

---

## **TÓPICO III: CIENCIAS DE LA TIERRA**

---

### III.1-MARCO GEOLÓGICO REGIONAL Y LITOLÓGICO DE LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE HUAPALCALCO, TULANCINGO, HIDALGO

L. E. Ortiz-Hernández<sup>a\*</sup>, J. C. Escamilla-Casas<sup>a</sup>, E. Cruz-Chávez<sup>b</sup>, J. Castro Mora<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
jocesca@uaeh.edu.mx

<sup>b</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
kius\_ec@yahoo.es

<sup>c</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
jcastro@geofisica.unam.mx

\* Autor de correspondencia: leoh44@hotmail.com

#### RESUMEN

La zona arqueológica de Huapalcalco se localiza a 4 km al norte de la ciudad de Tulancingo, Hidalgo, sobre la ladera oeste del domo Napateco. Los monumentos arqueológicos están emplazados al pie de una unidad ignimbrítica riolítica con disyunción columnar, producida durante el enfriamiento de ésta, la cual forma parte del complejo de domos riolíticos del Yolo y de las últimas emisiones piroclásticas relacionadas a la caldera de Tulancingo (Plioceno, 32 km de diámetro) o la de Acoculco (Pleistoceno, 18 km de diámetro), la cual está anidada a la primera. El complejo dómico El Yolo es de edad Plioceno y tiene una longitud aproximada de 30 km y una orientación general N65°O en su eje mayor y 15 km en su eje menor, en la porción oriental de la ciudad de Tulancingo, en el sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana. Es de composición silícica con litología variada: derrames de lava riolítica a dacítica, flujos piroclásticos formando brechas de derrame con intercalaciones de lentes de obsidiana, vitrófidos e ignimbritas. Este complejo es intrusionado por diques basálticos, posiblemente cuaternarios. Los vestigios arqueológicos líticos poseen características del lugar o sus inmediaciones, ya que corresponden a rocas ígneas extrusivas como basalto y escoria basáltica, toba riolítica a dacítica, escasa riolita y andesita y sólo hay discrepancia en una muestra de roca intrusiva (monzogabro), la cual no existe en la zona de influencia regional.

**Palabras Clave:** Geología, regional, litología, Huapalcalco, Hidalgo.

#### ABSTRACT

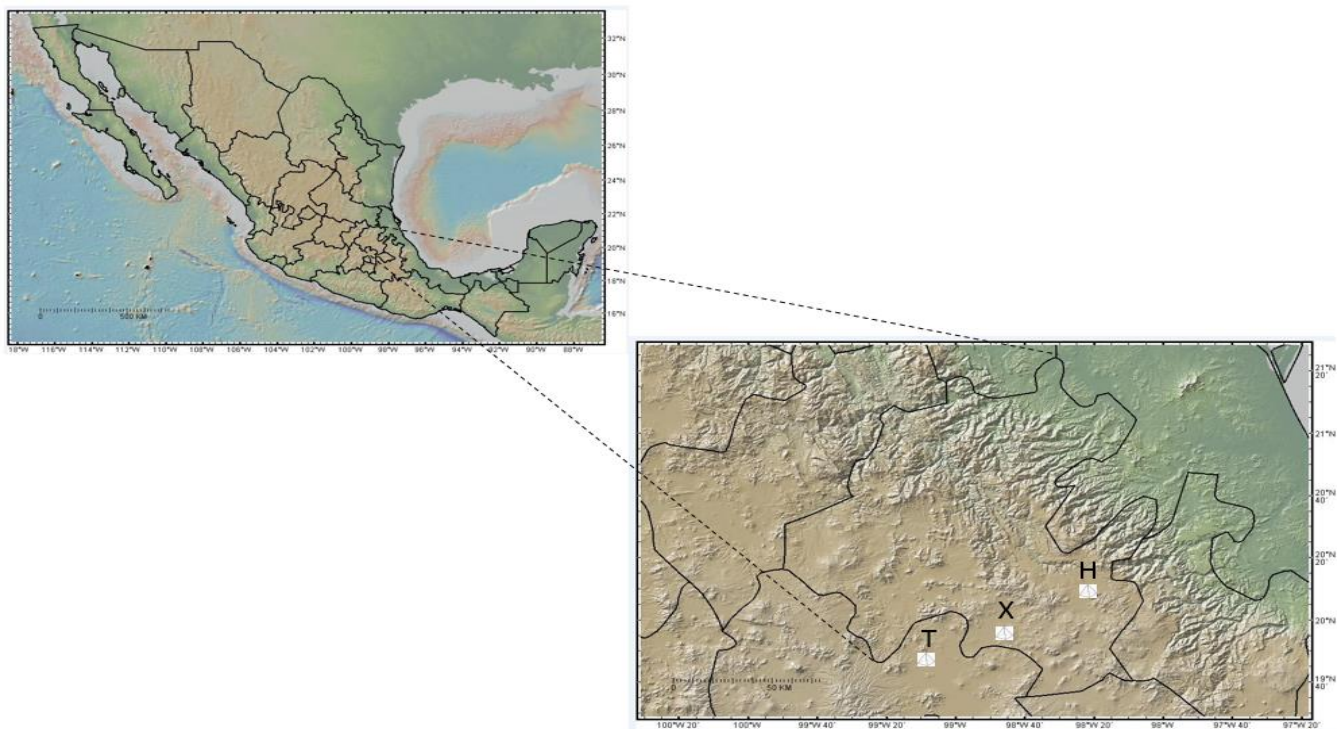
The Huapalcalco archeological zone is located 4 km to the north of the Tulancingo city, in the state of Hidalgo, over the western flank of the Napateco volcanic dome. The archeological edifices are places at the floor of a rhyolitic ignimbrite unit correlated with the silicic, El Yolo dome complex, and with the latest pyroclastic emissions of the Pliocene, Tulancingo caldera (32 km diameter), or the Pleistocene, Acoculco caldera (18 km diameter). El Yolo dome complex is Pliocene in age, with a general trend N65°W, and 30 km x 15 km in length. The complex is located to the East of the Tulancingo city, in the eastern segment of the Trans Mexican Volcanic Belt. Is a silicic complex with a

variety of lithology: rhyolitic to dacitic lava flows, pyroclastic flows forming breccias interbedded with obsidian lenses, some vitrophyres, and ignimbrites. This complex is intruded by basaltic dikes, probably of Quaternary age. Archeological vestiges are lithologically similar to the rocks of the area, because they are extrusive rocks like massive and scoriaceous basalts, rhyolitic to dacitic tuffs, and scarce rhyolite and andesite. Nevertheless, there is an intrusive rock (monzogabbro), that is not correlates to the regional source area.

**Keywords:** Geology, regional, lithology, Huapalcalco, Hidalgo State.

## 1. INTRODUCCIÓN Y MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Las zonas arqueológicas ubicadas en el sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), en el estado de Hidalgo (Huapalcalco:  $20^{\circ} 07' 30''$  N,  $98^{\circ} 21' 50''$  O y Xihuingo;  $19^{\circ} 47' 00''$  N,  $98^{\circ} 33' 00''$  O; Figura 1), son importantes porque muestran que la ocupación por grupos humanos ha sido en diferentes épocas y se remonta a varios miles de años, como lo demuestra la existencia de pinturas rupestres de hace 9000 años A.C. en Huapalcalco, y probablemente de fines del Pleistoceno en Xihuingo [1].



