VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.

Petrografía de muestras de intrusivos de la Mesa Central y Sierra Madre Occidental

Petrography of samples of some Mesa Central and Sierra Madre Occidental intrusions

Isela Guadalupe Alejos Delgado[1], Fátima Vianney González Juárez[2,] Isidro Loza Aguirre[3] Tomás Alejandro Peña Alonso[4]

[1]Departamento de Minas, Metalurgia e Ingeniería Geológica, Universidad de Guanajuato, Guanajuato 36000, México. ig.alejosdelgado@ugto.mx
[2]Departamento de Minas, Metalurgia e Ingeniería Geológica, Universidad de Guanajuato, Guanajuato 36000, México. fv.gonzalezjuarez@ugto.mx
[3]Departamento de Minas, Metalurgia e Ingeniería Geológica, Universidad de Guanajuato, Guanajuato 36000, México. isidro.loza@ugto.mx
[4]Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Talonso@docentes.uat.edu.mx

Resumen

En este trabajo se presenta una comparación entre las características petrográficas de muestras de rocas intrusivas representativas de la Mesa Central (Granito Comanja, Granito Peñón Blanco y Formación Tesorera) y la Sierra Madre Occidental (intrusivos de Concordia, Sinaloa), con el fin de encontrar similitudes y diferencias mineralógicas, texturales y de alteración hidrotermal de las formaciones estudiadas. Se estudiaron las láminas delgadas con microscopía en luz polarizada plana (PPL) y nicoles cruzados (XPL), para identificar las especies minerales principales, su proporción modal, texturas y alteración. Los resultados muestran que las muestras de las dos provincias están dominadas por asociaciones minerales de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y biotita, representativas de magmas calcoalcalinos de composiciones félsicas a intermedias, que se enfriaron lentamente en un ambiente plutónico. Las muestras Granito Comanja, Granito Peñón Blanco y Formación Tesorera, muestran mayor conservación de minerales primarios y alteración hidrotermal moderada representada principalmente por sericitización, argilización y cloritización localizada. Las muestras de intrusivos de Concordia presentan una fuerte silicificación generalizada, argilización masiva de los feldespatos, oxidación de minerales y gran cantidad de minerales secundarios, lo que indica un mayor tiempo de interacción con fluidos hidrotermales, una vez que fueron emplazados. La comparación petrográfica sirvió para encontrar lazos de afinidad entre las unidades bajo estudio con descritas en la literatura, pero también permitió encontrar diferencias en su evolución postmagmática. Este trabajo también muestra que la información obtenida a partir de la petrografía óptica puede proporcionar una valiosa e importante información para entender mejor la evolución de los cuerpos intrusivos y contribuir así, en mejor medida, a la comprensión de los procesos magmáticos e hidrotermales que caracterizan a diversas provincias geológicas en México.

Palabras clave: petrografía, granito Comanja, intrusivos de Concordia, Mesa Central, Sierra Madre Occidental, alteración hidrotermal.

Introducción

Las rocas ígneas constituyen un componente fundamental de la corteza terrestre y registran información sobre los procesos magmáticos, tectónicos e hidrotermales que intervienen en la evolución geológica de una región. Su composición mineralógica, textura y grado de alteración permiten reconstruir las condiciones de cristalización del magma, así como los eventos posteriores que modificaron sus características originales. Por ello, el análisis petrográfico mediante láminas delgadas constituye una de las herramientas más importantes para la caracterización e interpretación de cuerpos ígneos.

En este trabajo se presenta la caracterización petrográfica de muestras procedentes de las provincias fisiográficas Mesa Central y Sierra Madre Occidental, integradas por granitos, granodioritas y una riolita alterada. Mediante la identificación de minerales en luz polarizada plana (PPL) y nicoles cruzados (XPL), se describen sus características mineralógicas, texturales y los procesos de alteración que afectaron a cada litología.

Los resultados obtenidos se comparan con la información petrográfica y geológica reportada para unidades como el Granito Peñón Blanco, el Granito Comanja y otros cuerpos ígneos de la Mesa Central, así como con unidades representativas de la Sierra Madre Occidental, con el propósito de interpretar su origen, establecer afinidades petrológicas y discutir su posible correlación con unidades previamente estudiadas mediante análisis petrográficos, geoquímicos y geocronológicos.

Marco teórico

Las rocas ígneas provienen del enfriamiento y solidificación de una sustancia silicatada llamada magma, que consiste en una fase líquida, cristales suspendidos y gases disueltos. El magma se forma a partir de la fusión parcial del manto superior o de la corteza continental debido al aumento en la temperatura, a la disminución de la presión o a la suma de fluidos, en distintos entornos tectónicos tales como zonas de subducción, rifts continentales y puntos calientes (Best, 2003; Winter, 2010).

Dependiendo del lugar de cristalización, las rocas ígneas pueden clasificarse en intrusivas y extrusivas. Las rocas intrusivas o plutónicas (Figura 1) son aquellas que cristalizan lentamente en el interior de la corteza terrestre, normalmente a profundidades entre 5 y más de 30 km, donde las altas presiones y las bajas velocidades de enfriamiento favorecen el crecimiento de cristales distinguibles y el desarrollo de texturas faneríticas y holocristalinas. Las rocas extrusivas o volcánicas, por el contrario, se producen cuando el magma alcanza la superficie y se enfría más rápidamente, dando lugar a texturas afaníticas, porfídicas o vítreas (Philpotts y Ague, 2009).

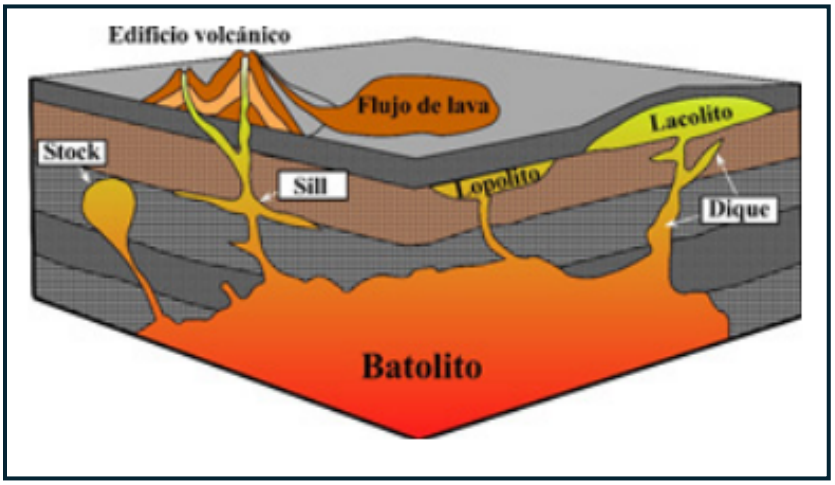


Figura 1. Esquema simplificado del emplazamiento de cuerpos ígneos intrusivos y su cristalización en profundidad. Modificado de Best (2003).

La composición química del magma determina la mineralogía y las propiedades físicas de las rocas que se formen. Los magmas félsicos (SiO_2 > 63 %) tienen alta viscosidad, un alto contenido en volátiles y temperaturas de cristalización de alrededor de 650 a 800 °C, y dan lugar a granitos, riolitas, y otras rocas félsicas. Los magmas intermedios (52–63 % de SiO_2) tienen temperaturas de cristalización que varían desde 800 a 950 °C y forman rocas intermedias como dioritas, granodioritas y andesitas. Los magmas máficos tienen menos contenido en sílice, menor viscosidad y temperaturas por encima de 1000 °C, y forman gabros y basaltos (Winter, 2010).

La cristalización de estos magmas sigue la Serie de Reacción de Bowen (Figura 2.), que describe la secuencia de formación de los minerales conforme disminuye la temperatura. Los primeros minerales en cristalizar

corresponden a olivino, piroxeno y plagioclasas cálcicas; posteriormente se desarrollan anfíboles, biotita y plagioclasas progresivamente más sódicas. En las etapas finales cristalizan feldespato potásico, moscovita y cuarzo, minerales característicos de magmas evolucionados ricos en sílice (Bowen, 1928). Esta secuencia constituye uno de los fundamentos para interpretar la evolución petrológica de los cuerpos ígneos y comprender las asociaciones minerales observadas en láminas delgadas.

