  | 4.0  | -0.1 |
| CSD-21-12_Zrn-25        | 578.9  | 379.8  | 0.66 | 0.0504 | 0.0030 | 0.1704 | 0.0096 | 0.0247 | 0.0007 | 0.0078 | 0.0004 | -0.08 | 157.0  | 4.5  | 159.6  | 8.3  | 182.7  | 141.0 | 157.0  | 4.5  | 1.6  |
| CSD-21-12_Zrn-26        | 515.1  | 168.3  | 0.33 | 0.0484 | 0.0024 | 0.1842 | 0.0089 | 0.0273 | 0.0007 | 0.0092 | 0.0006 | -0.10 | 173.5  | 4.3  | 171.4  | 7.7  | 121.2  | 115.8 | 173.5  | 4.3  | -1.2 |
| CSD-21-12_Zrn-27        | 488.9  | 186.3  | 0.38 | 0.0489 | 0.0041 | 0.1679 | 0.0139 | 0.0246 | 0.0007 | 0.0093 | 0.0006 | 0.05  | 156.9  | 4.2  | 157.2  | 12.2 | 73.2   | 217.0 | 156.9  | 4.2  | 0.2  |
| CSD-21-12_Zrn-28        | 272.1  | 111.0  | 0.41 | 0.0597 | 0.0055 | 0.1999 | 0.0170 | 0.0245 | 0.0009 | 0.0088 | 0.0008 | 0.40  | 156.3  | 5.6  | 184.2  | 14.4 | 531.0  | 192.0 | 156.3  | 5.6  | 15.1 |
| CSD-21-12_Zrn-31        | 471.6  | 210.1  | 0.45 | 0.0505 | 0.0035 | 0.1714 | 0.0108 | 0.0248 | 0.0008 | 0.0081 | 0.0005 | -0.16 | 157.7  | 4.9  | 160.4  | 9.3  | 174.8  | 159.9 | 157.7  | 4.9  | 1.7  |
| CSD-21-12_Zrn-32        | 775.8  | 283.2  | 0.37 | 0.0501 | 0.0022 | 0.1779 | 0.0088 | 0.0257 | 0.0006 | 0.0083 | 0.0004 | 0.45  | 163.6  | 4.0  | 166.0  | 7.5  | 199.6  | 91.1  | 163.6  | 4.0  | 1.5  |
| CSD-21-12_Zrn-33        | 400.3  | 176.1  | 0.44 | 0.0516 | 0.0033 | 0.1857 | 0.0116 | 0.0262 | 0.0008 | 0.0088 | 0.0006 | 0.06  | 166.9  | 5.1  | 172.7  | 9.9  | 239.5  | 146.5 | 166.9  | 5.1  | 3.3  |
| CSD-21-12_Zrn-35        | 801.9  | 312.4  | 0.39 | 0.0664 | 0.0026 | 0.5468 | 0.0257 | 0.0599 | 0.0019 | 0.0139 | 0.0008 | 0.59  | 375.1  | 11.5 | 442.3  | 16.9 | 808.8  | 81.1  | 375.1  | 11.5 | 15.2 |
| Granodiorita Nocupétaro |        |        |      |        |        |        |        |        |        |        |        |       |        |      |        |      |        |       |        |      |      |
| CSD-21-15_Zrn-01        | 178.3  | 35.4   | 0.20 | 0.0518 | 0.0076 | 0.1724 | 0.0254 | 0.0244 | 0.0014 | 0.0096 | 0.0010 | -0.01 | 155.5  | 9.0  | 160.5  | 22.1 | 77.0   | 474.9 | 155.5  | 9.0  | 3.2  |
| CSD-21-15_Zrn-02        | 182.9  | 84.8   | 0.46 | 0.0538 | 0.0059 | 0.1869 | 0.0199 | 0.0255 | 0.0008 | 0.0080 | 0.0007 | -0.07 | 162.1  | 4.9  | 173.0  | 16.8 | 226.7  | 256.0 | 162.1  | 4.9  | 6.3  |
| CSD-21-15_Zrn-04        | 233.8  | 110.0  | 0.47 | 0.0510 | 0.0044 | 0.1816 | 0.0159 | 0.0257 | 0.0008 | 0.0089 | 0.0006 | 0.15  | 163.4  | 5.0  | 168.9  | 13.7 | 159.0  | 215.2 | 163.4  | 5.0  | 3.2  |