**Figura 1.** Mapa de localización geográfica [2], del estado de Hidalgo y de las zonas arqueológicas de Huapalcalco (H), Xihuingo (X), y Teotihuacán (T). El límite estatal es aproximado, así como la ubicación de las zonas arqueológicas.

Estas zonas arqueológicas constan de un sólo edificio piramidal, pero existe, además, otros vestigios arqueológicos como son conchas [3] y materiales líticos, que se utilizaban como herramientas para las

actividades cotidianas. La cercanía de Huapalcalco a la zona arqueológica de Xihuingo y la influencia de la zona arqueológica de Teotitihuacán (19° 41' 00'' N, 98° 52' 00'' O), es innegable.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La metodología incluyó reconocimientos de campo y muestreo de la región estudiada y su área de influencia. Se tomó la cartografía geológica realizada por [4] y la topografía del INEGI [5].

El muestreo petrográfico se efectuó en algunos afloramientos, tratando en lo posible de obtener las rocas sin alteración. Se estudiaron 20 láminas delgadas de 30 micras de espesor, para definir los litotipos presentes y conocer su textura, mineralogía primaria y secundaria y su clasificación. Se realizó el análisis litológico megascópico de 73 muestras arqueológicas facilitadas por la Arqueóloga Enriqueta Olgún, para su clasificación.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Geología regional

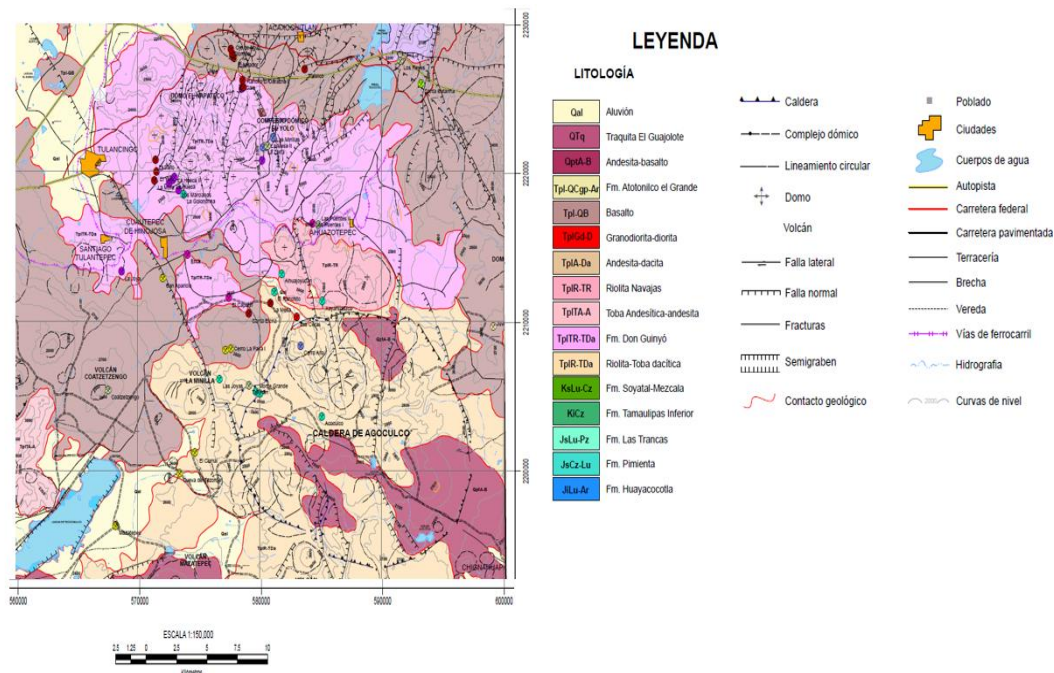
La FVT constituye una provincia geológica con predominio de estructuras volcánicas (volcanes, domos, y calderas). La FVT no es una cadena volcánica uniforme, más bien es un mosaico complejo de campos volcánicos, cada uno con sus propias características. En su sector oriental, dentro del estado de Hidalgo, en México central, la FVT está constituida por campos volcánicos calcoalcalinos, litológicamente diversos (basalto, andesita, dacita, riolita), cuya edad varía desde el Mioceno hasta el Plioceno-Cuaternario ([6]; [7]; [8]; [9]; [10] y un complejo volcánico riolítico peralcalino (Cerro Las Navajas), del Pleistoceno [11]. Morfológicamente, constituye pequeñas sierras y valles situados por arriba de los 2,000 msnm, destacando entre sus estructuras volcánicas: conos cineríticos, volcanes compuestos, calderas, domos, flujos piroclásticos y derrames lávicos asociados con fracturas y fallas regionales orientadas NE-SO y NO-SE, muchas de las cuales corresponden a grabens.

Algunas de las estructuras que han sido descritas en el sector oriental de la FVT son: el complejo estratovolcánico riolítico peralcalino del Pleistoceno de la sierra de Las Navajas [11] constituido de derrames de lava y domos con lentes de obsidiana, asociadas con depósitos piroclásticos de avalancha-brechas y tobas, y rocas epiclásticas. Este complejo sobreyace discordantemente a lavas andesíticas y dacíticas de la andesita Chichicauatla [7] y está asociado a lavas basálticas medianamente alcalinas [11]. El complejo de domos volcánicos de la sierra de Los Pitos que comprende un conjunto de domos andesíticos-riolíticos del Plioceno tardío rodeado en su periferia por volcanes pequeños del Cuaternario de composición dacítica y al sur de composición andesítica a basáltica [9]. La caldera de Chichicauatla [6] y [7]), que está fallada en su flanco sudoccidental, es una estructura semicircular (de forma de media luna) de 6 km de diámetro y altura de 250 m, formada de una secuencia de brechas y *lapilli* en una matriz de cenizas, intercaladas con andesitas pertenecientes a la andesita Chichicauatla [6]. Esta unidad está cubierta discordantemente por la Formación Atotonilco El Grande, lo que le asigna una edad del Plioceno tardío. La porción septentrional de la caldera está disecada por una falla normal orientada N 5° O y bloque caído hacia el NE. La caldera de Acozulco, que consiste en un centro volcánico plio-pleistocénico (caldera anidada) de 18 km de diámetro [8], asociada a domos riolíticos anulares e ignimbritas. Está asociada a dos ciclos volcánicos principales: el primero entre 3-2.6 Ma y el segundo entre 1.8-1.3 Ma [8]. El campo volcánico de Apan [10], orientado según lineamientos NO-SE y cuyo vulcanismo fue activo entre 3-1.5 Ma, generó un vulcanismo basáltico a riolítico (50-75% de SiO<sub>2</sub>), con afinidad calcoalcalina. El semigraben de Tecocomulco, fosa tectónica orientada NE-SO

parece controlar el alineamiento de varios conos de cenizas. El complejo dómico del cerro Xihuingo [6], con una longitud aproximada de 6 km en su eje mayor está afectado por fracturas orientadas N-S. Consiste de cinco domos alineados E-W, de composición andesítica y de edad probable plio-pleistocénica [10].