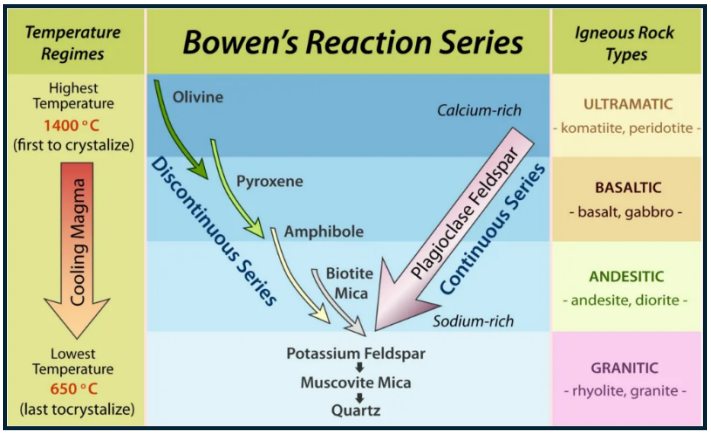


Figura 2. Serie de reacción de Bowen, que muestra la secuencia de cristalización de los minerales durante el enfriamiento del magma. Modificado de Bowen (1928).

Las litologías analizadas en este estudio corresponden principalmente a granitos, granodioritas y una riolita alterada hidrotermalmente. Estas rocas representan diferentes etapas y condiciones de evolución de magmas félsicos e intermedios. (Figura 3).

El granito es una roca ígnea plutónica de composición félsica, integrada principalmente por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita, con presencia ocasional de hornblenda o moscovita. Se forma por la cristalización lenta de magmas ricos en sílice dentro de la corteza continental y constituye uno de los principales componentes de los continentes. Su lenta velocidad de enfriamiento favorece el desarrollo de cristales de tamaño medio a grueso y texturas faneríticas (Winter, 2010).

La granodiorita es también una roca plutónica; sin embargo, en comparación con el granito presenta una mayor proporción de plagioclasa respecto al feldespato potásico y un contenido relativamente más abundante de minerales ferromagnesianos, principalmente hornblenda y biotita. Su composición es intermedia a félsica y generalmente se asocia con magmas generados en márgenes convergentes relacionados con procesos de subducción (Philpotts y Ague, 2009).

La riolita constituye el equivalente volcánico del granito. Posee una composición rica en sílice, pero debido a su rápido enfriamiento desarrolla una matriz de grano fino o vítrea con fenocristales de cuarzo y feldespatos. En numerosos casos estas rocas son afectadas por fluidos hidrotermales, generando procesos de silicificación, argilización y oxidación que modifican significativamente su composición mineralógica original (Best, 2003).

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.

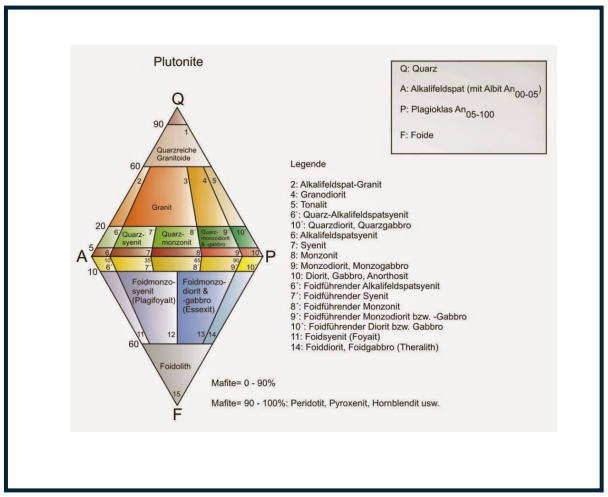


Figura 3. Diagrama QAPF para la clasificación de rocas ígneas plutónicas de acuerdo con su composición modal. Modificado de Streckeisen (1976).

Después de su emplazamiento, los cuerpos ígneos pueden ser afectados por la circulación de fluidos hidrotermales calientes que transportan sílice, dióxido de carbono, azufre y diversos elementos metálicos. La interacción entre estos fluidos y los minerales primarios produce cambios mineralógicos y texturales conocidos como alteración hidrotermal (Pirajno, 2009).

Entre las alteraciones más comunes se encuentra la silicificación, caracterizada por la precipitación o reemplazo por cuarzo secundario; la argilización, donde feldespatos y minerales ferromagnesianos son reemplazados por minerales arcillosos como caolinita e illita; la sericitización, que transforma los feldespatos en sericita; la cloritización, producida por la alteración de biotita y hornblenda hacia clorita; y la carbonatación, representada por la formación de calcita o dolomita. Estos procesos modifican considerablemente la textura y composición de las rocas y constituyen indicadores importantes de sistemas hidrotermales asociados con mineralización (Winter, 2010; Pirajno, 2009).

La petrografía óptica es una de las principales herramientas para la identificación de minerales y la interpretación de la evolución de las rocas ígneas. Mediante el estudio de láminas delgadas con microscopio petrográfico es posible reconocer minerales primarios y secundarios, estimar porcentajes modales y describir texturas que reflejan las condiciones de cristalización y alteración (Nesse, 2013).

En luz polarizada plana (PPL) se analizan propiedades ópticas como color, relieve, hábito, forma cristalina, pleocroísmo, exfoliación y alteración. En nicoles cruzados (XPL) se identifican características como colores de interferencia, maclas, tipo de extinción, birrefringencia, zonamiento y relaciones entre minerales. Estas propiedades permiten diferenciar minerales con composiciones similares y reconocer evidencias de deformación, recristalización y alteración hidrotermal (Mackenzie y Guilford, 1980).

Geología Regional

Las muestras analizadas en este estudio proceden de las provincias fisiográficas Mesa Central y Sierra Madre Occidental, dos regiones que registran una compleja evolución tectonomagmática desde el Mesozoico hasta el Cenozoico (Nieto-Samaniego et al., 2023; Ferrari et al., 2007). Su desarrollo está relacionado con la subducción de la placa Farallón bajo la placa de Norteamérica, proceso que dio origen al magmatismo de arco continental durante el Cretácico Tardío y Paleógeno, seguido por un régimen extensional que favoreció el emplazamiento de cuerpos plutónicos y el desarrollo de extensos campos volcánicos silícicos.

Mesa Central

La Mesa Central comprende una amplia región del centro-norte de México caracterizada por un basamento constituido por rocas sedimentarias mesozoicas, secuencias volcánicas y numerosos cuerpos intrusivos de composición intermedia a félsica. La evolución geológica de esta provincia refleja la transición entre la deformación compresiva de la orogenia Laramide y la extensión cenozoica, procesos que controlaron el emplazamiento de granitos, granodioritas y otros plutones, así como el desarrollo de importantes sistemas hidrotermales asociados con mineralización metálica (Nieto-Samaniego et al., 2023; Botero-Santa et al., 2015; Tristán-González et al., 2015)

Sierra Madre Occidental

La Sierra Madre Occidental constituye una de las provincias ígneas silícicas más extensas del mundo y representa el resultado de un intenso episodio de magmatismo desarrollado principalmente entre el Eoceno y el Oligoceno (Ferrari et al., 2007). Esta provincia está integrada por extensas secuencias de ignimbritas, riolitas, tobas y cuerpos intrusivos de afinidad calcoalcalina, cuya evolución estuvo estrechamente vinculada con la subducción de la placa Farallón y con procesos de diferenciación magmática y extensión cortical. La actividad magmática fue acompañada por una importante circulación de fluidos hidrotermales, responsable de la formación de numerosos distritos mineralizados del noroeste de México (Aguirre-Díaz y McDowell, 1991; McDowell y Clabaugh, 1979).

Las características geológicas de ambas provincias proporcionan el contexto regional para las unidades estudiadas en este trabajo. La descripción particular de los cuerpos ígneos y formaciones de las que proceden las muestras se presenta en la siguiente sección, con base en la cartografía del Servicio Geológico Mexicano y en estudios geológicos específicos para cada unidad.