|                   |        |          |       |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |      |       |      |       |       |       |      |      |
|-------------------|--------|----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|
| CSD-21-15_Zrn-05  | 213.7  | 33.6     | 0.16  | 0.0537 | 0.0109 | 0.1979 | 0.0403 | 0.0264 | 0.0007 | 0.0164 | 0.0030 | -0.14 | 168.0 | 4.2  | 182.5 | 34.3 | 241.9 | 525.9 | 168.0 | 4.2  | 8.0  |
| CSD-21-15_Zrn-06  | 943.4  | 159.5    | 0.17  | 0.0503 | 0.0024 | 0.1782 | 0.0090 | 0.0257 | 0.0006 | 0.0087 | 0.0006 | 0.08  | 163.5 | 3.5  | 166.2 | 7.8  | 167.2 | 117.4 | 163.5 | 3.5  | 1.6  |
| CSD-21-15_Zrn-07  | 199.5  | 103.5    | 0.52  | 0.0523 | 0.0059 | 0.1888 | 0.0206 | 0.0267 | 0.0009 | 0.0093 | 0.0007 | -0.01 | 169.5 | 5.9  | 174.5 | 17.4 | 212.5 | 242.1 | 169.5 | 5.9  | 2.9  |
| CSD-21-15_Zrn-08  | 512.8  | 160.6    | 0.31  | 0.0548 | 0.0062 | 0.2012 | 0.0213 | 0.0267 | 0.0008 | 0.0088 | 0.0007 | -0.21 | 169.8 | 5.1  | 185.6 | 18.1 | 323.8 | 286.2 | 169.8 | 5.1  | 8.5  |
| CSD-21-15_Zrn-10  | 1249.7 | 231.6    | 0.19  | 0.0509 | 0.0028 | 0.1820 | 0.0106 | 0.0259 | 0.0006 | 0.0087 | 0.0005 | 0.34  | 165.0 | 3.8  | 169.6 | 9.2  | 208.3 | 127.6 | 165.0 | 3.8  | 2.7  |
| CSD-21-15_Zrn-11  | 183.9  | 39.4     | 0.21  | 0.0523 | 0.0058 | 0.1797 | 0.0183 | 0.0252 | 0.0007 | 0.0081 | 0.0010 | -0.35 | 160.6 | 4.4  | 167.1 | 15.8 | 172.0 | 280.4 | 160.6 | 4.4  | 3.9  |
| CSD-21-15_Zrn-12  | 249.9  | 77.5     | 0.31  | 0.0516 | 0.0047 | 0.1938 | 0.0181 | 0.0273 | 0.0011 | 0.0104 | 0.0009 | 0.28  | 173.5 | 7.1  | 179.3 | 15.5 | 202.1 | 231.6 | 173.5 | 7.1  | 3.2  |
| CSD-21-15_Zrn-14  | 909.2  | 103.4    | 0.11  | 0.0551 | 0.0041 | 0.1780 | 0.0129 | 0.0235 | 0.0008 | 0.0099 | 0.0007 | 0.02  | 149.8 | 4.7  | 166.1 | 11.1 | 389.0 | 169.4 | 149.8 | 4.7  | 9.8  |
| CSD-21-15_Zrn-15  | 277.2  | 44.6     | 0.16  | 0.0531 | 0.0037 | 0.1812 | 0.0132 | 0.0249 | 0.0008 | 0.0076 | 0.0010 | 0.18  | 158.5 | 4.8  | 168.8 | 11.3 | 301.8 | 160.8 | 158.5 | 4.8  | 6.1  |
| CSD-21-15_Zrn-16  | 286.9  | 127.8    | 0.45  | 0.0544 | 0.0073 | 0.1810 | 0.0214 | 0.0245 | 0.0009 | 0.0071 | 0.0005 | -0.55 | 155.9 | 5.4  | 168.5 | 18.5 | 302.8 | 356.3 | 155.9 | 5.4  | 7.5  |
| CSD-21-15_Zrn-17  | 181.7  | 71.0     | 0.39  | 0.0544 | 0.0050 | 0.2023 | 0.0191 | 0.0269 | 0.0009 | 0.0098 | 0.0008 | 0.22  | 171.1 | 5.5  | 186.9 | 16.2 | 368.1 | 205.2 | 171.1 | 5.5  | 8.5  |
| CSD-21-15_Zrn-18  | 390.8  | 232.3    | 0.59  | 0.0522 | 0.0039 | 0.1774 | 0.0140 | 0.0247 | 0.0006 | 0.0078 | 0.0005 | 0.17  | 157.0 | 3.8  | 165.3 | 12.1 | 270.9 | 162.1 | 157.0 | 3.8  | 5.0  |
| CSD-21-15_Zrn-19  | 341.2  | 235.9    | 0.69  | 0.0538 | 0.0044 | 0.1713 | 0.0143 | 0.0232 | 0.0007 | 0.0078 | 0.0005 | 0.21  | 147.9 | 4.4  | 160.2 | 12.3 | 318.4 | 170.6 | 147.9 | 4.4  | 7.7  |
| CSD-21-15_Zrn-20  | 225.0  | 77.6     | 0.34  | 0.0490 | 0.0048 | 0.1628 | 0.0161 | 0.0241 | 0.0009 | 0.0081 | 0.0007 | 0.17  | 153.3 | 5.5  | 152.6 | 14.0 | 49.1  | 242.6 | 153.3 | 5.5  | -0.5 |
| CSD-21-15_Zrn-21  | 388.9  | 244.5    | 0.63  | 0.0541 | 0.0055 | 0.1886 | 0.0175 | 0.0255 | 0.0008 | 0.0099 | 0.0015 | -0.34 | 162.2 | 4.8  | 175.3 | 15.0 | 349.4 | 238.8 | 162.2 | 4.8  | 7.5  |
| CSD-21-15_Zrn-22  | 653.5  | 187.3    | 0.29  | 0.0604 | 0.0127 | 0.2071 | 0.0247 | 0.0248 | 0.0029 | 0.0091 | 0.0016 | -0.45 | 158.1 | 18.3 | 191.0 | 20.9 | 572.0 | 435.6 | 158.1 | 18.3 | 17.2 |
| CSD-21-15_Zrn-23  | 4382.0 | 163955.6 | 37.42 | 0.0585 | 0.0033 | 0.1827 | 0.0105 | 0.0223 | 0.0006 | 0.0072 | 0.0002 | 0.18  | 142.2 | 3.8  | 170.3 | 9.0  | 529.9 | 116.6 | 142.2 | 3.8  | 16.5 |
| CSD-21-15_Zrn-24  | 504.9  | 300.9    | 0.60  | 0.0541 | 0.0067 | 0.1877 | 0.0216 | 0.0253 | 0.0011 | 0.0083 | 0.0007 | 0.02  | 161.2 | 7.0  | 174.0 | 18.3 | 274.4 | 258.0 | 161.2 | 7.0  | 7.3  |
| CSD-21-15_Zrn-27  | 401.3  | 68.7     | 0.17  | 0.0547 | 0.0065 | 0.2166 | 0.0272 | 0.0284 | 0.0012 | 0.0109 | 0.0014 | 0.32  | 180.3 | 7.3  | 197.8 | 22.5 | 292.2 | 270.1 | 180.3 | 7.3  | 8.9  |
| CSD-21-15_Zrn-28  | 571.5  | 68.6     | 0.12  | 0.0582 | 0.0049 | 0.1833 | 0.0168 | 0.0226 | 0.0007 | 0.0096 | 0.0011 | 0.31  | 144.2 | 4.5  | 170.4 | 14.2 | 477.6 | 181.7 | 144.2 | 4.5  | 15.4 |
| Tonalita Frontera |        |          |       |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |      |       |      |       |       |       |      |      |
| CSD-21-20_Zrn-01  | 528.8  | 202.5    | 0.38  | 0.0499 | 0.0027 | 0.1657 | 0.0087 | 0.0242 | 0.0006 | 0.0085 | 0.0005 | 0.03  | 154.2 | 4.0  | 155.4 | 7.6  | 135.5 | 130.9 | 154.2 | 4.0  | 0.7  |
| CSD-21-20_Zrn-02  | 1467.7 | 852.6    | 0.58  | 0.0583 | 0.0041 | 0.1998 | 0.0118 | 0.0247 | 0.0012 | 0.0097 | 0.0008 | 0.08  | 157.3 | 7.4  | 184.9 | 10.0 | 535.3 | 151.5 | 157.3 | 7.4  | 14.9 |
| CSD-21-20_Zrn-03  | 605.9  | 181.2    | 0.30  | 0.0598 | 0.0041 | 0.1955 | 0.0134 | 0.0239 | 0.0009 | 0.0091 | 0.0007 | 0.21  | 152.1 | 5.8  | 180.9 | 11.3 | 552.4 | 155.1 | 152.1 | 5.8  | 15.9 |
| CSD-21-20_Zrn-04  | 265.3  | 92.7     | 0.35  | 0.0588 | 0.0068 | 0.2036 | 0.0272 | 0.0253 | 0.0014 | 0.0097 | 0.0009 | 0.52  | 160.7 | 8.7  | 187.1 | 23.0 | 436.7 | 338.3 | 160.7 | 8.7  | 14.1 |
| CSD-21-20_Zrn-05  | 235.8  | 48.2     | 0.20  | 0.0662 | 0.0050 | 0.2337 | 0.0165 | 0.0256 | 0.0008 | 0.0159 | 0.0018 | 0.05  | 163.0 | 5.3  | 212.6 | 13.5 | 754.0 | 154.4 | 163.0 | 5.3  | 23.3 |
| CSD-21-20_Zrn-06  | 906.4  | 468.6    | 0.52  | 0.0526 | 0.0037 | 0.1750 | 0.0128 | 0.0242 | 0.0006 | 0.0073 | 0.0004 | 0.21  | 154.5 | 3.5  | 163.5 | 11.1 | 271.5 | 179.1 | 154.5 | 3.5  | 5.5  |
| CSD-21-20_Zrn-07  | 578.8  | 187.4    | 0.32  | 0.0560 | 0.0071 | 0.1906 | 0.0245 | 0.0244 | 0.0007 | 0.0088 | 0.0013 | 0.06  | 155.7 | 4.3  | 176.7 | 20.8 | 402.6 | 290.6 | 155.7 | 4.3  | 11.9 |
| CSD-21-20_Zrn-08  | 796.6  | 272.6    | 0.34  | 0.0617 | 0.0094 | 0.2093 | 0.0336 | 0.0243 | 0.0010 | 0.0091 | 0.0009 | 0.25  | 155.0 | 6.3  | 192.4 | 28.1 | 611.0 | 347.2 | 155.0 | 6.3  | 19.5 |
| CSD-21-20_Zrn-09  | 350.3  | 146.6    | 0.42  | 0.0553 | 0.0056 | 0.1902 | 0.0174 | 0.0252 | 0.0008 | 0.0087 | 0.0007 | -0.28 | 160.6 | 4.9  | 176.1 | 14.8 | 311.1 | 244.4 | 160.6 | 4.9  | 8.8  |
| CSD-21-20_Zrn-12  | 604.7  | 252.2    | 0.42  | 0.0556 | 0.0052 | 0.1827 | 0.0164 | 0.0237 | 0.0009 | 0.0081 | 0.0005 | -0.03 | 151.0 | 5.6  | 170.1 | 14.0 | 391.0 | 212.5 | 151.0 | 5.6  | 11.2 |
| CSD-21-20_Zrn-20  | 415.9  | 195.9    | 0.47  | 0.0527 | 0.0057 | 0.1769 | 0.0189 | 0.0244 | 0.0009 | 0.0076 | 0.0007 | 0.07  | 155.6 | 6.0  | 164.9 | 16.2 | 242.2 | 247.2 | 155.6 | 6.0  | 5.7  |
| CSD-21-20_Zrn-21  | 412.9  | 189.2    | 0.46  | 0.0621 | 0.0050 | 0.2146 | 0.0174 | 0.0248 | 0.0010 | 0.0101 | 0.0009 | 0.16  | 158.0 | 6.2  | 197.1 | 14.4 | 648.6 | 165.0 | 158.0 | 6.2  | 19.8 |
| Tonalita Frontera |        |          |       |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |      |       |      |       |       |       |      |      |
| CSD-21-22_Zrn-01  | 621.1  | 206.9    | 0.33  | 0.0555 | 0.0067 | 0.2034 | 0.0263 | 0.0262 | 0.0008 | 0.0098 | 0.0015 | 0.33  | 166.6 | 5.1  | 187.5 | 21.9 | 390.1 | 262.2 | 166.6 | 5.1  | 11.2 |
| CSD-21-22_Zrn-03  | 711.3  | 321.7    | 0.45  | 0.0517 | 0.0027 | 0.1834 | 0.0092 | 0.0258 | 0.0006 | 0.0083 | 0.0004 | -0.01 | 164.3 | 4.0  | 170.8 | 7.8  | 244.2 | 115.2 | 164.3 | 4.0  | 3.8  |
| CSD-21-22_Zrn-04  | 877.8  | 449.2    | 0.51  | 0.0562 | 0.0042 | 0.1950 | 0.0129 | 0.0250 | 0.0008 | 0.0083 | 0.0006 | -0.27 | 159.3 | 4.7  | 180.7 | 11.0 | 436.4 | 170.5 | 159.3 | 4.7  | 11.8 |
| CSD-21-22_Zrn-06  | 270.0  | 72.3     | 0.27  | 0.0559 | 0.0083 | 0.1987 | 0.0283 | 0.0259 | 0.0013 | 0.0099 | 0.0010 | 0.01  | 164.9 | 8.3  | 183.3 | 23.9 | 349.5 | 357.9 | 164.9 | 8.3  | 10.0 |
| CSD-21-22_Zrn-07  | 1051.3 | 794.1    | 0.76  | 0.0519 | 0.0025 | 0.1777 | 0.0097 | 0.0247 | 0.0007 | 0.0083 | 0.0004 | 0.43  | 157.2 | 4.2  | 166.0 | 8.4  | 267.3 | 119.2 | 157.2 | 4.2  | 5.3  |
| CSD-21-22_Zrn-10  | 602.1  | 166.6    | 0.28  | 0.0496 | 0.0022 | 0.1765 | 0.0088 | 0.0257 | 0.0006 | 0.0087 | 0.0007 | 0.45  | 163.8 | 3.7  | 164.9 | 7.6  | 180.6 | 123.9 | 163.8 | 3.7  | 0.7  |
| CSD-21-22_Zrn-14  | 1296.0 | 792.6    | 0.61  | 0.0538 | 0.0043 | 0.1848 | 0.0160 | 0.0247 | 0.0006 | 0.0081 | 0.0006 | 0.37  | 157.0 | 4.0  | 172.0 | 13.6 | 340.7 | 183.3 | 157.0 | 4.0  | 8.7  |