### 3.2 Geología y estructura del campo volcánico de Tulancingo

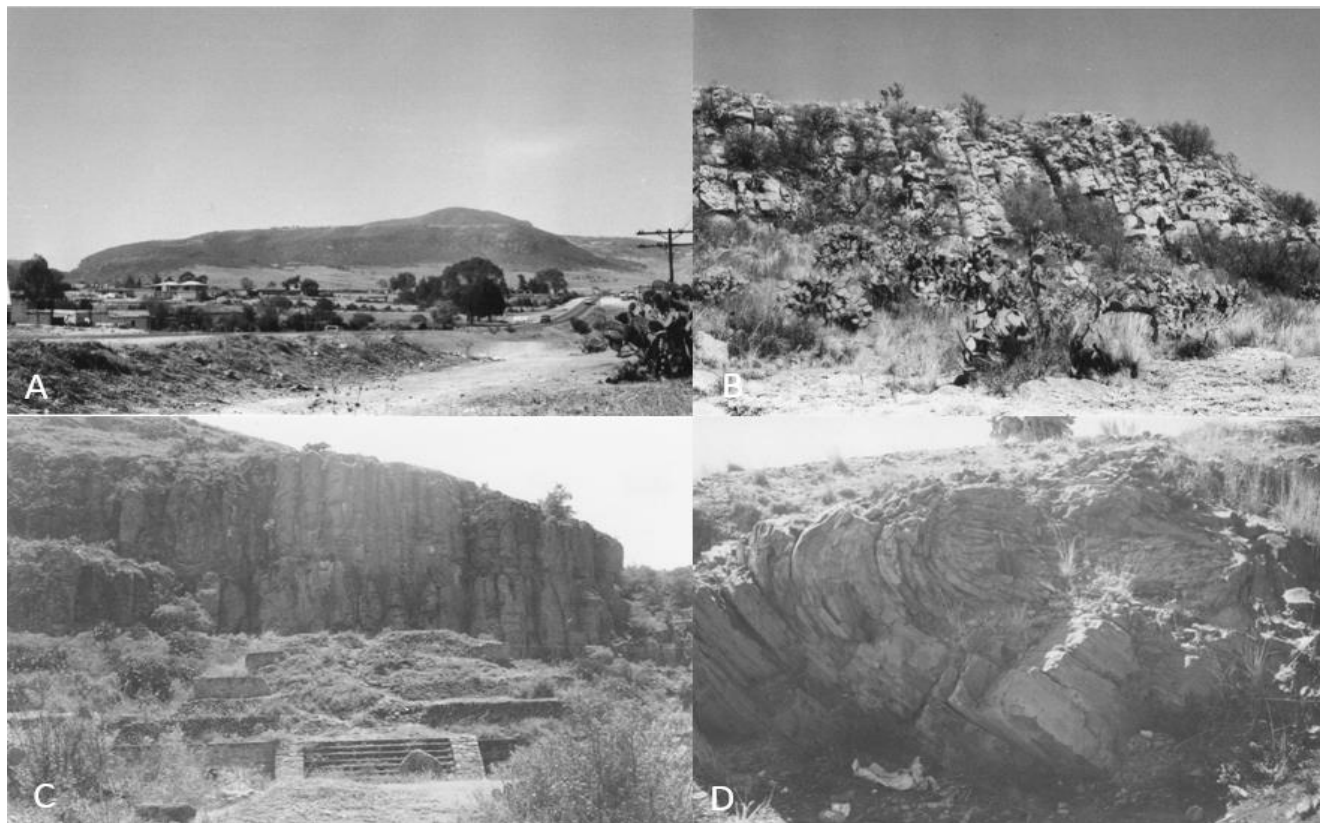
El complejo de domos riolíticos de El Yolo es un campo volcánico silíceo pliocénico cuyo afloramiento se extiende aproximadamente 30 km de longitud con una orientación burda N65°O de su eje mayor y 15 km de su eje menor, en la porción oriental de la ciudad de Tulancingo, en el sector oriental de la FVT (Figura 2). Al estudiar la geología de esta región, [7] reconocen seis unidades volcánicas pertenecientes a tres episodios magmáticos: el más antiguo representado por flujos de lava andesítica correlacionables con el Grupo Pachuca y domos de traquita y riolita de la riolita Chignahuapan, el segundo por lavas, brechas y tobas silíceas de la Riolita Navajas (400 m de espesor) y las lavas andesíticas intercaladas con brechas y tobas de *lapilli* de la andesita Chichicuautla [6], y por la Formación Atotonilco El Grande, el último por flujos basáltico-andesíticos extravasados durante el Pleistoceno-Holoceno. [8] interpretan el vulcanismo de Tulancingo como parte de una gran caldera de 32 km de diámetro que se formó entre los 3 a 2.6 Ma. [12] interpreta el vulcanismo de Tulancingo-Acozulco como resultado de la evolución de dos calderas sobrepuestas. La más antigua (Tulancingo), con 32 km de diámetro, originada en el Plioceno y otra más reciente (Acozulco), con 18 km de diámetro y edad Pleistoceno, se encuentra anidada en la primera (Figura 2).



**Figura 2.** Mapa geológico regional de Tulancingo (según [4]), mostrando las unidades litológicas y las estructuras geológicas presentes en el área. La zona arqueológica de Huapalcalco muestra un símbolo de pirámide.

Los domos presentan varias estructuras como son: disyunción columnar que constituye columnas perpendiculares a la dirección de flujo, líneas o planos de fluidez formando lajas o pseudoestratos, plegamiento visible inclusive en láminas delgadas (microplegamiento) y vesiculación resultante del

escape de volátiles. Asimismo, es común observar devitrificación del vidrio volcánico con formación de esferulitas y zonas de alteración hidrotermal con desarrollo de caolín o zeolitas. La Figura 3 muestra algunos rasgos al afloramiento del complejo de domos El Yolo.



**Figura 3.** Fotografías de afloramientos del complejo de domos El Yolo. A): Panorámica del flanco NE del domo elongado Cerro El Napateco, B): Disyunción columnar en riolita del Cerro El Napateco, C): Disyunción columnar en ignimbrita riolítica del Cerro El Napateco, en la zona arqueológica de Huapalcalco, D): Pliegues en un foco de emisión de riolita en el Cerro El Abra.

### 3.3 Petrografía del Complejo de Domos

La litología predominante observada en las lavas es: riolita masiva, riolita fluidal, riolita esferulítica, riolita con micropliegues, además de vitrófidos. Las ignimbritas fueron reconocidas únicamente en la zona arqueológica de Huapalcalco, donde existe una unidad ignimbrítica riolítica con disyunción columnar. La petrografía muestra que los litotipos son variados predominando las riolitas de oxihornblenda con textura vítrea a esferulítica, que denotan algunos pliegues. La mineralogía predominante es oligoclasa-andesina, sanidino, cuarzo, oxihornblenda, hematita, limonita, caolinita y zeolitas. En la matriz de la roca se observa vidrio volcánico en proceso de devitrificación, que forma esferulitas con intercercamientos radiales de albita y cuarzo (Tabla 1). En el caso de los basaltos se reconoce, labradorita, olivino, vidrio volcánico y hematita. El origen de las rocas es ígneo extrusivo, con excepción de un dique basáltico (hipabisal), que corta al complejo El Yolo.