Geología del área

Granito Peñón Blanco

La muestra BAL procede del Granito Peñón Blanco que aflora en la Sierra de Salinas, entre los estados de Zacatecas y San Luis Potosí, dentro de la provincia fisiográfica Mesa Central. Corresponde a un conjunto de cuerpos plutónicos e hipabisales emplazados en la secuencia sedimentaria triásica, cuyo cuerpo principal conforma el intrusivo Peñón Blanco (Silva-Romo, 1996; Nieto-Samaniego et al., 2005).

Petrográficamente, presenta una textura porfídica con fenocristales inmersos en una matriz equigranular y una composición dominada por cuarzo (~35 %), ortoclasa (10–15 %), oligoclasa (~10 %) y muscovita (3.5–4 %), con turmalina negra como mineral accesorio, lo que indica una composición granítica peraluminosa (Silva-Romo, 1996). Un fechamiento K-Ar realizado en muscovita reporta una edad de 48 ± 4 Ma, correspondiente al Eoceno, lo que relaciona su emplazamiento con el magmatismo paleógeno de la Mesa Central y la etapa posterior a la deformación laramídica (Mujica-Mondragón y Albarrán-Jacobo, 1983, citado por Silva-Romo, 1996; Nieto-Samaniego et al., 2005).

Granito Comanja

Las muestras COMA se colectaron en distintos afloramientos del Granito Comanja que aflora en la región de Comanja de Corona, entre los estados de Guanajuato y Jalisco, dentro de la provincia fisiográfica Mesa Central. Corresponde a un cuerpo plutónico emplazado durante el Paleógeno, asociado al magmatismo que sucedió a la orogenia Laramide y que marcó la transición hacia un régimen tectónico extensional en el centro de México (Botero-Santa et al., 2018; Nieto-Samaniego et al., 2023).

Petrográficamente, está constituido principalmente por granito y granodiorita de textura fanerítica de grano medio a grueso, compuestos por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita y hornblenda, con minerales accesorios como apatito, circón y minerales opacos. Dataciones U-Pb en circones indican edades cercanas a

51–49 Ma, lo que confirma su emplazamiento durante el Eoceno. Su composición calcoalcalina y peraluminosa refleja la cristalización de magmas evolucionados emplazados en niveles someros de la corteza continental, constituyendo uno de los principales cuerpos intrusivos paleógenos de la Mesa Central (Botero-Santa et al., 2018; Ángeles-Moreno et al., 2017).

Formación Tesorera

Las muestras TES proceden del Complejo Ígneo La Tesorera, que se localiza en el estado de Zacatecas, dentro de la provincia fisiográfica Mesa Central. Está constituido por una secuencia de rocas sedimentarias y vulcanosedimentarias mesozoicas del terreno Guerrero, intrusionadas por la Granodiorita Tesorera durante el Cretácico Tardío (≈74 Ma). Posteriormente, durante el Paleoceno-Eoceno, se emplazaron domos dacíticos, así como un sistema de diques y domos riolíticos con edades entre 50 y 44 Ma, relacionados con el magmatismo postlaramídico de la Mesa Central (Tristán-González et al., 2015).

La Granodiorita Tesorera presenta una composición calcoalcalina, dominada por plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, hornblenda y biotita. Los estudios geoquímicos indican que estos magmas se originaron en un ambiente de arco continental y evolucionaron mediante procesos de diferenciación magmática y participación de la corteza continental. El Complejo Ígneo La Tesorera constituye una unidad representativa para comprender la transición entre el magmatismo laramídico y el volcanismo paleógeno de la Mesa Central (Tristán-González et al., 2015; Nieto-Samaniego et al., 2023).

Unidades ígneas de la Sierra Madre Occidental

Las rocas COP y CNG proceden de la Sierra Madre Occidental, una de las mayores provincias ígneas ácido-calcoalcalinas del mundo. Esta gran provincia ígnea, desarrollada principalmente en el Eoceno y Oligoceno, es el resultado del vulcanismo asociado a la subducción de la placa Farallón bajo la placa de Norteamérica. En Sierra Madre Occidental se extienden grandes secuencias de ignimbritas, riolitas, tobas, entre otros. También se encuentran numerosos cuerpos ígneos intrusivos de composición granítica y granodiorítica, que constituyen diferentes etapas del desarrollo de la provincia magmática (Ferrari et al., 2007; Aguirre-Díaz & McDowell, 1991).

Los cuerpos intrusivos de Sierra Madre Occidental son de afinidad calcoalcalina y alto contenido de sílice, y sus asociaciones mineralógicas están dominadas por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita y hornblenda; su emplazamiento estuvo acompañado de una intensa actividad hidrotermal responsable de procesos de silicificación, argilización y mineralización metálica ampliamente distribuidas. Todo lo anterior determina que la Sierra Madre Occidental sea una de las provincias magmáticas más importantes de México y un referente para el estudio de la evolución de los magmas félsicos continentales (Ferrari et al., 2007; McDowell & Clabaugh, 1979; Aguirre-Díaz & McDowell, 1991).



Figura 4. Ubicación de las muestras

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.

Análisis petrográfico de las láminas delgadas

Para identificar el origen de las muestras analizadas petrográficamente, en la Tabla 1 se describen las claves de campo, así como las localizaciones de las coordenadas UTM. Las muestras COMA se obtuvieron del Granito Comanja (Guanajuato), las muestras TES de la Formación Tesorera (Zacatecas), la muestra BAL del intrusivo Peñón Blanco (San Luis Potosí), mientras que las muestras COP y CNG son de cuerpos intrusivos que afloran en la región de Concordia y el centro-sur del estado de Sinaloa.

Tabla 1. *Ubicación de las muestras analizadas petrográficamente.*

Clave de la muestra	UTM Este (m)	UTM Norte (m)
BAL-04	795262.566	2520514.9
TES-02	795468.838	2520450.51
TES-04	798450.375	2511421.79
TES-07	794758.444	2511315.32
TES-08	795262.566	2520514.9
COMA-04	242128	2338157
COMA-05	242567	2339028
COMA-06	210745.055	2363874.14
COMA-07	210942.286	2363689.5
COMA-08	214573.667	2359527.53
COP-02	408364.5	2591285.38
COP-07	409734.6	2591377.8
COP-08	415580.4	2592759.1
CNG-02	408364.5	2591285.38

BAL-04

La muestra BAL-04 presenta una textura fanerítica de grano medio e inequigranular. Está constituida principalmente por plagioclasa (≈40 %), cuarzo (≈30 %), feldespato potásico (≈20 %) y minerales secundarios (≈10 %). En luz polarizada plana (PPL), la plagioclasa presenta relieve bajo y se observa parcialmente alterada; el cuarzo es incoloro, anhedral y de relieve bajo; el feldespato potásico también presenta relieve bajo y se distribuye entre los cristales de cuarzo y plagioclasa. Se identifican además zonas con posible material arcilloso o calcita secundaria. En nicoles cruzados (XPL), la plagioclasa muestra maclas polisintéticas y colores de interferencia de primer orden, mientras que el cuarzo presenta colores de primer orden y extinción localmente ondulatoria. El feldespato potásico exhibe baja birrefringencia y extinción uniforme. No se observaron zonamientos ni minerales accesorios abundantes.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.