|                  |        |       |      |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |     |       |      |        |       |       |     |       |
|------------------|--------|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-----|-------|------|--------|-------|-------|-----|-------|
| CSD-21-22_Zrn-15 | 398.4  | 179.1 | 0.45 | 0.0718 | 0.0098 | 0.2923 | 0.0403 | 0.0290 | 0.0013 | 0.0133 | 0.0015 | 0.14  | 184.1 | 7.8 | 259.2 | 31.3 | 922.6  | 270.5 | 184.1 | 7.8 | 29.0  |
| CSD-21-22_Zrn-16 | 510.0  | 235.6 | 0.46 | 0.0509 | 0.0035 | 0.1870 | 0.0125 | 0.0265 | 0.0008 | 0.0083 | 0.0005 | 0.05  | 168.7 | 5.1 | 173.8 | 10.7 | 193.7  | 167.8 | 168.7 | 5.1 | 3.0   |
| CSD-21-22_Zrn-17 | 287.5  | 94.6  | 0.33 | 0.0545 | 0.0058 | 0.1981 | 0.0222 | 0.0262 | 0.0011 | 0.0105 | 0.0007 | 0.25  | 166.5 | 6.6 | 183.0 | 18.8 | 335.0  | 258.3 | 166.5 | 6.6 | 9.0   |
| CSD-21-22_Zrn-21 | 180.7  | 73.9  | 0.41 | 0.0537 | 0.0068 | 0.1932 | 0.0228 | 0.0264 | 0.0010 | 0.0083 | 0.0007 | 0.00  | 167.7 | 6.6 | 178.2 | 19.6 | 263.0  | 289.9 | 167.7 | 6.6 | 5.9   |
| CSD-21-22_Zrn-22 | 654.3  | 104.1 | 0.16 | 0.0509 | 0.0053 | 0.1752 | 0.0185 | 0.0248 | 0.0006 | 0.0097 | 0.0011 | 0.05  | 158.1 | 4.0 | 163.5 | 16.0 | 175.4  | 250.4 | 158.1 | 4.0 | 3.3   |
| CSD-21-22_Zrn-23 | 653.7  | 129.3 | 0.20 | 0.0510 | 0.0030 | 0.1813 | 0.0101 | 0.0259 | 0.0007 | 0.0094 | 0.0006 | -0.21 | 165.1 | 4.2 | 168.8 | 8.6  | 177.0  | 141.6 | 165.1 | 4.2 | 2.2   |
| CSD-21-22_Zrn-24 | 1549.5 | 908.3 | 0.59 | 0.0649 | 0.0047 | 0.2175 | 0.0199 | 0.0240 | 0.0009 | 0.0091 | 0.0008 | 0.64  | 153.0 | 6.0 | 199.5 | 16.5 | 754.0  | 153.6 | 153.0 | 6.0 | 23.3  |
| CSD-21-22_Zrn-25 | 624.4  | 154.9 | 0.25 | 0.0655 | 0.0049 | 0.2288 | 0.0164 | 0.0253 | 0.0007 | 0.0116 | 0.0012 | -0.01 | 161.3 | 4.3 | 208.7 | 13.5 | 743.1  | 155.2 | 161.3 | 4.3 | 22.7  |
| Diorita-Norita   |        |       |      |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |     |       |      |        |       |       |     |       |
| CSD-45_Zrn-01    | 430.9  | 157.6 | 0.37 | 0.0559 | 0.0037 | 0.1794 | 0.0136 | 0.0261 | 0.0011 | 0.0091 | 0.0005 | 0.08  | 166.0 | 6.6 | 168.6 | 11.2 | 439.6  | 139.8 | 166.0 | 6.6 | 1.5   |
| CSD-45_Zrn-02    | 345.1  | 202.8 | 0.59 | 0.0587 | 0.0037 | 0.2032 | 0.0157 | 0.0282 | 0.0012 | 0.0085 | 0.0006 | 0.05  | 179.1 | 7.3 | 188.9 | 12.7 | 567.7  | 135.5 | 179.1 | 7.3 | 5.2   |
| CSD-45_Zrn-03    | 326.0  | 148.4 | 0.46 | 0.0599 | 0.0037 | 0.1971 | 0.0141 | 0.0284 | 0.0012 | 0.0089 | 0.0005 | -0.15 | 180.5 | 7.4 | 183.6 | 11.5 | 556.4  | 142.6 | 180.5 | 7.4 | 1.7   |
| CSD-45_Zrn-04    | 374.9  | 145.6 | 0.39 | 0.0536 | 0.0032 | 0.1840 | 0.0127 | 0.0304 | 0.0012 | 0.0093 | 0.0006 | -0.08 | 193.1 | 7.7 | 171.2 | 11.0 | 321.8  | 154.6 | 193.1 | 7.7 | -12.8 |
| CSD-45_Zrn-05    | 448.0  | 278.3 | 0.62 | 0.0560 | 0.0035 | 0.1869 | 0.0138 | 0.0296 | 0.0012 | 0.0080 | 0.0004 | 0.10  | 188.1 | 7.7 | 173.6 | 11.8 | 400.2  | 145.5 | 188.1 | 7.7 | -8.3  |
| CSD-45_Zrn-06    | 474.2  | 254.0 | 0.54 | 0.0537 | 0.0027 | 0.1787 | 0.0120 | 0.0299 | 0.0011 | 0.0080 | 0.0005 | 0.01  | 190.1 | 7.2 | 166.6 | 10.3 | 350.1  | 124.0 | 190.1 | 7.2 | -14.0 |
| CSD-45_Zrn-07    | 89.3   | 31.1  | 0.35 | 0.0797 | 0.0079 | 0.2663 | 0.0260 | 0.0309 | 0.0015 | 0.0133 | 0.0013 | -0.11 | 195.9 | 9.6 | 237.8 | 20.9 | 1128.9 | 215.0 | 195.9 | 9.6 | 17.6  |
| CSD-45_Zrn-08    | 240.4  | 103.7 | 0.43 | 0.0558 | 0.0033 | 0.1831 | 0.0138 | 0.0295 | 0.0013 | 0.0086 | 0.0006 | 0.18  | 187.7 | 8.0 | 171.7 | 11.3 | 455.2  | 126.6 | 187.7 | 8.0 | -9.3  |
| CSD-45_Zrn-09    | 205.3  | 94.7  | 0.46 | 0.0490 | 0.0032 | 0.1668 | 0.0129 | 0.0294 | 0.0013 | 0.0080 | 0.0006 | 0.11  | 186.9 | 8.0 | 157.5 | 11.6 | 130.4  | 151.1 | 186.9 | 8.0 | -18.6 |
| CSD-45_Zrn-10    | 263.2  | 96.0  | 0.36 | 0.0557 | 0.0037 | 0.1880 | 0.0134 | 0.0270 | 0.0011 | 0.0087 | 0.0007 | -0.09 | 171.7 | 7.0 | 174.6 | 11.4 | 430.5  | 146.1 | 171.7 | 7.0 | 1.6   |
| CSD-45_Zrn-11    | 521.2  | 317.2 | 0.61 | 0.0542 | 0.0035 | 0.1803 | 0.0131 | 0.0206 | 0.0008 | 0.0078 | 0.0004 | -0.22 | 131.7 | 5.3 | 167.9 | 11.3 | 334.0  | 161.9 | 131.7 | 5.3 | 21.6  |