**Tabla 1.** Litotipos predominantes del complejo de domos, estudiados mediante petrografía.

Olc=oligoclasa, Ad=andesina, Ab=albita, La=labradorita, Sa=sanidino, Qtz=cuarzo, Ol=olivino, Vi=vidrio volcánico, Oh=oxihornblenda, Mgt=magnetita, Hem=hematita, Kln=caolinita, Chl=clorita, Cpt=zeolitas (clinoptilolita), Lim=limonita.

Referencia	Localización	Estructura y/o textura	Mineralogía	Clasificación
TUH1	Cerro El Abra	Esferulítica, en parte traquítica	Olc, Sa, Qtz, Vi, Oh, Hem, Ab	Riolita esferulítica
HUH2	Huapalcalco	Axiolítica en parte fluidal	Olc, Sa, Qtz, Vi, Mgt, Hem, Cl, Ab	Ignimbrita riolítica
TUL1	San Alejo	Afanítica, fluidal	Olc, Sa, Qtz, Vi, Hem, Lim	Riolita fluidal
DTH1	Cerro Napateco	Porfídica, columnar	Olc, Sa, Qtz, Vi, Hem, Kln	Riolita columnar
DTH2	Cerro El Abra	Afanítica, esferulítica	Olc, Sa, Qtz, Vi, Hem, Ab	Riolita esferulítica con oxidación
DTH3	Cerro El Abra	Afanítica, vesicular	Olc, Sa, Qtz, Vi, Hem, Lm. Ab	Riolita vesicular con oxidación
DTH4	Cerro El Abra	Afanítica, pseudoestratificada	Olc, Sa, Qtz, Vi, Hem, Lm. Ab	Riolita ligeramente oxidada
TAH1	Ejido Tezoncualpa	Afanítica	Olc, Sa, Qtz, Vi, Mgt, Hem	Riolita
TAH2	Ejido Tezoncualpa	Afanítica, fluidal	Olc, Sa, Qtz, Vi, Mgt, Hem	Riolita fluidal
MTH1	Poblado La Mesa	Piroclástica	Olc, Sa, Qtz, Vi, Mgt, Chl	Toba riolítica caolinizada
MTH2	Poblado La Mesa	Afanítica, compacta	Olc, Ad, Sa, Qtz, Vi, Kln, Hem,	Dacita con oxidación
MTH3	Poblado La Mesa	Afanítica, compacta	Olc, Ad, Sa, Qtz, Vi, Kln, Chl, Hem, Cpt	Dacita zeolitizada
MTH4	Poblado El Encinal	Porfídica, compacta	Olc, Sa, Qtz, Vi, Kln, Hem, Lim	Riolita caolinizada
POH1	Cerro Napateco	Vítrea	Vi	Pómez
DACH1	El Mago	Afanítica, fluidal	Olc, Ad, Sa, Qtz, Vi, Kln	Dacita

BAH1	Arroyo Alcholoaya	Afanítica, vesicular	La, Vi, Ol, Hem	Basalto vesicular
------	-------------------	----------------------	-----------------	-------------------

### 3.4 Material lítico encontrado en el sitio

A partir del análisis del material arqueológico, se desprenden los siguientes resultados: el material lítico encontrado en el sitio arqueológico posee características del lugar o sus inmediaciones, ya que corresponde a basalto afírico, por lo general vesicular; sólo alguno con textura porfídica tiene escasos fenocristales de plagioclasa, y otro de ellos es de gran densidad, por lo que podría tratarse de basalto ankaramítico o picrítico. Le sigue en abundancia la toba riolítica y dacítica, así como la escoria basáltica. La riolita y la andesita están subordinadas. Únicamente una sólo muestra discrepa del conjunto en virtud de que se trata de roca intrusiva (monzogabro), con una gran densidad, la cual no existe en la zona de influencia regional. La tabla 2 muestra la clasificación litológica de las muestras estudiadas.

**Tabla 2.** Relación de muestras litológicas del sitio arqueológico de Huapalcalco, Hidalgo.

\*Presentan alteración del vidrio volcánico, con algo de oxidación.

NÚMERO DE MUESTRA	ESTRUCTURA Y/O TEXTURA	CLASIFICACIÓN	ORIGEN
L34, L35, L36, L37, L38, L39, L40, L41, L42*, L43, L44, L45, L46, L47, L48, L51, L53, L54, L55, L56, L57, L58, L60, L61, L62, L63, L67, L71, L73, L76, 8346, 83L55, 8385	Vesicular, afanítica. L61 presenta escasos fenocristales de plagioclasa. L67 presenta alta densidad, por lo cual podría tratarse de un basalto ankaramítico o de un basalto picrítico.	Basalto vesicular	Ígneo extrusivo
1, 2, 6*, 12, 33	Escoriácea. La muestra 12 presenta textura brechoide	Escoria basáltica	Ígneo extrusivo
9, 10, 13, 15, 17, 18*, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28*, 29, 30, 31*, 32, L65*, L75	Piroclástica	Toba riolítica con diferentes grados de alteración	Ígneo extrusivo
4, 5, 7, 8, 11, 29*	Piroclástica	Toba dacítica	Ígneo extrusivo
16, L67*	Masiva, afanítica	Riolita	Ígneo extrusivo
L54, 170	Masiva, afanítica	Andesita	Ígneo extrusivo
83L50, 83L66	Fanerítica, densa	Monzogabro	Ígneo intrusivo