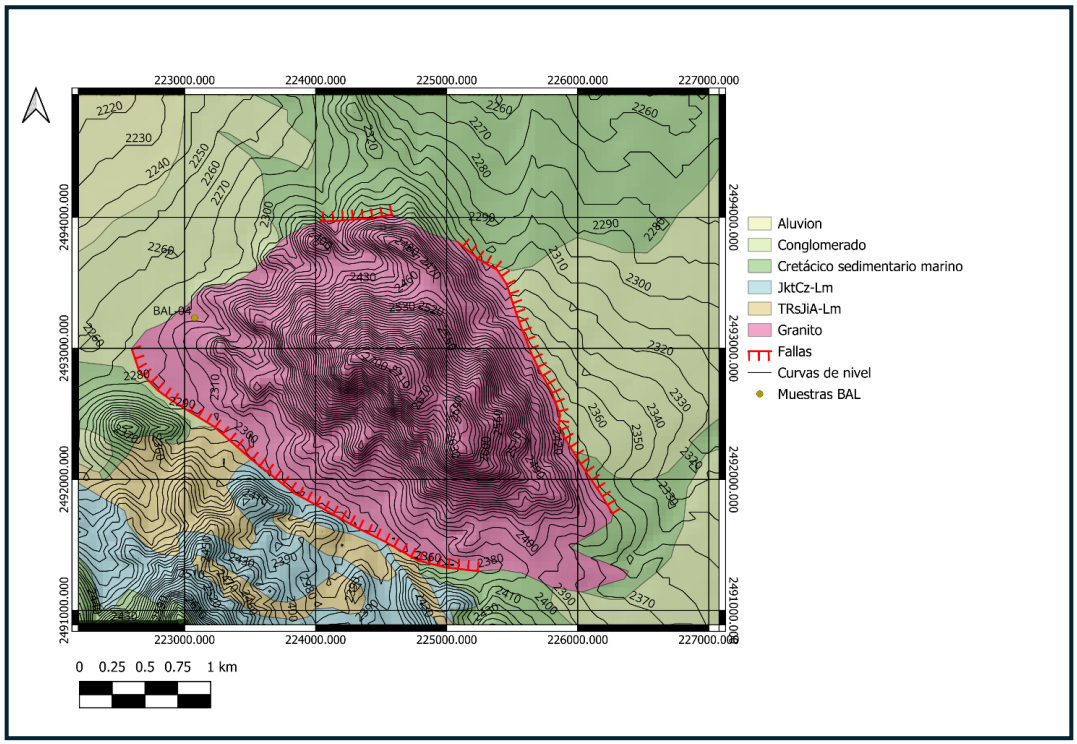


Figura 5. Mapa geológico del área del Granito Peñón Blanco, donde se localiza la muestra BAL-04. Tomado y modificado de las cartas geológico-mineras F14-A61 y F14-A62 del Servicio Geológico Mexicano (SGM). Las claves de las unidades litológicas corresponden a la nomenclatura empleada en las cartas geológicas del SGM.

Considerando la textura y las proporciones modales estimadas de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico, la muestra se interpreta como un granito, según corresponda. Esta clasificación es consistente con las características petrográficas reportadas para el Granito Peñón Blanco por Silva-Romo (1996) y Nieto-Samaniego et al. (2023).

TES-02

La muestra TES-02 presenta una textura fanerítica de grano medio e inequigranular. Está constituida principalmente por plagioclasa (≈40 %), cuarzo (≈25 %), biotita (≈15 %), minerales opacos (≈5 %), un mineral isotrópico posiblemente correspondiente a granate o espinela (≈5 %) y minerales secundarios (≈10 %). En luz polarizada plana (PPL), la plagioclasa presenta relieve alto y alteración localizada; el cuarzo es incoloro y de relieve bajo; la biotita muestra pleocroísmo de café claro a café oscuro y exfoliación bien desarrollada. Los minerales opacos permanecen negros y se observan zonas con posible calcita o material arcilloso. En nicoles cruzados (XPL), la plagioclasa presenta maclas polisintéticas y colores de interferencia de primer orden; el cuarzo muestra colores de primer orden y extinción localmente ondulatoria; la biotita presenta colores de interferencia de segundo orden y el mineral isotrópico permanece oscuro durante la rotación.

Considerando la asociación mineralógica dominada por plagioclasa, cuarzo, biotita y minerales ferromagnesianos, la muestra se interpreta como una granodiorita, consistente con las características petrográficas descritas para la Granodiorita Tesorera del Complejo Ígneo La Tesorera (Tristán-González et al., 2015).

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.

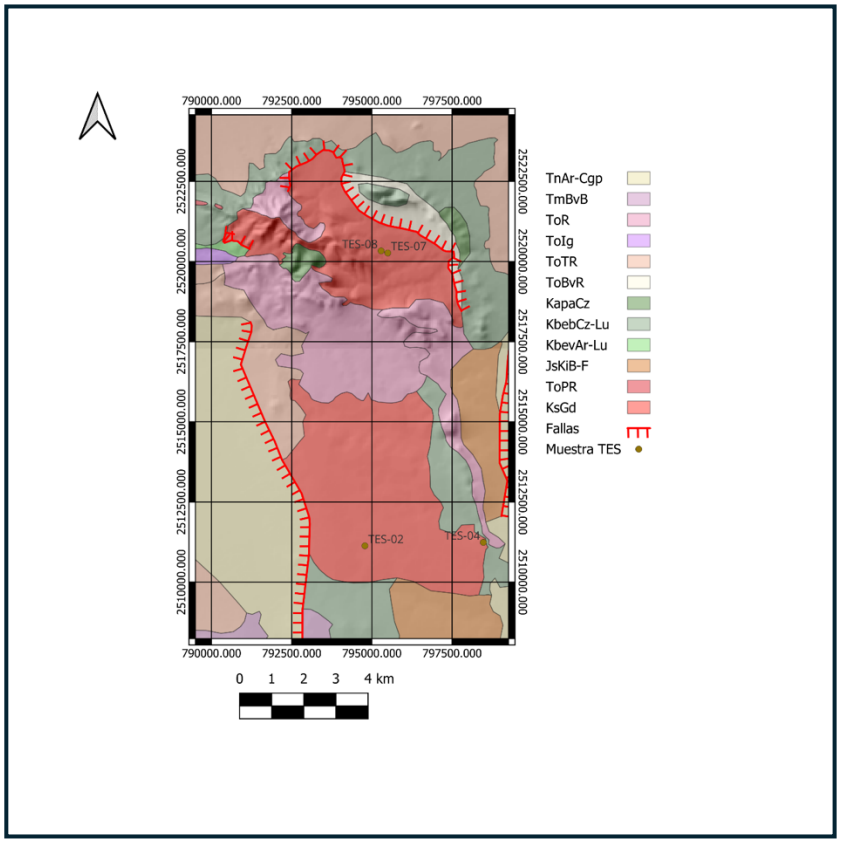


Figura 6. Mapa geológico del área del Complejo Ígneo La Tesorera, donde se localizan las muestras TES-02, TES-04, TES-07 y TES-08. Tomado y modificado de las cartas geológico-mineras F13-B59 y F13-B69 del Servicio Geológico Mexicano (SGM). Las claves de las unidades litológicas corresponden a la nomenclatura empleada en las cartas geológicas del SGM.

TES-04

La muestra TES-04 presenta una textura fanerítica de grano medio con distribución inequigranular. Está integrada por cuarzo (≈35 %), plagioclasa (≈30 %), hornblenda (≈15 %), biotita (≈10 %), minerales opacos (≈5 %) y un mineral isotrópico posiblemente correspondiente a granate o espinela (≈5 %). En PPL, el cuarzo se observa intensamente fracturado y con relieve bajo; la plagioclasa presenta relieve bajo y alteración parcial; la hornblenda exhibe pleocroísmo verde a café y relieve medio; la biotita presenta exfoliación marcada y pleocroísmo café. En XPL, la plagioclasa muestra maclas polisintéticas, el cuarzo presenta colores de interferencia de primer orden y extinción ondulatoria local, mientras que la hornblenda y la biotita presentan colores de interferencia de segundo orden. Los minerales opacos y el mineral isotrópico permanecen oscuros.

La composición mineralógica y la textura observadas permiten interpretar la muestra como una granodiorita, semejante a las litologías reportadas para el Complejo Ígneo La Tesorera, donde predominan plagioclasa, cuarzo, hornblenda y biotita (Tristán-González et al., 2015).

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.

TES-07

La muestra TES-07 presenta una textura fanerítica de grano medio. Está constituida por plagioclasa (≈35 %), cuarzo (≈30 %), biotita (≈15 %), hornblenda (≈10 %), un mineral isotrópico posiblemente correspondiente a granate o espinela (≈5 %) y minerales opacos (≈5 %). En PPL, la biotita presenta relieve alto, pleocroísmo café y exfoliación bien desarrollada; el cuarzo muestra relieve medio; la plagioclasa presenta maclas visibles y la hornblenda se observa con relieve bajo. En XPL, la plagioclasa desarrolla maclas polisintéticas y colores de interferencia de primer orden; el cuarzo presenta colores de primer orden y extinción localmente ondulatoria; la biotita y la hornblenda muestran colores de interferencia de segundo orden, mientras que el mineral isotrópico permanece oscuro.