| CSD-45_Zrn-12    | 128.8  | 34.3  | 0.27 | 0.0596 | 0.0052 | 0.2020 | 0.0178 | 0.0210 | 0.0009 | 0.0110 | 0.0009 | -0.31 | 134.0 | 5.6 | 186.0 | 15.3 | 507.6  | 242.3 | 134.0 | 5.6 | 28.0  |
| CSD-45_Zrn-13    | 382.4  | 229.5 | 0.60 | 0.0523 | 0.0028 | 0.1709 | 0.0118 | 0.0204 | 0.0008 | 0.0076 | 0.0004 | -0.06 | 130.4 | 5.1 | 159.9 | 10.2 | 271.2  | 134.7 | 130.4 | 5.1 | 18.5  |
| CSD-45_Zrn-14    | 353.2  | 137.9 | 0.39 | 0.0527 | 0.0037 | 0.1778 | 0.0143 | 0.0212 | 0.0009 | 0.0081 | 0.0005 | 0.18  | 135.1 | 5.5 | 167.5 | 13.0 | 325.9  | 157.2 | 135.1 | 5.5 | 19.4  |
| CSD-45_Zrn-15    | 177.5  | 57.7  | 0.33 | 0.0756 | 0.0059 | 0.2596 | 0.0238 | 0.0221 | 0.0010 | 0.0143 | 0.0017 | 0.30  | 141.2 | 6.4 | 236.6 | 17.7 | 1063.7 | 143.3 | 141.2 | 6.4 | 40.3  |
| CSD-45_Zrn-16    | 201.9  | 43.1  | 0.21 | 0.0583 | 0.0043 | 0.2092 | 0.0171 | 0.0233 | 0.0009 | 0.0115 | 0.0011 | 0.15  | 148.5 | 5.8 | 192.1 | 14.3 | 515.8  | 151.8 | 148.5 | 5.8 | 22.7  |
| CSD-45_Zrn-17    | 335.5  | 138.0 | 0.41 | 0.0556 | 0.0038 | 0.1863 | 0.0140 | 0.0226 | 0.0009 | 0.0091 | 0.0006 | -0.22 | 144.0 | 5.8 | 173.1 | 12.0 | 421.9  | 138.1 | 144.0 | 5.8 | 16.8  |
| CSD-45_Zrn-18    | 430.4  | 253.4 | 0.59 | 0.0530 | 0.0027 | 0.1754 | 0.0113 | 0.0234 | 0.0009 | 0.0081 | 0.0004 | 0.09  | 149.0 | 5.8 | 163.9 | 9.7  | 292.1  | 118.5 | 149.0 | 5.8 | 9.1   |
| CSD-45_Zrn-19    | 464.8  | 307.9 | 0.66 | 0.0546 | 0.0031 | 0.1828 | 0.0128 | 0.0239 | 0.0009 | 0.0081 | 0.0004 | -0.11 | 152.1 | 5.8 | 170.1 | 11.0 | 392.8  | 146.2 | 152.1 | 5.8 | 10.6  |
| CSD-45_Zrn-20    | 285.0  | 151.1 | 0.53 | 0.0558 | 0.0031 | 0.1852 | 0.0127 | 0.0242 | 0.0009 | 0.0081 | 0.0004 | 0.04  | 154.0 | 6.0 | 172.3 | 10.9 | 449.7  | 113.2 | 154.0 | 6.0 | 10.6  |
| CSD-45_Zrn-21    | 375.4  | 162.0 | 0.43 | 0.0654 | 0.0038 | 0.2212 | 0.0163 | 0.0237 | 0.0009 | 0.0097 | 0.0006 | 0.16  | 151.1 | 5.8 | 202.3 | 13.6 | 739.6  | 124.9 | 151.1 | 5.8 | 25.4  |
| CSD-45_Zrn-22    | 319.4  | 190.7 | 0.60 | 0.0535 | 0.0034 | 0.1764 | 0.0120 | 0.0234 | 0.0010 | 0.0083 | 0.0004 | -0.15 | 149.0 | 6.0 | 166.0 | 9.9  | 333.1  | 142.6 | 149.0 | 6.0 | 10.2  |
| CSD-45_Zrn-23    | 205.6  | 63.9  | 0.31 | 0.0614 | 0.0041 | 0.2172 | 0.0175 | 0.0248 | 0.0011 | 0.0111 | 0.0007 | 0.20  | 157.8 | 6.6 | 198.9 | 14.6 | 587.5  | 148.3 | 157.8 | 6.6 | 20.6  |
| CSD-45_Zrn-24    | 438.4  | 275.2 | 0.63 | 0.0515 | 0.0030 | 0.1678 | 0.0114 | 0.0232 | 0.0009 | 0.0077 | 0.0004 | -0.10 | 147.8 | 5.7 | 157.3 | 9.9  | 265.5  | 132.9 | 147.8 | 5.7 | 6.0   |
| CSD-45_Zrn-25    | 332.2  | 180.3 | 0.54 | 0.0562 | 0.0028 | 0.1894 | 0.0119 | 0.0235 | 0.0009 | 0.0083 | 0.0005 | 0.00  | 149.5 | 5.9 | 175.9 | 10.2 | 450.3  | 106.9 | 149.5 | 5.9 | 15.0  |
| CSD-45_Zrn-26    | 304.4  | 131.4 | 0.43 | 0.0535 | 0.0034 | 0.1861 | 0.0134 | 0.0243 | 0.0010 | 0.0085 | 0.0006 | -0.09 | 154.8 | 6.2 | 174.3 | 12.0 | 313.5  | 149.1 | 154.8 | 6.2 | 11.2  |
| CSD-45_Zrn-27    | 221.4  | 94.1  | 0.43 | 0.0550 | 0.0044 | 0.2011 | 0.0170 | 0.0252 | 0.0010 | 0.0090 | 0.0006 | 0.02  | 160.6 | 6.5 | 185.3 | 14.4 | 380.2  | 184.7 | 160.6 | 6.5 | 13.3  |
| CSD-45_Zrn-28    | 87.3   | 22.4  | 0.26 | 0.0701 | 0.0077 | 0.2400 | 0.0238 | 0.0245 | 0.0013 | 0.0121 | 0.0015 | 0.01  | 155.7 | 8.0 | 217.2 | 19.6 | 839.1  | 235.5 | 155.7 | 8.0 | 28.3  |
| CSD-45_Zrn-29    | 521.3  | 270.8 | 0.52 | 0.0558 | 0.0044 | 0.1882 | 0.0150 | 0.0237 | 0.0009 | 0.0082 | 0.0004 | -0.41 | 151.1 | 5.9 | 174.8 | 12.8 | 455.6  | 177.6 | 151.1 | 5.9 | 13.6  |
| CSD-45_Zrn-30    | 457.6  | 287.5 | 0.63 | 0.0526 | 0.0029 | 0.1770 | 0.0127 | 0.0239 | 0.0009 | 0.0077 | 0.0004 | 0.21  | 152.2 | 5.9 | 165.2 | 10.9 | 337.4  | 132.9 | 152.2 | 5.9 | 7.9   |
| CSD-45_Zrn-31    | 298.1  | 86.2  | 0.29 | 0.0639 | 0.0040 | 0.2426 | 0.0180 | 0.0280 | 0.0011 | 0.0120 | 0.0007 | 0.10  | 178.2 | 6.9 | 219.9 | 14.7 | 700.3  | 142.7 | 178.2 | 6.9 | 19.0  |
| CSD-45_Zrn-32    | 246.6  | 111.9 | 0.45 | 0.0594 | 0.0040 | 0.2008 | 0.0158 | 0.0250 | 0.0010 | 0.0093 | 0.0006 | 0.08  | 159.0 | 6.3 | 185.2 | 13.4 | 583.1  | 151.7 | 159.0 | 6.3 | 14.1  |