#### 4. CONCLUSIONES

Se enmarcó a la zona arqueológica de Huapalcalco en su contexto geológico regional y se estableció el tipo de litología que predomina en el área de influencia de ésta, determinándose que corresponde a rocas ígneas extrusivas. El contexto geológico regional está asociado a estructuras volcánicas (principalmente a la caldera Tulancingo y la caldera Acoculco, así como a un complejo de domos riolítico-dacíticos y rocas piroclásticas asociadas, así como algunos basaltos posteriores). La procedencia de los vestigios arqueológicos líticos como son las tobas riolíticas a dacíticas, es seguramente del complejo de domos El Yolo, no así los basaltos que son muy vesiculares y podrían proceder de las cercanías a la zona de influencia de la zona arqueológica, al igual que la escoria basáltica. Asimismo, el edificio piramidal está constituido de tobas riolíticas, riolitas y basaltos vesiculares. El basalto denso de tipo ankaramítico o picrítico, puede proceder de la barranca de Alcoholoya, en donde se ha encontrado esta litología hacia la base de la secuencia volcánica, expuesta cerca del poblado de San Bartolo. Con respecto al monzogabro, cuyo origen es ígneo intrusivo, no procede del área de influencia regional, dado que el afloramiento más cercano de rocas intrusivas se localiza en la localidad de Chachahuantla, Puebla, en el núcleo del Anticlinorio de Huayacocotla, distante unos 40 km hacia el NE de Huapalcalco, pero corresponde a un tronco diorítico. Habría que considerar la zona de influencia de Huapalcalco, de manera aún más regional, dado que el valle de Tulancingo mantenía intercambio de bienes con grupos humanos que habitaban las costas del Golfo de México y del Océano Pacífico [3], y en esas zonas si hay afloramientos de rocas intrusivas de tales características.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Gobierno del Estado de Hidalgo. Patrimonio natural, pinturas rupestres. **¡Error! Referencia de hipervínculo no válida..**
- [2]. GeomapApp, Marine Geoscience Data System. Columbia University. <http://www.geomapapp.org/>. 2014.
- [3]. Enriqueta Olguín, M.: Conchas arqueológicas de Huapalcalco, Tulancingo, Hidalgo, Valvas naturales y sus reproducciones. Anales de Antropología, 2004, v. 44, p. 31-75. ISSN 0185-1225.
- [4]. Javier Solana-López.: Geología regional y petrogénesis del vulcanismo silíceo de la región circundante a Tulancingo, estado de Hidalgo, tesis de maestría en Geología, IPN, ESIA-Unidad Ticomán, 2009, 99 p.
- [5]. Instituto de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Carta topográfica Tulancingo (F14D82), 1998, Segunda Edición.
- [6]. Odilón Ledezma-Guerrero: Hoja Calpulalpan 14Q-h(3) con resumen de la geología de la hoja Calpulalpan, Estados de México, Tlaxcala, Puebla e Hidalgo. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 1987, Carta Geológica de México, serie 1:100, 000, mapa con texto.
- [7]. Armando Castro-García y Diego Córdoba-Méndez: Estratigrafía del área volcánica de Tulancingo, Hidalgo, México. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo 23. Pancromo, 1994, Vol. 1, No. 1, pp. 26-39.
- [8]. Aída López-Hernández, Gerardo de Jesús Aguirre-Díaz y Margarita López-Martínez: El complejo volcánico Tulancingo-Acoculco, dos calderas anidadas en el sector oriental del Cinturón Volcánico Mexicano: Segunda Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, Geos, 2000, vol. 20, pp. 309.

- [9]. José Juan Zamorano-Orozco, Luis Miguel Tanarro-García, José Lugo-Hubp y Gerardo Sánchez-Rubio: Evolución geológica y geomorfología del complejo dómico Los Pitos, norte de la Cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 2002, Vol. 19, No. 1, pp. 66-79.
- [10]. Armando García-Palomo, José Luis Macías, Gustavo Tolson, Gabriel Valdez y Juan Carlos Mora: Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*, 2002, vol. 41, núm.2, p. 133-150.
- [11]. S.A. Nelson y A. Lighthart: Field excursion to the Sierra Las Navajas, Hidalgo, Mexico-A Pleistocene peralkaline rhyolite complex with a large debris avalanche deposit. En: II Convención sobre la Evolución Geológica de México y Recursos Asociados (Pachuca, Hidalgo, 12-14 de septiembre 1997), 1997, Libro-guía de las excursiones geológicas, v.1 excursión 4, p. 89-96.
- [12]. Aída López-Hernández: Evolución volcánica del complejo Tulancingo-Acoculco y su sistema hidrotermal, estados de Hidalgo y Puebla, México. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra, UNAM, Juriquilla, Querétaro, 2009, 170 p.

## III.2-EMPLAZAMIENTO DE DIQUES MAGMÁTICOS Y SU INTERPRETACIÓN TECTÓNICA: EJEMPLOS EN ROCAS TERCIARIAS DE LA SIERRA DE PACHUCA

José Cruz Escamilla-Casas<sup>a\*</sup>, L. E. Ortiz-Hernández<sup>a</sup>, E. Cruz-Chávez<sup>a</sup>, J. C. Castro-Mora<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo

\* Autor de correspondencia: [jocesca@uaeh.edu.mx](mailto:jocesca@uaeh.edu.mx)

### RESUMEN

Los diques de origen magmático son intrusiones que penetran y desplazan la roca encajonante, forman conductos desde la profundidad de la cámara alimentadora y fluyen ascendentemente a través de la parte superior de la corteza terrestre, hasta emplazarse. En este estudio, se considera que los diques son fracturas de tensión hidráulica en la roca encajonante, que están rellenas de magma y orientadas perpendicularmente al menor de los esfuerzos compresivos,  $\sigma_3$ , de acuerdo a la teoría Andersoniana. Consecuentemente, los diques de una misma generación definirían el mapa del campo de esfuerzos asociados al régimen tectónico. A partir de la actitud estructural de diques en la Sierra de Pachuca se sugiere la geometría de los mismos y la orientación del campo de esfuerzos en la corteza ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ). A pesar de no contar con edades radiométricas para las diferentes unidades rocosas de la Sierra de Pachuca, se considera que estas rocas se instauraron durante el Oligoceno hasta el Pleistoceno. Sin embargo, las relaciones de corte entre la roca encajonante, la deformación frágil y el emplazamiento de diques, permiten establecer una secuencia relativa de eventos geológicos. Los resultados sugieren la asociación tectónica entre el emplazamiento de diques y la deformación frágil.

**Palabras Clave:** diques, tectónica, Oligoceno, Pleistoceno, Sierra de Pachuca.

### ABSTRACT

Magmatic dikes are intrusions that penetrate and displace the host rock, form conduits connecting with the magmatic chamber, and get emplaced into the upper crust through ascending flows. In this work, dikes are considered hydraulic tension fractures in the host rock, infilled with magma, and oriented perpendicularly to the minimum compressive stresses,  $\sigma_3$ , following Anderson's theory. Consequently, a dike swarm of a single generation defines the stress field map associated with the tectonic regime that prevailed at the time of emplacement. Based on the structural attitude of outcropping diabase and granitoid dikes in Sierra de Pachuca, its geometry and the orientation of the stress field in the upper crust are inferred ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ). Despite the lack of radiometric ages for the different lithologic units of the Sierra de Pachuca, it is widely considered that these rocks were formed during Oligocene to Pleistocene times. Nevertheless, crosscutting relations among the host rock, the brittle structures, and

dike emplacement, allow the establishment of the relative sequence of geologic events. Results indicate that the emplacement of dikes and brittle deformation are tectonically associated.

**Keywords:** dikes, tectonics, Oligocene, Pleistocene, Sierra de Pachuca.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un dique es una fractura hidráulica que transporta magma proveniente de una zona donde ocurre una fusión parcial de roca o de una cámara magmática, la cual puede almacenar el material de una erupción volcánica o de una intrusión mayor. Por definición, un dique es una intrusión ígnea tabular que atraviesa los planos de sedimentación o la foliación de la roca encajonante. La geometría de los diques puede ser inspeccionada directamente en la superficie del terreno solo cuando estos han sido expuestos a través de procesos erosivos [1]. Los diques comúnmente tienen espesores del orden de centímetros a unos cuantos metros. El largo y ancho de los diques (extensiones vertical y horizontal, respectivamente) son dimensiones variables, pero siempre son significativamente mayores a los espesores. En consecuencia, es muy común que se haga la aproximación de un dique en el espacio como un cuerpo tabular bidimensional.