La abundancia de plagioclasa, cuarzo, hornblenda y biotita indica que la muestra corresponde a una granodiorita, concordante con la composición descrita para la Granodiorita Tesorera del Complejo Ígneo La Tesorera (Tristán-González et al., 2015).

TES-08

La muestra TES-08 presenta una textura fanerítica de grano medio e inequigranular. Está compuesta por plagioclasa (≈40 %), cuarzo (≈30 %), un mineral isotrópico posiblemente correspondiente a granate o espinela (≈10 %), minerales opacos, principalmente magnetita (≈10 %), y minerales secundarios (≈10 %). En PPL, la plagioclasa presenta relieve bajo y maclas bien definidas; el cuarzo es incoloro y de relieve bajo; la magnetita permanece opaca y el mineral isotrópico presenta relieve bajo. En XPL, la plagioclasa muestra maclas polisintéticas y colores de interferencia de primer orden; el cuarzo presenta colores de interferencia bajos y extinción localmente ondulatoria. La magnetita y el mineral isotrópico permanecen oscuros durante toda la rotación de la platina.

Con base en la asociación mineralógica observada, la muestra se interpreta como una granodiorita, compatible con las características petrográficas reportadas para la Granodiorita Tesorera (Tristán-González et al., 2015).

COMA 04

La muestra COMA 04 presenta una textura fanerítica de grano medio, holocristalina, hipidiomórfica granular e inequigranular. Está compuesta por plagioclasa (≈38 %), feldespato potásico (≈32 %), cuarzo (≈24 %), biotita (≈4 %) y minerales opacos, probablemente magnetita (≈2 %). En PPL, la plagioclasa es incolora, de relieve bajo y presenta alteración por sericitización y argilización; el feldespato potásico es incoloro y de relieve bajo, con alteración incipiente; el cuarzo es incoloro, anhedral y de relieve muy bajo; la biotita presenta color café amarillento, pleocroísmo moderado y exfoliación bien desarrollada, mientras que los minerales opacos permanecen negros durante la observación. En XPL, la plagioclasa muestra maclas polisintéticas y colores de interferencia de primer orden; el feldespato potásico presenta macla de Carlsbad y, localmente, textura enrejada correspondiente a microclina; el cuarzo presenta colores de interferencia de primer orden y extinción ligeramente ondulatoria; la biotita desarrolla colores de segundo orden y los minerales opacos permanecen oscuros durante toda la rotación de la platina. Considerando las proporciones de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y biotita observadas en la muestra, se interpreta que corresponde a un granito. Esta interpretación concuerda con las descripciones petrográficas del Granito de Comanja realizadas por Ángeles-Moreno et al. (2017), quienes reportan una composición de granito de biotita a granodiorita dominada por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita, con minerales accesorios como circón, apatito y minerales opacos.

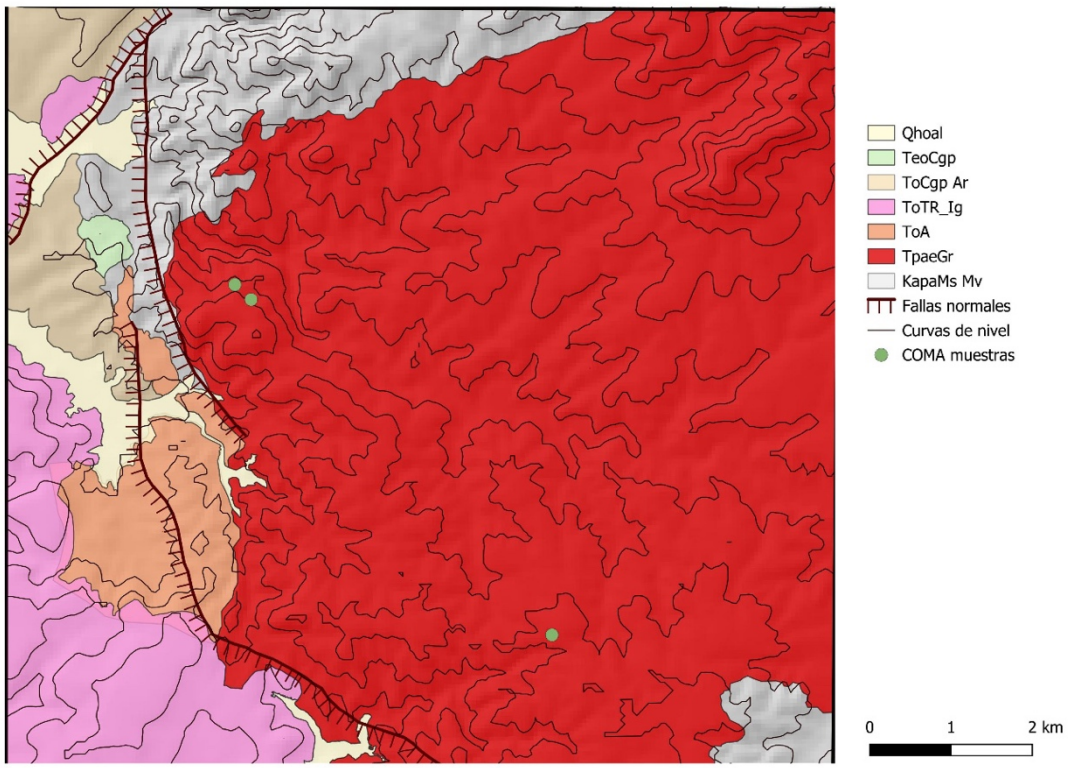


Figura 7. Mapa geológico del área del Granito Comanja, donde se localiza lasmuestras COMA-04, COMA-05,COMA-06, COMA-07 y COMA -08. Tomado y modificado de las cartas geológico-mineras F14-C31del Servicio Geológico Mexicano (SGM). Las claves de las unidades litológicas corresponden a la nomenclatura empleada en las cartas geológicas del SGM.

COMA 05

La muestra COMA 05 presenta una textura fanerítica de grano medio, holocristalina, hipidiomórfica granular e inequigranular. Está constituida por plagioclasa (≈40 %), feldespato potásico (≈30 %), cuarzo (≈24 %), biotita (≈4 %) y minerales opacos (≈2 %). En PPL, la plagioclasa presenta relieve bajo y alteración moderada por sericitización; el feldespato potásico es incoloro y de relieve bajo; el cuarzo aparece incoloro, anhedral e intersticial; la biotita muestra pleocroísmo de café amarillento a café oscuro y alteración parcial a clorita, mientras que los minerales opacos permanecen negros. En XPL, la plagioclasa desarrolla maclas polisintéticas y colores de interferencia de primer orden; el feldespato potásico presenta macla de Carlsbad; el cuarzo muestra extinción ondulatoria y colores de interferencia bajos; la biotita presenta colores de segundo orden y los minerales opacos permanecen oscuros durante toda la rotación. Considerando las proporciones minerales observadas y el predominio de minerales félsicos, la muestra se interpreta como un granito. Esta interpretación es consistente con la composición mineralógica descrita para el Granito de Comanja por Ángeles-Moreno et al. (2017), quienes documentan un cuerpo intrusivo constituido principalmente por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita, con variaciones locales hacia granodiorita.

COMA 06

La muestra COMA 06 presenta una textura fanerítica de grano medio, holocristalina, hipidiomórfica granular e inequigranular. Está compuesta por plagioclasa (≈39 %), feldespato potásico (≈31 %), cuarzo (≈24 %), biotita (≈4 %) y minerales opacos (≈2 %). En PPL, la plagioclasa es incolora, de relieve bajo y presenta alteración sericítica moderada; el feldespato potásico presenta relieve bajo y alteración ligera; el cuarzo es incoloro y ocupa espacios intersticiales entre los feldespatos; la biotita presenta color café y pleocroísmo moderado, mientras que los minerales opacos permanecen negros. En XPL, la plagioclasa presenta maclas polisintéticas y colores de primer orden; el feldespato potásico muestra macla de Carlsbad; el cuarzo desarrolla colores bajos de interferencia y extinción ligeramente ondulatoria; la biotita presenta colores de segundo orden y los minerales opacos permanecen oscuros durante toda la rotación de la platina. Por sus porcentajes de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y biotita, la muestra está clasificada como granito y coincide con la composición mineralógica del Granito de Comanja, reportada por Ángeles-Moreno et al. (2017), Botero-Santa et al. (2015) y Nieto-Samaniego et al. (2020). Describen el granito como un plutón compuesto por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita con alteración hidrotermal localizada expresada en sericitización, argilización y vetas de cuarzo.