|                     |       |       |       |        |        |        |        |         |         |         |         |         |        |     |        |      |       |       |        |     |         |
|---------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|-----|--------|------|-------|-------|--------|-----|---------|
| CSD-45_Zrn-33       | 295.9 | 168.8 | 0.57  | 0.0643 | 0.0039 | 0.2181 | 0.0158 | 0.0252  | 0.0011  | 0.0093  | 0.0006  | 0.11    | 160.7  | 6.9 | 199.9  | 13.2 | 732.4 | 141.0 | 160.7  | 6.9 | 19.6    |
| CSD-45_Zrn-34       | 325.4 | 158.5 | 0.49  | 0.0590 | 0.0038 | 0.1945 | 0.0150 | 0.0248  | 0.0010  | 0.0090  | 0.0006  | -0.01   | 158.2  | 6.2 | 179.9  | 12.8 | 557.9 | 140.5 | 158.2  | 6.2 | 12.1    |
| CSD-45_Zrn-35       | 246.8 | 124.5 | 0.50  | 0.0607 | 0.0037 | 0.2051 | 0.0145 | 0.0255  | 0.0010  | 0.0094  | 0.0005  | -0.10   | 162.6  | 6.8 | 189.0  | 12.2 | 628.6 | 139.9 | 162.6  | 6.8 | 14.0    |
| Granito San Diego   |       |       |       |        |        |        |        |         |         |         |         |         |        |     |        |      |       |       |        |     |         |
| Zircon-01_GSD-8-10t | 46.8  | 13.91 | 0.297 | 0.065  | 0.011  | 0.251  | 0.043  | 0.0273  | 0.0015  | 0.0132  | 0.0027  | 0.18691 | 173.8  | 9.4 | 230    | 33   | 770   | 350   | 173.8  | 9.4 | 24.4348 |
| Zircon-02           | 397.9 | 107   | 0.269 | 0.0536 | 0.0034 | 0.204  | 0.014  | 0.02714 | 0.00054 | 0.01034 | 0.0009  | -0.2216 | 172.6  | 3.4 | 188.2  | 12   | 350   | 150   | 172.6  | 3.4 | 8.28905 |
| Zircon-03           | 289   | 111.6 | 0.386 | 0.0513 | 0.004  | 0.19   | 0.016  | 0.02668 | 0.00068 | 0.01027 | 0.00095 | 0.15406 | 169.7  | 4.3 | 176    | 14   | 270   | 160   | 169.7  | 4.3 | 3.57955 |
| Zircon-04           | 1435  | 187   | 0.13  | 0.0504 | 0.0025 | 0.172  | 0.01   | 0.02495 | 0.00041 | 0.0087  | 0.00074 | 0.12875 | 158.9  | 2.6 | 161.6  | 9.4  | 206   | 110   | 158.9  | 2.6 | 1.67079 |
| Zircon-05           | 213.6 | 73.7  | 0.345 | 0.0523 | 0.0057 | 0.186  | 0.021  | 0.02594 | 0.00084 | 0.00972 | 0.0012  | 0.19029 | 165.1  | 5.3 | 172    | 18   | 280   | 240   | 165.1  | 5.3 | 4.01163 |
| Zircon-06           | 242   | 90.2  | 0.373 | 0.0524 | 0.0046 | 0.187  | 0.016  | 0.02611 | 0.0007  | 0.00835 | 0.00076 | 0.11667 | 166.2  | 4.4 | 173    | 14   | 310   | 190   | 166.2  | 4.4 | 3.93064 |
| Zircon-07           | 896   | 167.3 | 0.187 | 0.05   | 0.0029 | 0.1792 | 0.012  | 0.02604 | 0.00053 | 0.00877 | 0.00078 | 0.10742 | 165.7  | 3.3 | 167.2  | 11   | 183   | 130   | 165.7  | 3.3 | 0.89713 |
| Zircon-08           | 490   | 56.9  | 0.116 | 0.0504 | 0.0033 | 0.1809 | 0.013  | 0.02623 | 0.00053 | 0.00996 | 0.0011  | -0.0214 | 166.9  | 3.3 | 168.6  | 11   | 190   | 140   | 166.9  | 3.3 | 1.0083  |
| Zircon-09           | 965.8 | 207.9 | 0.215 | 0.0517 | 0.0029 | 0.1756 | 0.012  | 0.02495 | 0.00052 | 0.00811 | 0.00074 | 0.31264 | 158.9  | 3.2 | 164.2  | 10   | 278   | 130   | 158.9  | 3.2 | 3.22777 |
| Zircon-10           | 486   | 75.7  | 0.156 | 0.0517 | 0.0036 | 0.1888 | 0.014  | 0.02657 | 0.00062 | 0.00935 | 0.001   | 0.06865 | 169.1  | 3.9 | 175.3  | 12   | 240   | 150   | 169.1  | 3.9 | 3.53679 |
| Zircon-11           | 1898  | 494   | 0.26  | 0.049  | 0.0027 | 0.168  | 0.011  | 0.02506 | 0.00041 | 0.008   | 0.00068 | 0.56896 | 159.6  | 2.6 | 157.6  | 9.5  | 139   | 120   | 159.6  | 2.6 | -1.269  |
| Zircon-12           | 198.7 | 60.7  | 0.305 | 0.0485 | 0.0036 | 0.171  | 0.014  | 0.02548 | 0.00068 | 0.00893 | 0.00092 | -0.1033 | 162.2  | 4.3 | 159.9  | 12   | 100   | 150   | 162.2  | 4.3 | -1.4384 |
| Zircon-13           | 348.5 | 181.4 | 0.521 | 0.0491 | 0.0034 | 0.1724 | 0.013  | 0.02548 | 0.00058 | 0.00783 | 0.00073 | -0.05   | 162.2  | 3.6 | 161.2  | 12   | 130   | 150   | 162.2  | 3.6 | -0.6203 |
| Zircon-14           | 252   | 106.4 | 0.422 | 0.0499 | 0.0037 | 0.18   | 0.015  | 0.02672 | 0.00061 | 0.00961 | 0.00089 | 0.32689 | 170    | 3.8 | 167.6  | 13   | 180   | 160   | 170    | 3.8 | -1.432  |
| Zircon-15           | 297.7 | 111.1 | 0.373 | 0.0527 | 0.0039 | 0.191  | 0.016  | 0.02587 | 0.00069 | 0.00879 | 0.00082 | 0.20068 | 164.6  | 4.4 | 177.2  | 13   | 310   | 170   | 164.6  | 4.4 | 7.11061 |
| Zircon-16           | 446.1 | 183.6 | 0.412 | 0.1104 | 0.0056 | 1.514  | 0.095  | 0.0988  | 0.002   | 0.0268  | 0.0024  | 0.48277 | 607.5  | 12  | 936    | 38   | 1826  | 93    | 607.5  | 12  | 35.0962 |
| Zircon-17           | 326   | 82.4  | 0.253 | 0.0491 | 0.0036 | 0.1723 | 0.014  | 0.02528 | 0.0006  | 0.00854 | 0.00083 | 0.01082 | 160.9  | 3.8 | 161    | 12   | 140   | 160   | 160.9  | 3.8 | 0.06211 |
| Zircon-18           | 460   | 117.1 | 0.255 | 0.0492 | 0.0033 | 0.1772 | 0.013  | 0.02593 | 0.00053 | 0.00877 | 0.00078 | -0.2613 | 165    | 3.3 | 166.5  | 11   | 170   | 140   | 165    | 3.3 | 0.9009  |
| Zircon-19           | 372   | 202.6 | 0.545 | 0.0502 | 0.0037 | 0.176  | 0.014  | 0.02534 | 0.00053 | 0.00839 | 0.00077 | 0.18461 | 161.3  | 3.3 | 164    | 12   | 210   | 170   | 161.3  | 3.3 | 1.64634 |
| Zircon-20           | 566   | 177.6 | 0.314 | 0.0737 | 0.0035 | 1.745  | 0.1    | 0.1722  | 0.0027  | 0.0532  | 0.0043  | 0.06476 | 1024.1 | 15  | 1024.9 | 37   | 1030  | 95    | 1024.1 | 15  | 0.07806 |
| Zircon-21           | 279.5 | 130.6 | 0.467 | 0.0509 | 0.0041 | 0.182  | 0.015  | 0.02602 | 0.00065 | 0.00836 | 0.00078 | -0.1521 | 165.6  | 4.1 | 169.4  | 13   | 200   | 170   | 165.6  | 4.1 | 2.24321 |
| Zircon-22           | 331   | 110.8 | 0.335 | 0.0513 | 0.0044 | 0.181  | 0.017  | 0.02538 | 0.00056 | 0.00748 | 0.00082 | 0.01665 | 161.6  | 3.5 | 168    | 14   | 250   | 180   | 161.6  | 3.5 | 3.80952 |
| Zircon-23           | 134.1 | 36.4  | 0.271 | 0.0513 | 0.005  | 0.188  | 0.019  | 0.02631 | 0.00078 | 0.00819 | 0.0011  | -0.0202 | 167.4  | 4.9 | 174    | 16   | 260   | 180   | 167.4  | 4.9 | 3.7931  |
| Zircon-24           | 167.4 | 55.9  | 0.334 | 0.0503 | 0.0042 | 0.184  | 0.017  | 0.02683 | 0.00074 | 0.00819 | 0.00091 | 0.30033 | 170.6  | 4.7 | 170    | 15   | 170   | 180   | 170.6  | 4.7 | -0.3529 |
| Zircon-25           | 290   | 104.8 | 0.361 | 0.0502 | 0.0045 | 0.17   | 0.015  | 0.02488 | 0.00062 | 0.00747 | 0.0007  | -0.303  | 158.4  | 3.9 | 159    | 13   | 190   | 190   | 158.4  | 3.9 | 0.37736 |
| Zircon-26           | 665   | 168   | 0.253 | 0.0498 | 0.0031 | 0.1833 | 0.013  | 0.02693 | 0.00046 | 0.00756 | 0.00067 | -0.1615 | 171.3  | 2.9 | 170.7  | 11   | 170   | 140   | 171.3  | 2.9 | -0.3515 |
| Zircon-27           | 385   | 102.2 | 0.265 | 0.0502 | 0.0032 | 0.1778 | 0.012  | 0.02572 | 0.00068 | 0.00749 | 0.00071 | 0.05737 | 163.7  | 4.2 | 166    | 11   | 218   | 140   | 163.7  | 4.2 | 1.38554 |
| Zircon-28           | 363   | 228   | 0.628 | 0.0524 | 0.0043 | 0.179  | 0.015  | 0.02533 | 0.00062 | 0.00707 | 0.00062 | -0.2289 | 161.8  | 4   | 167.2  | 13   | 260   | 180   | 161.8  | 4   | 3.22967 |
| Zircon-29           | 1059  | 210   | 0.198 | 0.049  | 0.0026 | 0.1786 | 0.011  | 0.02641 | 0.00047 | 0.00697 | 0.0006  | 0.09922 | 168.1  | 2.9 | 166.7  | 9.6  | 147   | 120   | 168.1  | 2.9 | -0.8398 |
| Zircon-30           | 140.4 | 47.3  | 0.337 | 0.0829 | 0.0067 | 0.31   | 0.025  | 0.02695 | 0.00088 | 0.01298 | 0.0013  | -0.0449 | 171.4  | 5.5 | 273    | 19   | 1290  | 170   | 171.4  | 5.5 | 37.2161 |
| Zircon-31           | 210   | 64.7  | 0.308 | 0.0503 | 0.0046 | 0.178  | 0.016  | 0.02557 | 0.00066 | 0.00741 | 0.00077 | -0.218  | 162.8  | 4.1 | 167    | 14   | 180   | 190   | 162.8  | 4.1 | 2.51497 |
| Zircon-32           | 453   | 100   | 0.221 | 0.0502 | 0.0041 | 0.182  | 0.016  | 0.02625 | 0.00054 | 0.0079  | 0.00087 | 0.04603 | 167    | 3.4 | 170    | 14   | 200   | 180   | 167    | 3.4 | 1.76471 |
| Zircon-33           | 229   | 34.7  | 0.152 | 0.0818 | 0.0061 | 0.292  | 0.023  | 0.02605 | 0.00071 | 0.021   | 0.0024  | 0.10598 | 165.8  | 4.5 | 259    | 18   | 1240  | 140   | 165.8  | 4.5 | 35.9846 |
| Zircon-34           | 96    | 33.2  | 0.346 | 0.0613 | 0.0063 | 0.23   | 0.025  | 0.02687 | 0.00099 | 0.00876 | 0.0012  | -0.04   | 170.9  | 6.2 | 215    | 21   | 690   | 210   | 170.9  | 6.2 | 20.5116 |
| Zircon-35_GSD-8-10t | 328   | 220.3 | 0.672 | 0.0492 | 0.0037 | 0.179  | 0.015  | 0.0264  | 0.00054 | 0.00804 | 0.00069 | 0.29305 | 167.9  | 3.4 | 166.6  | 13   | 130   | 150   | 167.9  | 3.4 | -0.7803 |
|                     |       |       |       |        |        |        |        |         |         |         |         |         |        |     |        |      |       |       |        |     |         |
| Zircon-01_GSD-8-10t | 2550  | 630   | 0.247 | 0.0495 | 0.0025 | 0.1735 | 0.011  | 0.02561 | 0.00043 | 0.00792 | 0.00063 | 0.3516  | 163    | 2.7 | 162.4  | 9.2  | 176   | 120   | 163    | 2.7 | -0.3695 |