Sin embargo, los diques expuestos en el terreno y que permiten ser examinados individualmente a lo largo de grandes extensiones, tanto verticales y horizontales, son muy raras y escasas. Consecuentemente, llevar a cabo la caracterización geométrica de los diques es una tarea difícil. Por otra parte, durante el emplazamiento de un dique la presión del magma cambia y los esfuerzos en la roca encajonante también cambian, causando variaciones progresivas con el tiempo en la geometría del mismo. Adicionalmente, al enfriarse el material del dique y solidificarse, también provoca cambios en su espesor. Sin embargo, a pesar de estas complicaciones, las observaciones en el campo proporcionan un estimado de primer orden en cuanto a la geometría de un dique. La forma tabular de un dique se debe a que son fracturas generadas por la presión interna del magma, ya que, al momento de emplazarse, van generando una grieta en la roca de la corteza terrestre superior, donde las rocas se comportan como un material mecánicamente frágil.

Por otro lado, si se considera que los esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , y  $\sigma_3$ ; ortogonales entre sí) actúan sobre la parte superior de la corteza, es posible considerar que los diques desarrollen su espesor en contra del mínimo esfuerzo compresivo  $\sigma_3$ , y que se propaguen a lo largo de un plano perpendicular a  $\sigma_3$  [2].

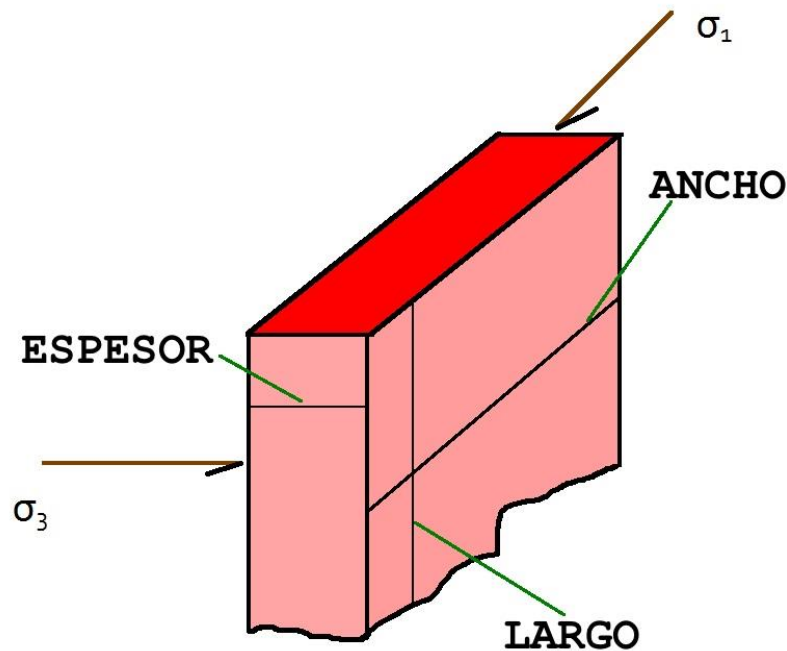
Lo anterior puede explicar por qué las orientaciones de los campos de esfuerzos en la corteza se mantienen homogéneos a escala regional. De hecho, se pueden inferir los patrones de esfuerzos en el interior de las placas tectónicas continentales que alojan enjambres de diques. Ejemplos de lo anterior se encuentran en el Escudo Canadiense, en donde ocurren enjambres de diques de diabasa del Precámbrico. Un segundo ejemplo se ubica en la costa este de los Estados Unidos, donde una serie de enjambres de diques mesozoicos se extienden desde Alabama hasta la región de Nueva Inglaterra a lo largo del cinturón montañoso de los Apalaches [3].

Finalmente, en el presente trabajo se pretende investigar si es que el emplazamiento de los diques que afloran en la Sierra de Pachuca está asociado a un evento de deformación. Para ello, se hace una comparación entre la orientación de los esfuerzos principales, inferida a partir de datos en planos de

fallas, con la orientación de los diques de diorita y granitoides. Los resultados sugieren que la orientación del campo de esfuerzos responsable de la deformación frágil, y que originaron las fallas, está subsecuentemente asociada con la orientación de los esfuerzos que controlaron la intrusión de los diques. Sin embargo, ambos eventos geológicos ocurrieron durante el Oligoceno - Pleistoceno de la Sierra de Pachuca.

### 1.1 Consideraciones teóricas

A pesar de que en la naturaleza los diques no son intrusiones perfectamente planas, estos adoptan una forma esencialmente tabular debido a que son fracturas generadas por la presión interna de un fluido ascendente (magma), al atravesar y emplazarse en materiales mecánicamente frágiles (roca). Considerando lo anterior, geoméricamente se puede establecer que el espesor de los diques es una dimensión mucho menor en comparación con el ancho y el largo (Figura 1). En la naturaleza, el espesor comúnmente es del orden de centímetros a metros, mientras que el largo (considerado aquí como la dimensión vertical paralela a la dirección de propagación) oscila entre unos cientos de metros hasta kilómetros. La tercera dimensión en los diques es el ancho, la cual es de un orden de magnitud similar al largo, pero un tanto menor. Ocasionalmente, existen diques anómalamente grandes, con decenas de metros de espesor y miles de kilómetros de longitud, en otras ocasiones, los diques ocurren en grupo y se denominan enjambres (Figura 2).



**Figura 1.** Diagrama esquemático mostrando las dimensiones que se consideran en este estudio y su relación con la orientación de los esfuerzos principales en un plano.

Teóricamente, se han formulado modelos que explican la propagación de diques en la corteza terrestre enfocados al ascenso del magma, e.g. la aproximación de Weertman [4]. Tal aproximación fue

introducida en un principio para modelar “crevasses” llenas de agua en los glaciares. Más tarde, se aplicó de manera efectiva en los estudios de los diques magmáticos en las dorsales oceánicas. La aproximación de Weertman establece que si el volumen inyectado,  $V$ , es menor que el valor crítico,  $V_c$ , la fractura será estática porque la configuración indica que el factor de intensidad del esfuerzo en los bordes de la intrusión no es suficiente para vencer la resistencia a la fractura de la roca,  $K_c$ . Si el volumen inyectado aumenta, la fractura se agranda. Si  $V = V_c$ , el factor de intensidad en el borde superior (para una fractura boyante que se propaga verticalmente hacia arriba),  $K^+$ , iguala exactamente a  $K_c$ , entonces la fractura tenderá a abrirse dentro de la roca encajonante y ascender. Tan pronto como la propagación se inicia, el factor de intensidad del esfuerzo en el borde inferior,  $K^-$ , se aproxima a cero: se asume que la fractura se cierra hacia el borde inferior, forzando al magma al ascenso cuando el factor de intensidad del esfuerzo iguala al del medio fracturado,  $K_c = 0$ . La longitud crítica de la fractura, puede ser obtenida a partir de las ecuaciones (1) y (2), para el factor de intensidad del esfuerzo en los bordes de la abertura de la fractura debido al gradiente de presión linear [4].

$$(1) K^+ = \sqrt{\pi a} \left( P_o + \frac{a}{2} \frac{dp}{dz_{tot}} \right) = K_c$$

$$(2) K^- = \sqrt{\pi a} \left( P_o + \frac{a}{2} \frac{dp}{dz_{tot}} \right) = 0$$

Donde  $P_o$  es la sobrepresión en el punto medio de la fractura,  $a$  es la longitud media de la fractura y  $dp/dz_{tot}$  es el gradiente de presión total con respecto a la profundidad. Por lo tanto, para una fractura rellena de material fundido ascendente en un campo de esfuerzos litostático/hidrostatico se explica mediante la ecuación (3), como sigue:

$$(3) dp/dz_{tot} = \Delta\rho g$$

En donde  $g$  es la constante de la gravedad,  $\Delta\rho$  es la diferencia de densidad entre sólido y líquido. Si el campo de esfuerzos es más complicado, entonces el gradiente tectónico total debe ser tomado en consideración.