COMA 07

La muestra COMA 07 presenta una textura fanerítica de grano medio, holocristalina, hipidiomórfica granular e inequigranular, con carácter leucocrático. Está compuesta por plagioclasa (≈36 %), feldespato potásico (≈33 %), cuarzo (≈26 %), biotita (≈3 %) y minerales opacos (≈2 %). En PPL, la plagioclasa presenta relieve bajo y alteración moderada; el feldespato potásico es incoloro y de relieve bajo; el cuarzo es incoloro y anhedral; la biotita presenta pleocroísmo moderado de tonos café y los minerales opacos permanecen negros. En XPL, la plagioclasa desarrolla maclas polisintéticas con colores de interferencia de primer orden; el feldespato potásico presenta macla de Carlsbad; el cuarzo presenta colores de primer orden y extinción ondulatoria; la biotita desarrolla colores de segundo orden y los minerales opacos permanecen oscuros durante toda la rotación de la platina. Con las proporciones de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y biotita, se interpreta que la muestra es un granito. Esta descripción concordaría con la mineralogía reportada para el Granito de Comanja, por Ángeles-Moreno et al. (2017), Botero-Santa et al. (2015) y Nieto-Samaniego et al. (2020), donde reportan un plutón compuesto esencialmente por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita, con alteración hidrotermal localizada representada por sericitización, argilización y vetas de cuarzo.

COMA 08

La muestra COMA 08 presenta una textura fanerítica de grano medio, holocristalina, hipidiomórfica granular e inequigranular. Está constituida por plagioclasa (≈39 %), feldespato potásico (≈31 %), cuarzo (≈24 %), biotita (≈4 %) y minerales opacos (≈2 %). En PPL, la plagioclasa presenta relieve bajo y alteración moderada a intensa por sericitización; el feldespato potásico es incoloro y de relieve bajo; el cuarzo es incoloro y de relieve muy bajo; la biotita presenta pleocroísmo moderado y alteración parcial a clorita, mientras que los minerales opacos permanecen negros. En XPL, la plagioclasa presenta maclas polisintéticas y colores de primer orden; el feldespato potásico presenta macla de Carlsbad; el cuarzo muestra colores bajos de interferencia y extinción ondulatoria; la biotita desarrolla colores de segundo orden y los minerales opacos permanecen oscuros durante toda la rotación de la platina. Con base en sus cantidades de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y biotita, la muestra se clasifica como granitoide, por lo que coincide con la composición mineralógica descrita para el Granito de Comanja por (Ángeles-Moreno et al., 2017; Botero-Santa et al., 2015; Nieto-Samaniego et al., 2020) como un plutón de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita con alteración hidrotermal localizada en forma de sericitización, argilización, vetas de cuarzo.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.

COP-02

La muestra COP-02 presenta una textura fanerítica de grano medio con intensa alteración. Está integrada principalmente por cuarzo (≈40 %), plagioclasa (≈25 %), minerales arcillosos (≈20 %), óxidos de hierro (≈10 %) y minerales accesorios (≈5 %). En PPL, el cuarzo domina la muestra y se observa asociado a una fuerte silicificación; la plagioclasa presenta alteración argílica y bordes carcomidos. Se distinguen óxidos de color amarillo y abundante material arcilloso fino distribuido entre los cristales. En XPL, el cuarzo presenta colores de interferencia de primer orden y extinción localmente ondulatoria, mientras que la plagioclasa conserva parcialmente sus maclas polisintéticas, aunque se encuentran afectadas por la alteración.

Considerando la mineralogía relicta dominada por cuarzo y plagioclasa, así como la intensa silicificación y argilización observadas, la muestra se interpreta como una roca ígnea félsica intrusiva intensamente alterada por procesos hidrotermales. Esta interpretación es similar a la descrita para el intrusivo de Concordia, Sinaloa, donde predominan granitoides afectados por silicificación, alteración argílica y oxidación de minerales durante eventos hidrotermales posteriores al emplazamiento. La correspondencia entre la mineralogía observada y la ubicación geográfica de la muestra sugiere que COP-02 es consistente con las características petrográficas reportadas para dicho intrusivo. (Ferrari et al., 2007; Aguirre-Díaz & McDowell, 1991).

COP 07

La muestra COP-07 presenta una textura fanerítica de grano medio con intensa alteración hidrotermal. Está integrada principalmente por cuarzo (≈38 %), plagioclasa (≈27 %), minerales arcillosos derivados de la alteración de feldespatos (≈20 %), óxidos de hierro y minerales opacos (≈10 %) y minerales accesorios (≈5 %). En PPL, el cuarzo domina la muestra y se presenta incoloro, de relieve bajo y asociado a procesos de silicificación; la plagioclasa presenta intensa alteración argílica y sericítica, con aspecto turbio y bordes parcialmente carcomidos. Se distinguen abundantes minerales arcillosos finos distribuidos entre los cristales, además de óxidos de hierro de color amarillo a café rojizo y minerales opacos diseminados. En XPL, el cuarzo presenta colores de interferencia de primer orden y extinción localmente ondulatoria; la plagioclasa conserva parcialmente las maclas polisintéticas, aunque muchas se encuentran afectadas por la alteración. Los minerales opacos permanecen oscuros durante toda la rotación de la platina. Dadas las proporciones minerales de la muestra y su alto grado de alteración hidrotermal, consideramos que se trata de un granito fuertemente alterado, y coincide con la descripción de los intrusivos félsicos de la zona de Concordia descritos por Henry et al., (2003), donde mencionan granitos y granodioritas como parte del batolito de Sinaloa, así como en las descripciones del área del Servicio Geológico Mexicano de que dichos intrusivos presentan alteración hidrotermal de sus minerales por medio de silicificación, argilización y oxidación.

COP 08

La muestra COP-08 presenta una textura fanerítica de grano medio con intensa alteración hidrotermal. Está constituida principalmente por cuarzo (≈40 %), plagioclasa (≈25 %), minerales arcillosos derivados de la alteración de feldespatos (≈20 %), óxidos de hierro y minerales opacos (≈10 %) y minerales accesorios (≈5 %). En PPL, el cuarzo constituye el mineral predominante y se observa incoloro, de relieve bajo y asociado a una fuerte silicificación; la plagioclasa presenta intensa alteración argílica y sericítica, con aspecto turbio y bordes parcialmente reemplazados por minerales secundarios. Se observa abundante material arcilloso fino distribuido entre los cristales, así como óxidos de hierro de color amarillo a pardo y minerales opacos dispersos. En XPL, el cuarzo presenta colores de interferencia de primer orden y extinción localmente ondulatoria; la plagioclasa conserva parcialmente sus maclas polisintéticas, aunque se encuentran afectadas por la alteración. Los minerales opacos permanecen oscuros durante toda la rotación de la platina. Basado en las proporciones mineralógicas y el nivel de alteración hidrotermal, se considera que la muestra representa un granito altamente alterado hidrotermalmente, lo que es concordante con la composición de los intrusivos félsicos descritos para la región de Concordia por Henry et al. (2003), donde se identifican granitos y granodioritas como parte del

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.

batolito de Sinaloa, así como con las descripciones de la región hechas por el Servicio geológico Mexicano, quienes documentan la alteración hidrotermal de dichos cuerpos como silicificación, argilización y oxidación de los minerales primarios.