|                     |       |       |       |        |        |        |       |         |         |         |         |         |       |     |       |     |      |     |       |     |         |
|---------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-----|-------|-----|------|-----|-------|-----|---------|
| Zircon-02_4         | 1200  | 736.7 | 0.614 | 0.0496 | 0.0029 | 0.1717 | 0.012 | 0.0253  | 0.00059 | 0.00814 | 0.0007  | 0.29109 | 161.1 | 3.7 | 160.9 | 10  | 169  | 130 | 161.1 | 3.7 | -0.1243 |
| Zircon-03_4         | 534   | 283   | 0.53  | 0.1076 | 0.0072 | 0.396  | 0.03  | 0.02664 | 0.00062 | 0.01603 | 0.0014  | -0.1278 | 169.5 | 3.9 | 338   | 22  | 1778 | 120 | 169.5 | 3.9 | 49.8521 |
| Zircon-04_4         | 781   | 34.5  | 0.044 | 0.0885 | 0.0071 | 0.304  | 0.027 | 0.02514 | 0.00054 | 0.0671  | 0.0062  | 0.05279 | 160.1 | 3.4 | 269   | 21  | 1360 | 150 | 160.1 | 3.4 | 40.4833 |
| Zircon-05_4         | 680   | 149   | 0.219 | 0.0501 | 0.0031 | 0.179  | 0.013 | 0.02616 | 0.00052 | 0.00921 | 0.00089 | 0.08519 | 166.5 | 3.3 | 167   | 11  | 196  | 140 | 166.5 | 3.3 | 0.2994  |
| Zircon-06_4         | 590   | 224.8 | 0.381 | 0.0509 | 0.0031 | 0.1871 | 0.013 | 0.02675 | 0.00055 | 0.00766 | 0.00071 | -0.1456 | 170.2 | 3.5 | 174   | 11  | 221  | 130 | 170.2 | 3.5 | 2.18391 |
| Zircon-07_4         | 640   | 115   | 0.18  | 0.0499 | 0.003  | 0.1749 | 0.012 | 0.02571 | 0.00047 | 0.0085  | 0.00078 | 0.07611 | 163.7 | 2.9 | 164.3 | 9.9 | 186  | 130 | 163.7 | 2.9 | 0.36519 |
| Zircon-08_4         | 1344  | 162.7 | 0.121 | 0.0503 | 0.0029 | 0.1747 | 0.011 | 0.02535 | 0.00048 | 0.00861 | 0.00082 | -0.027  | 161.4 | 3   | 163.4 | 9.8 | 198  | 130 | 161.4 | 3   | 1.22399 |
| Zircon-09_4         | 1414  | 336   | 0.238 | 0.0495 | 0.0027 | 0.1706 | 0.011 | 0.02524 | 0.00051 | 0.00781 | 0.00069 | -0.1795 | 160.7 | 3.2 | 159.8 | 9.3 | 166  | 120 | 160.7 | 3.2 | -0.5632 |
| Zircon-10_4         | 593   | 208   | 0.351 | 0.0498 | 0.0032 | 0.177  | 0.013 | 0.02582 | 0.00051 | 0.00788 | 0.00071 | 0.03552 | 164.4 | 3.2 | 165.4 | 11  | 180  | 140 | 164.4 | 3.2 | 0.60459 |
| Zircon-11_4         | 791   | 249.7 | 0.316 | 0.0494 | 0.0031 | 0.1753 | 0.012 | 0.0261  | 0.00054 | 0.008   | 0.0007  | 0.10597 | 166.1 | 3.4 | 163.9 | 11  | 190  | 150 | 166.1 | 3.4 | -1.3423 |
| Zircon-12_4         | 151.3 | 56.01 | 0.37  | 0.0586 | 0.0063 | 0.206  | 0.023 | 0.02579 | 0.00079 | 0.0091  | 0.001   | 0.12279 | 164.1 | 5   | 192   | 20  | 490  | 240 | 164.1 | 5   | 14.5313 |
| Zircon-13_4         | 384   | 143   | 0.372 | 0.0515 | 0.0039 | 0.179  | 0.015 | 0.02543 | 0.00059 | 0.0085  | 0.00076 | 0.2169  | 161.9 | 3.7 | 166.8 | 13  | 230  | 160 | 161.9 | 3.7 | 2.93765 |
| Zircon-14_4         | 730   | 164   | 0.225 | 0.0541 | 0.0034 | 0.1917 | 0.014 | 0.02591 | 0.00053 | 0.00952 | 0.00091 | 0.06164 | 164.9 | 3.3 | 177.8 | 12  | 360  | 140 | 164.9 | 3.3 | 7.25534 |
| Zircon-15_4         | 885   | 207.1 | 0.234 | 0.0494 | 0.0028 | 0.1669 | 0.011 | 0.02489 | 0.00048 | 0.00779 | 0.0007  | 0.03832 | 158.5 | 3   | 156.6 | 9.5 | 158  | 130 | 158.5 | 3   | -1.2133 |
| Zircon-16_4         | 1480  | 101.7 | 0.069 | 0.0515 | 0.0032 | 0.1866 | 0.013 | 0.02646 | 0.00048 | 0.01089 | 0.0011  | 0.12029 | 168.4 | 3   | 173.6 | 11  | 247  | 130 | 168.4 | 3   | 2.99539 |
| Zircon-17_4         | 995   | 123   | 0.124 | 0.0498 | 0.0028 | 0.1736 | 0.011 | 0.02559 | 0.00054 | 0.00928 | 0.00089 | 0.1466  | 162.9 | 3.4 | 163.4 | 9.3 | 184  | 130 | 162.9 | 3.4 | 0.306   |
| Zircon-18_4         | 1015  | 408   | 0.402 | 0.0507 | 0.0031 | 0.1773 | 0.012 | 0.02542 | 0.00053 | 0.0084  | 0.0007  | -0.3245 | 161.8 | 3.3 | 165.6 | 10  | 207  | 130 | 161.8 | 3.3 | 2.29469 |
| Zircon-19_4         | 1595  | 76.1  | 0.048 | 0.0526 | 0.0033 | 0.1821 | 0.012 | 0.02572 | 0.0005  | 0.0138  | 0.0027  | -0.1245 | 163.7 | 3.1 | 169.8 | 10  | 348  | 140 | 163.7 | 3.1 | 3.59246 |
| Zircon-20_4         | 350   | 129   | 0.369 | 0.0542 | 0.0038 | 0.1947 | 0.015 | 0.02642 | 0.00055 | 0.00848 | 0.00083 | -0.0982 | 168.1 | 3.5 | 180.2 | 12  | 360  | 150 | 168.1 | 3.5 | 6.71476 |
| Zircon-21_4         | 167   | 68.3  | 0.409 | 0.0523 | 0.0057 | 0.191  | 0.023 | 0.02684 | 0.0011  | 0.0086  | 0.001   | 0.50065 | 170.7 | 6.7 | 180   | 19  | 360  | 210 | 170.7 | 6.7 | 5.16667 |
| Zircon-22_4         | 1165  | 174.6 | 0.15  | 0.05   | 0.0028 | 0.1749 | 0.011 | 0.02569 | 0.00047 | 0.00895 | 0.00079 | -0.1989 | 163.5 | 2.9 | 163.6 | 9.7 | 198  | 130 | 163.5 | 2.9 | 0.06112 |
| Zircon-23_4         | 1121  | 175.2 | 0.156 | 0.0503 | 0.0029 | 0.1718 | 0.011 | 0.02487 | 0.00044 | 0.00869 | 0.00078 | -0.2229 | 158.3 | 2.8 | 160.9 | 9.5 | 208  | 130 | 158.3 | 2.8 | 1.61591 |
| Zircon-24_4         | 720   | 203.3 | 0.282 | 0.0493 | 0.0029 | 0.1738 | 0.012 | 0.02593 | 0.00049 | 0.0082  | 0.00079 | 0.26201 | 165   | 3.1 | 162.6 | 10  | 163  | 120 | 165   | 3.1 | -1.476  |
| Zircon-25_4         | 529   | 52.6  | 0.099 | 0.0529 | 0.0035 | 0.1859 | 0.014 | 0.02555 | 0.00058 | 0.00995 | 0.0011  | 0.26117 | 162.6 | 3.7 | 172.7 | 12  | 290  | 140 | 162.6 | 3.7 | 5.84829 |
| Zircon-26_4         | 510   | 41.6  | 0.082 | 0.0501 | 0.0034 | 0.1723 | 0.012 | 0.02511 | 0.00053 | 0.00831 | 0.00092 | -0.2437 | 159.9 | 3.4 | 161.2 | 10  | 180  | 140 | 159.9 | 3.4 | 0.80645 |
| Zircon-27_4         | 127.6 | 38.8  | 0.304 | 0.0538 | 0.0061 | 0.193  | 0.023 | 0.02609 | 0.00091 | 0.00894 | 0.001   | 0.07905 | 166   | 5.7 | 177   | 19  | 330  | 230 | 166   | 5.7 | 6.21469 |
| Zircon-28_4         | 639   | 145.7 | 0.228 | 0.0497 | 0.0031 | 0.1765 | 0.012 | 0.0259  | 0.00051 | 0.00854 | 0.0008  | -0.0576 | 164.8 | 3.2 | 164.8 | 11  | 165  | 140 | 164.8 | 3.2 | 0       |
| Zircon-29_4         | 562   | 99.6  | 0.177 | 0.0561 | 0.0034 | 0.1954 | 0.013 | 0.02541 | 0.00054 | 0.00959 | 0.00098 | 0.06089 | 161.8 | 3.4 | 181   | 11  | 451  | 140 | 161.8 | 3.4 | 10.6077 |
| Zircon-30_4         | 404   | 193   | 0.478 | 0.0546 | 0.0034 | 0.1964 | 0.013 | 0.02636 | 0.00057 | 0.00906 | 0.00079 | -0.0379 | 167.7 | 3.6 | 181.8 | 11  | 376  | 140 | 167.7 | 3.6 | 7.75578 |
| Zircon-31_4         | 483   | 109   | 0.226 | 0.0533 | 0.0037 | 0.1938 | 0.014 | 0.02647 | 0.00054 | 0.00958 | 0.00091 | -0.2221 | 168.4 | 3.4 | 179.6 | 12  | 340  | 150 | 168.4 | 3.4 | 6.23608 |
| Zircon-32_4         | 880   | 107.3 | 0.122 | 0.0489 | 0.0028 | 0.178  | 0.012 | 0.02627 | 0.00048 | 0.0086  | 0.00088 | 0.15143 | 167.1 | 3   | 166.2 | 10  | 148  | 130 | 167.1 | 3   | -0.5415 |
| Zircon-33_4         | 376   | 85.9  | 0.228 | 0.0548 | 0.0041 | 0.1885 | 0.014 | 0.02526 | 0.00066 | 0.00803 | 0.00082 | -0.1201 | 160.8 | 4.1 | 175.1 | 12  | 360  | 160 | 160.8 | 4.1 | 8.16676 |
| Zircon-34_4         | 116.9 | 47    | 0.402 | 0.0525 | 0.0053 | 0.182  | 0.019 | 0.02606 | 0.00084 | 0.00912 | 0.0011  | -0.0659 | 165.9 | 5.2 | 169   | 16  | 270  | 200 | 165.9 | 5.2 | 1.83432 |
| Zircon-35_GSD-8-10t | 641   | 208   | 0.324 | 0.0507 | 0.0029 | 0.1812 | 0.012 | 0.02619 | 0.00053 | 0.00836 | 0.00069 | 0.16743 | 166.6 | 3.3 | 168.9 | 10  | 209  | 130 | 166.6 | 3.3 | 1.36175 |