Por otro lado, de acuerdo a la teoría Andersoniana [2], se considera que la superficie de la Tierra es una esfera perfecta y que la discontinuidad entre el aire y la tierra, en cualquier punto de la superficie terrestre, es un plano a lo largo del cual los esfuerzos cortantes son igual a cero. A partir de que las direcciones de los esfuerzos principales el esfuerzo cortante es cero, en consecuencia, la superficie de la tierra debe ser un plano que contiene dos de las tres direcciones de los esfuerzos principales. Esto permite establecer que, en general, los diques se abren en sentido contrario al mínimo esfuerzo principal compresivo,  $\sigma_3$ , y que la propagación ocurre a lo largo de un plano perpendicular a  $\sigma_3$ . En 2D la propagación de los diques ocurre en la dirección del máximo esfuerzo compresivo,  $\sigma_1$ .



**Figura 2.** Diques félsicos que cortan a un pórfido del Mioceno, expuesto en las inmediaciones de la mina Cubilete, San Miguel Tilquiapan, Oaxaca (Fotografía cortesía de J. Castro-Mora).

Finalmente, y siguiendo ahora con los conceptos de la teoría Andersoniana [2] aplicada a fallas, se tiene que si se conocen las orientaciones e inclinaciones de los planos de fallas y las direcciones del desplazamiento entre los bloques, se puede inferir la orientación de los esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ). Los conceptos relacionados a diques en combinación con los conceptos relacionados a la deformación frágil, dan soporte a la interpretación que motiva a esta investigación.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la aplicación e interpretación geológica de los conceptos descritos en la sección anterior, es necesario obtener datos de orientación del ancho de los diques y los correspondientes a las fallas. En este estudio, se colectaron los datos necesarios en rocas terciarias de la Sierra de Pachuca.

Una vez identificado el afloramiento de un dique en el área de trabajo, se procede a la localización del afloramiento mediante un navegador portátil, GPS. Posteriormente, se registró la descripción litológica, el espesor y a la toma de muestra de roca. La colección de datos estructurales en diques se efectuó mediante la lectura del rumbo del largo y del espesor, utilizando una brújula tipo Brunton. Los datos registrados se agregan a una base de datos geo referenciada con el objetivo de configurar y enriquecer, paulatinamente, el nivel de información cartográfica correspondiente a “Diques”, utilizando el Sistema de Información Geográfica, ArcMap v. 10.1.

Para los fines de este trabajo, los datos de orientación son los únicos que se presentan aquí. Para la interpretación y determinación de la dirección preferencial y rangos de orientación, se utilizó la proyección de tipo roseta de direcciones, generada a través del software Georient®. Así mismo, para dar mayor énfasis a la hipótesis de trabajo de que la orientación de los esfuerzos responsables de la

deformación frágil, y que originaron las fallas, está asociada con la orientación de los esfuerzos que controlaron la intrusión de los diques, se presentan los datos de orientación de diques, que ya no están accesibles en el campo, y que fueron publicados en trabajos anteriores [6].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el propósito de establecer una comparación que con claridad soporte a los argumentos de la discusión, en la Tabla 1 se concentran los datos de orientaciones de los diques publicados anteriormente y los que corresponden a la presente investigación.

**Tabla 1.** Resultados de las orientaciones del largo de diques e intrusiones menores. La orientación preferencial obtenida en ambos trabajos es hacia el NW. Las diferencias son mínimas.

Rango de variación de la Orientación del Largo del Dique	Orientación Preferencial del Largo del Dique	Autor
315 – 285°	290°	Geyne et al. [6]
320 – 290°	295°	Presente trabajo

En la Tabla 2, se muestran los promedios de los resultados de las orientaciones del campo de esfuerzos obtenidas a partir de los datos de orientación de 38 planos de falla y de las direcciones de desplazamiento de los bloques [7]. Cabe señalar, que la mayoría de las fallas registradas, son de tipo normal. Es decir, corresponden a un régimen distensivo de la corteza.

**Tabla 2.** Resultados promedio de los análisis de la cinemática de fallas a partir de datos estructurales en los planos de 28 fallas. Las abreviaturas empleadas son como sigue: Direc. = dirección; Incl. = inclinación; R = rumbo; E = echado; D = dirección; I = inclinación. Exceptuando las columnas Eje y Falla, las unidades están expresadas en grados de circunferencia.

Suma del Tensor de los Esfuerzos			Solución de los planos de falla			Eje Compresión		Eje Tensión	
Eje	Direc.	Incl.	Falla	Plano (R/E)	Sentido de desplazamiento (D/I)	Dirección	Inclinación	Dirección	Inclinación
$\sigma_1$	126.3	11.31	1	246.1/37.8	50.1/39.4	119	19.15	219.45	64
$\sigma_2$	196.3	5.8	2	141.6/50.6	217.1/49.9				
$\sigma_3$	203	78.7							



A partir de la teoría Andersoniana, se tiene que la dirección de propagación de los diques (ancho) es paralela al máximo esfuerzo principal,  $\sigma_1$ , y que el espesor es paralelo al mínimo esfuerzo principal,  $\sigma_3$ . En el caso de los diques registrados en campo y los publicados por autores previos, Tabla 1, la orientación del máximo esfuerzo principal ocurre en dirección 290-295°. Es decir, la orientación de los diques tiene un rumbo WNE-ESE. Si geoméricamente obtenemos la dirección de una perpendicular a 290-295° se obtiene una dirección 200-205°, que correspondería a la orientación del mínimo esfuerzo principal,  $\sigma_3$ .

Ahora bien, los datos en los planos de falla que permiten la obtener una aproximación razonable de la orientación de los principales esfuerzos, se tiene que el máximo esfuerzo principal,  $\sigma_1$ , tiene una dirección de 126.3° y que el esfuerzo principal mínimo,  $\sigma_3$ , tiene una dirección de 203°.