CNG-02

La muestra CNG-02 presenta una textura fanerítica de grano medio e inequigranular. Está constituida por plagioclasa (≈35 %), cuarzo (≈30 %), hornblenda (≈15 %), biotita (≈10 %), minerales arcillosos (≈5 %) y minerales opacos (≈5 %). En PPL, la hornblenda presenta pleocroísmo verde a café y relieve medio; el cuarzo es incoloro y muestra fracturas; la biotita se presenta alargada, con exfoliación marcada y evidencias de alteración parcial; la plagioclasa conserva maclas visibles y presenta alteración argílica localizada. En XPL, el cuarzo exhibe extinción ondulatoria y colores de interferencia de primer orden; la plagioclasa presenta maclas polisintéticas; la hornblenda y la biotita muestran colores de interferencia de segundo orden, mientras que las zonas alteradas presentan baja birrefringencia.

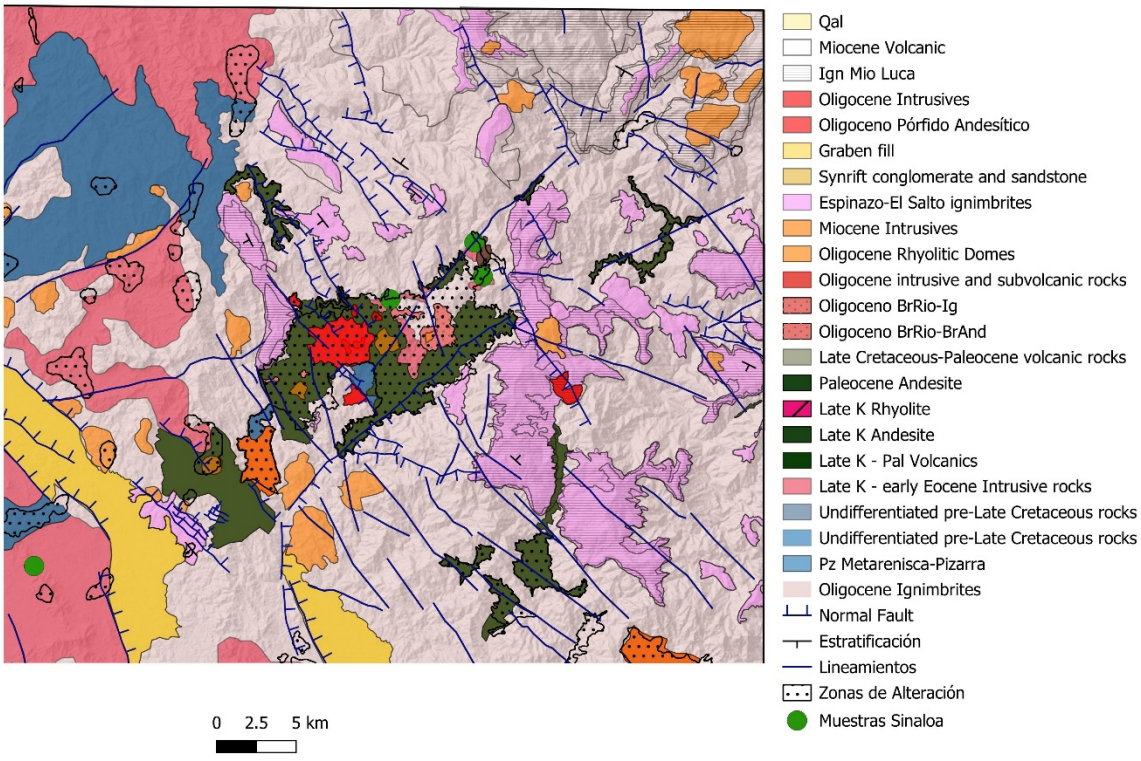


Figura 8. Mapa geológico del área de Sinaloa, donde se localiza las muestras COP-02, COP-07,COP-08 y CNG -02. Tomado y modificado de las cartas geológico-mineras F14-A37 del Servicio Geológico Mexicano (SGM). Las claves de las unidades litológicas corresponden a la nomenclatura empleada en las cartas geológicas del SGM.

La asociación mineralógica integrada por cuarzo, plagioclasa, hornblenda y biotita permite interpretar la muestra como una granodiorita. La presencia de extinción ondulatoria en el cuarzo y la argilización de las plagioclasas indican que la roca experimentó deformación y alteración hidrotermal posteriores a su cristalización, características reportadas para diversos cuerpos intrusivos de la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al., 2007; Aguirre-Díaz & McDowell, 1991).

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.

Discusión

Según las asociaciones minerales observadas en las láminas delgadas, la mayoría de las muestras corresponden a rocas ígneas de composición intermedia a félsica (cuarzo, plagioclasa, feldespatos, biotita y en algunas muestras hornblenda), típica de granitos y granodioritas formados por la cristalización lenta de magmas calcoalcalinos en niveles someros a intermedios de la corteza continental. En la conocida Serie de Reacción de Bowen (Bowen, 1928), la hornblenda y biotita son minerales que se forman en las primeras y medias etapas del enfriamiento de un magma y el cuarzo y el feldespato potásico representan las últimas fases del proceso de cristalización de magmas ricos en sílice, de ahí la forma intersticial que exhibe el cuarzo en varias de nuestras muestras.

Las muestras BAL-04, COMA-04, COMA-05, COMA-06, COMA-07, COMA-08 y TES son compatibles con las rocas o cuerpos intrusivos descritos para la Mesa Central. En particular, las muestras COMA correspondientes al Granito de Comanja presentan una asociación mineralógica formada por plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo y biotita con muy pocos minerales opacos y accesorios. La textura de grano medio (fanerítica), holocristalina e hipidiomórfica granular, el tamaño de grano y la composición mineralógica, son consistentes con un cuerpo plutónico de composición monzogranítica. Se observaron manifestaciones de alteración hidrotermal, pues algunas de las plagioclasas están afinadas en sericita (sericitización de plagioclasa), parcialmente argilizadas los feldespatos y parcial cloritización de biotita, lo cual indica que hubo circulación de fluidos hidrotermales luego del emplazamiento e intrusión de la roca ígnea. Lo anterior es consistente con lo descrito para el Granito de Comanja, en donde se reportó que está alterado parcialmente, indicándose que la alteración hidrotermal modifica en forma leve la mineralogía primaria, sin afectar la textura ígnea original.

La abundancia de plagioclasa, cuarzo, feldespatos y la presencia subordinada de biotita coincide con la descripción mineralógica establecida para el granito Comanja y la formación Tesorera. Por otra parte, la textura fanerítica de grano medio indica que hubo un lento enfriamiento del magma que tuvo lugar probablemente a profundidades de 5 a 10 km en la corteza terrestre. Las temperaturas de cristalización inicial probablemente fueron de 750 a 900 °C aproximadamente, y fueron disminuyendo hasta unos 650°C en el emplazamiento final. Estas condiciones coinciden con las descritas para magmas calcoalcalinos que se emplazaron durante la evolución tectonomagmática de la Mesa Central.

Muestras TES-02, TES-04, TES-07 y TES-08 presentan evidencia de alteración hidrotermal, principalmente argilización de plagioclasas, oxidación de minerales opacos y en algunos casos, cuarzo con extinción ondulatoria y fracturamiento. Esto indica que los cuerpos intrusivos fueron atravesados por fluidos post-cristalización, lo cual facilitó el reemplazo parcial de minerales primarios por minerales secundarios.

Las muestras COP-02, COP-07 y COP-08 del intrusivo de Concordia, Sinaloa, presentan una alteración hidrotermal más intensa que las del Granito de Comanja. Petrográficamente presentan gran cantidad de cuarzo, con silicificación y plagioclasas alteradas a arcilla y sericita, feldespatos parcialmente reemplazados por minerales de arcilla y con una fuerte alteración a óxidos de hierro, producto de la alteración de minerales ferromagnesianos. La textura fanerítica aún persiste parcialmente en varias muestras, sin embargo, la alteración hidrotermal ha modificado la textura y composición mineralógica del granito de forma importante. En nicoles cruzados el cuarzo presenta colores de primer orden de interferencia y una extinción localmente ondulatoria, y las maclas polisintéticas de las plagioclasas están parcialmente obliteradas o extintas con la alteración. Características similares se observan en los sistemas de fluidos hidrotermales que afectan a los intrusivos calcialcalinos de la Sierra Madre occidental, en los que silicificación, argilización y oxidación son procesos comunes que se relacionan con la actividad de los fluidos mineralizantes.