| Muestra | Tipo         | Concentración (D.I.) |           |       |         |    |           |           | Concentración (D.I.) |             |       |         |    |       |      |           |           |
|---------|--------------|----------------------|-----------|-------|---------|----|-----------|-----------|----------------------|-------------|-------|---------|----|-------|------|-----------|-----------|
|         |              | 87Rb/86Sr            | 87Sr/86Sr | 1 sd* | 1 SE(M) | n  | Rb<br>ppm | Sr<br>ppm | 147Sm/144Nd          | 143Nd/144Nd | 1 sd* | 1 SE(M) | n  | εNd   | 1 sd | Sm<br>ppm | Nd<br>ppm |
| CSD02   | granito      | 1.008                | 0.708862  | 35    | 5       | 57 | 67.62     | 194.06    | 0.123                | 0.512400    | 14    | 2       | 68 | -4.64 | 0.27 | 4.31      | 21.11     |
| CSD11   | granito      | 1.130                | 0.707953  | 30    | 4       | 58 | 140.26    | 359.12    | 0.104                | 0.512448    | 13    | 2       | 68 | -3.71 | 0.25 | 3.10      | 17.98     |
| CSD15   | granito      | 1.515                | 0.710089  | 25    | 3       | 58 | 115.92    | 221.45    | 0.127                | 0.512416    | 15    | 2       | 68 | -4.33 | 0.29 | 8.29      | 39.31     |
| CSD18   | gabro        | 0.247                | 0.705982  | 22    | 3       | 55 | 33.38     | 391.50    | 0.140                | 0.512450    | 13    | 2       | 66 | -3.67 | 0.25 | 4.06      | 17.59     |
| CSD21   | gabro        | 0.403                | 0.706636  | 31    | 4       | 57 | 57.09     | 410.21    | 0.140                | 0.512439    | 20    | 2       | 53 | -3.88 | 0.39 | 2.44      | 10.54     |
| CSD22   | granodiorita | 0.438                | 0.706698  | 28    | 4       | 57 | 48.90     | 322.70    | 0.122                | 0.512443    | 20    | 3       | 53 | -3.80 | 0.39 | 3.54      | 17.57     |