Por otra parte, la muestra CNG-02 mantiene una asociación mineralógica dominada por cuarzo, plagioclasa, hornblenda y biotita, pero presenta alteración localizada y extinción ondulatoria en el cuarzo, manifestaciones consistentes con deformación y circulación de fluidos subsecuentes a la intrusión del cuerpo ígneo. Dichos hallazgos también son encontrados en los reportes para cuerpos intrusivos de la Sierra Madre Occidental.

Las observaciones petrográficas en su conjunto son compatibles con las características descritas para las unidades del Granito Peñón Blanco, el Granito de Comanja, la Formación Tesorera y los intrusivos de Concordia, Sinaloa y otros intrusivos de la Sierra Madre Occidental. La dominancia de minerales félsicos sobre bienes ferromagnesianos y la presencia de alteraciones hidrotermales, sugieren que las rocas analizadas experimentaron procesos de evolución de un magma y procesos post-magmas que los modificaron parcialmente. Las muestras del Granito de Comanja parecen conservar en mayor proporción su mineralogía primaria y una baja alteración hidrotermal, mientras que las de Concordia presentan una mayor alteración hidrotermal representada por silicificación, argilización y oxidación de ésta. En combinación con la información geológica regional, la información petrográfica puede reflejar una o varias afinidades petrológicas entre las muestras y aquellas descritas previamente e interpretarse sobre la base de su evolución durante el proceso tectonomagmático que afecta al centro y noroeste del territorio mexicano.

Conclusión

Se observa que tanto las muestras de la Mesa Central (Granito de Comanja, Granito Peñón Blanco y Formación Tesorera) como las de los intrusivos de Concordia, Sinaloa, fueron analizadas petrográficamente para identificar sus similitudes y diferencias en términos de composición mineralógica y evolución. En ambas unidades la asociación mineral es cuarzo, plagioclasa y feldespatos, con biotita, lo que se interpreta como origen por magmas calcoalcalinos de composición intermedia a félsica en medios plutónicos.

Las muestras de Granito de Comanja y de las unidades de Mesa Central conservan la mineralogía ígnea primaria con texturas faneríticas e hipidiomórficas bien preservadas, con solamente una moderada alteración hidrotermal (sericitización, argilización y cloritización parcial). Las muestras de los intrusivos de Concordia, Sinaloa presentan una alteración hidrotermal más avanzada, con una silicificación intensa, marcada argilización de los feldespatos, mayor cantidad de óxidos de hierro y reemplazo de algunos minerales primarios por minerales secundarios, en general, una alteración más intensa como resultado de una mayor interacción con fluidos hidrotermales después del emplazamiento.

La correlación petrográfica indica que si bien, en líneas generales, ambas provincias de intrusivos están constituidas por rocas magmáticas relacionadas con el magmatismo calcoalcalino que afecta al occidente y al centro del país, sus diferencias en grado de alteración muestran dos historias postmagmáticas diferentes, probablemente definidas por las condiciones tectónicas, de circulación de fluidos hidrotermales y de formación de minerales de cada una de las provincias de intrusivos. Esta información reafirma la amplia utilidad de la petrografía para identificar correlaciones entre intrusivos y caracterizar el desarrollo magmático e hidrotermal de los mismos, con información importante para la interpretación geológica y la caracterización del potencial metalogénico de una y otra provincia de intrusivos.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre-Díaz, G. J., & McDowell, F. W. (1991). *The volcanic section at Nazas, Durango, Mexico, and the development of the Sierra Madre Occidental volcanic province*. *Journal of Geophysical Research*.

Ángeles-Moreno, E., Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Levresse, G., Solari, L., & Ortega-Obregón, C. (2017). *The transition between shortening and extensional regimes in central Mexico recorded in the tourmaline veins of the Comanja Granite*. *Journal of South American Earth Sciences, 76*, 116–135.

Best, M. G. (2003). *Igneous and Metamorphic Petrology* (2nd ed.). Blackwell Publishing.

Botero-Santa, P. A., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., López-Martínez, M., Levresse, G., Xu, S., & Ortega-Obregón, C. (2015). *Origen y desarrollo de la cuenca El Bajío en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.

Bowen, N. L. (1928). *The Evolution of the Igneous Rocks*. Princeton University Press.

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. E. (2007). *Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of the western margin of North America*. *Geological Society of America Special Paper, 422*, 1–39.

Henry, C. D., McDowell, F. W., & Silver, L. T. (2003). *Evolution of the Sinaloa Batholith and the Concordia Granodiorite, northwestern Mexico*. *Geological Society of America, Cordilleran Section Meeting*.

Le Maitre, R. W. (Ed.). (2002). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Mackenzie, W. S., & Guilford, C. (1980). *Atlas of Rock-Forming Minerals in Thin Section*. Longman.

Nesse, W. D. (2013). *Introduction to Optical Mineralogy* (4th ed.). Oxford University Press.

Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Botero-Santa, P. A., Levresse, G., Xu, S., & Ortega-Obregón, C. (2023). *Geología y evolución tectónica de la Mesa Central: una revisión de la geología y evolución tectónica cenozoicas*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 40*(2), 187–213.

Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Levresse, G., et al. (2020). *Geología y estructura de las sierras de Guanajuato y Codornices, Mesa Central, México*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 37*(1), 1–32.

Philpotts, A. R., & Ague, J. J. (2009). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Quintero-Legorreta, O. (1992). *Geología de la región de Comanja, estados de Guanajuato y Jalisco*. *Revista del Instituto de Geología, UNAM*.

Servicio Geológico Mexicano. (2002). *Carta Geológico-Minera F13-B59* (escala 1:50 000). Pachuca, Hidalgo: Servicio Geológico Mexicano.

Servicio Geológico Mexicano. (2002). *Carta Geológico-Minera F13-B69* (escala 1:50 000). Pachuca, Hidalgo: Servicio Geológico Mexicano.

Servicio Geológico Mexicano. (2002). *Carta Geológico-Minera F14-A61* (escala 1:50 000). Pachuca, Hidalgo: Servicio Geológico Mexicano.

Servicio Geológico Mexicano. (2002). *Carta Geológico-Minera F14-A62* (escala 1:50 000). Pachuca, Hidalgo: Servicio Geológico Mexicano.

Servicio Geológico Mexicano. (2002). *Carta Geológico-Minera F14-A71* (escala 1:50 000). Pachuca, Hidalgo: Servicio Geológico Mexicano.

Servicio Geológico Mexicano. (2002). *Carta Geológico-Minera F14-A72* (escala 1:50 000). Pachuca, Hidalgo: Servicio Geológico Mexicano.

Servicio Geológico Mexicano. (2004). *Carta Geológico-Minera F13-A37 Concordia* (escala 1:50 000). Servicio Geológico Mexicano.

Servicio Geológico Mexano. (2004). *Carta Geológico-Minera F14-C31 Lagos de Moreno* (escala 1:50 000). Servicio Geológico Mexicano.

Servicio Geológico Mexicano. (2004). *Carta Geológico-Minera F14-C32 Ibarra* (escala 1:50 000). Servicio Geológico Mexicano.

Servicio Geológico Mexicano. (2004). *Carta Geológico-Minera F14-C41 León* (escala 1:50 000). Servicio Geológico Mexicano.

Servicio Geológico Mexicano. (2004). *Carta Geológico-Minera F14-C42 Comanja de Corona* (escala 1:50 000). Servicio Geológico Mexicano.

Silva-Romo, G. (1996). *Geología de la Sierra de Salinas y del granito Peñón Blanco, estados de San Luis Potosí y Zacatecas, México*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Streckeisen, A. (1976). *To each plutonic rock its proper name*. *Earth-Science Reviews, 12*(1), 1–33.

Tristán-González, M., Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Levresse, G., et al. (2015). *Características geoquímicas y significado tectónico del complejo de diques y domos félsicos del Paleoceno-Eoceno de La Tesorera, Zacatecas, en la Mesa Central, México*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 32*(3), 455–474.

Winter, J. D. (2010). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology* (2nd ed.). Pearson Education.