Análisis realizados en Espectrómetro de masas TRITON PLUS (Sr, Nd) y Finnigan MAT 262 (Rb, Sm)

Valor del laboratorio del ε 0.710256 ± 13\* n = 99

Valor del laboratorio del ε 0.511849 ± 4\* n = 36

1 sd = 1 desviación estándar

\*) En las dos últimas cifras.

1 SE(M) = 1sd/raiz n

n = número de relaciones medidas por corrida

D.I. = dilución isotópica

Participación en los trabajos analíticos:

M.C. Gabriela Solís Pichardo

M.C. Gerardo Arrieta Garcia

Ing. Teodoro Hernández Treviño

Los análisis isotópicos de Sr y Nd se realizaron con un espectrómetro de masas con fuente iónica térmica marca THERMO SCIENTIFIC MODELO TRITON PLUS; los de Rb y Sm en el espectrómetro marca FINNIGAN MAT 262 en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS), Instituto de Geofísica, UNAM. El TRITON cuenta con 9 colectores Faraday ajustables y 5 contadores iónicos mientras que el MAT 262 tiene una copa central y siete Faraday ajustables. Todas las mediciones se hicieron de manera estática.

Las muestras de Rb, Sr, Sm y Nd se cargaron como cloruros sobre filamento doble de renio y se midieron como iones metálicos. En cada corrida se analizaron 30 relaciones isotópicas para Rb y Sm, 60 para Sr y 70 para Nd. El software integrado arroja *outliers* dependiendo de la estabilidad de la señal durante la adquisición de datos. Los valores (1sd = ±1σ<sub>abs</sub>) se refieren a los errores durante la medición, en los últimos dos dígitos; 1 SE(M) = 1σ<sub>abs</sub>/raiz n. Todas las relaciones isotópicas de Sr y Nd se corrigieron por fraccionamiento de masas vía normalización a <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr = 0.1194 y <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.7219, respectivamente. Valores del LUGIS para el estándar NBS 987 (Sr): <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.710256 ± 13 (±1σ<sub>abs</sub>, n = 99); para el estándar La Jolla (Nd): <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.511849 ± 4 (±1σ<sub>abs</sub>, n = 36).

La incertidumbre relativa de <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr = ± 2% y de <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd = ± 1.5% (1σ). La reproducibilidad relativa (1σ) de las concentraciones de Rb, Sr, Sm y Nd es de ± 4.5%, ± 1.8%, ± 3.2% y ± 2.7% respectivamente.

Los blancos analíticos obtenidos en el tiempo de los análisis de las muestras de este trabajo resultaron: 0.18 ng Rb, 0.96 ng Sr, 0.73 ng Sm y 0.72 ng Nd (blancos de procedimiento total).