#### 4. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se derivan del presente estudio son:

1. Las orientaciones de los esfuerzos principales máximos,  $\sigma_1$ , obtenidos a partir de orientaciones de los diques y las deducidas a partir de datos estructurales en fallas, son colineales entre sí.
2. Los argumentos anteriores soportan a la hipótesis de que los diques y las fallas en la Sierra de Pachuca, son eventos geológicos que están asociados al mismo campo de esfuerzos.
3. Por sus relaciones de corte ambos eventos, el emplazamiento de diques y el fallamiento, ocurrieron durante el Terciario, pero posteriores a la instauración de las rocas de la Sierra de Pachuca
4. A pesar de que los resultados derivados de este estudio son contundentes, las dataciones radiométricas son imprescindibles para el establecimiento de la sucesión cronológica de eventos geológicos.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los revisores anónimos por el tiempo dedicado a la lectura del presente trabajo. Asimismo, se extiende el agradecimiento a los estudiantes de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental - UAEH que han participado activamente como ayudantes en el campo.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1]. S. Tait and B. Taisne, The Dynamics of Dike Propagation en Modelling Volcanic Processes: The physics and Mathematics of Volcanism, First Edition, Edited by Sarah A. Fagents, Tracy K. P. Gregg, and Rosaly M. C. Lopes, Cambridge University Press, New York, 2013, pp. 32-54.
- [2]. E. Anderson: The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain, 1951, Oliver and Boyd, Edimburgh, 206 pp.1-8
- [3]. J. Gregory McHone, Mafic dikes suites within Mesozoic igneous provinces of New England and Atlantic Canada: Geological Society of America – Special Paper, 1992, 268, pp. 1-11.
- [4]. J. Weertman, The stopping of a rising, liquid-filled ceack inn the Earth´s crust by a freely slipping horizontal joint: Journal of Geophysical Research, 1980, 85, pp. 967-976.

- [5]. D. T. Secor, D. D. Pollard, On the Stability of open hydraulic fractures in the Earth's crust: *Geophysical Research Letters*, 1975, 2, pp. 510-513.
- [6]. A. R. Geyne, Carl Fries, Jr., Kenneth Segerstrom, R. F. Black, and I.F. Wilson: *Geology and Mineral Deposits of the Pachuca-Real del Monte District, State of Hidalgo, Mexico*, 1963, Consejo de Recursos Naturales no Renovables, Publication 5E, 205 pp.
- [7]. J.C. Escamilla-Casas, L.E. Ortíz-Henández, A. Blanco-Piñón, E. Cruz-Chávez, S.P. Ambrocio-Cruz, Interpretación de la Cinemática de las Fallas Neo-Tectónicas Frágiles del Sector Sureste de la Sierra de Pachuca: *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 2014, Vol. 1, Tópico II, pp. 67-75.

### III.3-METALOGÉNESIS DE LA MINERALIZACIÓN TIPO IOCG RELACIONADA AL SKARN DEL DISTRITO MINERO LAS MINAS, ESTADO DE VERACRUZ

Jesús Castro-Mora<sup>a\*</sup>, L.E. Ortiz-Hernández<sup>a</sup>, J.C. Escamilla-Casas<sup>b</sup>, E. Cruz-Chávez<sup>c</sup>, Dorantes-Castro, C.G.<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
leoh44@hotmail.com

<sup>b</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
jocesca@uaeh.edu.mx

<sup>c</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
kious\_ec@yahoo.es

<sup>d</sup>Instituto Politécnico Nacional IPN, ESIA Ticomán, tesista de Licenciatura  
ing\_geologa\_ipn@hotmail.com

\* Autor de correspondencia: [jesus\\_castro11293@uaeh.edu.mx](mailto:jesus_castro11293@uaeh.edu.mx)

#### RESUMEN

El Distrito Minero Las Minas se localiza en la porción central del Estado de Veracruz, dentro de la Provincia Geológica del Macizo de Palma Sola. Geológicamente la zona estudiada está representada por una secuencia de rocas carbonatadas de edad Cretácica, las cuales están intrusionadas por una serie de *stocks* graníticos del Terciario, mismos que generaron un proceso de metamorfismo de contacto que dio lugar a la formación de un *skarn* proximal con mineralización económica de tipo IOCG (Iron-Ore Copper-Gold, por sus siglas en inglés), con paragénesis típicas de sulfuros de cobre-magnetita +/- oro y ocasionales contenidos de cobre nativo. La componente mineral no metálica presenta granate tipo grosularita, wollastonita, clinopiroxenos y calcita, sobre todo en los frentes de mármol.

El presente estudio permitió definir la zonación progradante y retrógrada de la aureola de metamorfismo, cuya escala varia, desde varios metros hasta ocho kilómetros a partir de los intrusivos causantes de la formación del *skarn*.

Actividad magmática tardía, posiblemente sincrónica con la cobertura volcánica post-mineral (secuencias piroclásticas), ha sido reconocida y se manifiesta por el emplazamiento de diques de composición básica que cortan a todo el sistema mineralizado.

**Palabras Clave:** IOCG, Skarn, Palma Sola, Las Minas, Zonación

## ABSTRACT

Las Minas Mining District is located in central Veracruz State, on the Palma Sola Massif Geological Province. The geological setting of the studied area is represented by a Cretaceous sequence of calcareous rocks intruded by Tertiary granitic stocks, which generate a proximal skarn within economic IOCG (Iron Oxide Copper Gold) mineralization with typical paragenetic associations represented by copper sulfides with magnetite and economic gold grades with occasionally native copper. Gangue mineralization is compound mostly by garnet (grossular type), wollastonite, clinopyroxene and calcite, mainly on the marble fronts.

The present study was able to define prograde and retrograde zonation in surface mapping of the metamorphic halo, which varies from several meters to eight kilometers from the intrusive rocks as precursors of the skarn formation.

Late magmatic activity, probably synchronous with the postmineral volcanic covering sequence (pyroclastic) has been recognized and is characterized by the emplacement of basic dykes that cross all the mineralized system.

**Keywords:** IOCG, Skarn, Palma Sola, Las Minas, Zonation

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el estudio de la metalogenia va de la mano con la exploración y tipología de depósitos minerales, así como a su modo de emplazamiento. El concepto de *skarn* conlleva dos significados primordiales: a). Petrológico, *sensu stricto*, y b). Económico. La connotación petrológica de *skarn* [9] se refiere a aquellas rocas derivadas de un proceso de metamorfismo de contacto, producto del metasomatismo que produce la acción de rocas intrusivas sobre rocas carbonatadas, principalmente calizas o dolomías; tal interacción da lugar a la formación de una roca con texturas y componentes mineralógicas características, sobre todo de silicatos de calcio y magnesio. Por otra parte, *skarn* es un término que conlleva viabilidad económica [15] y proviene de la antigua minería sueca siendo utilizado ampliamente para referirse a aquellos yacimientos de una gran variedad de asociaciones metálicas localizadas en la proximidad al contacto entre rocas ígneas intrusivas y rocas de afinidad calcárea[10].

Por su parte, en fechas recientes, el concepto de mineralización tipo IOCG [14]; [29] se utiliza ampliamente para referirse a uno de los estilos de mineralización más controvertidos; el término IOCG (Iron Oxide Copper Gold) o bien (Iron-Ore, Copper-Gold, por sus siglas en inglés) se puede asignar a aquellos depósitos compuestos por óxido de hierro, con contenidos económicos de cobre y oro asociado, con abundante magnetita o hematita. Tales depósitos también contienen una variedad de otros elementos potencialmente económicos, como plata, cobalto, molibdeno y bismuto. No obstante que la asociación de óxidos de hierro (magnetita o hematita) con sulfuros de cobre y contenidos de oro se encuentra en una gran variedad de estilos de mineralización, el origen de los depósitos tipo IOCG ha sido debatido por modelos de formación que van desde fluidos derivados de procesos metamórficos, hasta magmas que involucran la acción de fluidos hidrotermales, [5], [11], [16], [29], [21], [17].

Gran parte de los depósitos IOCG del mundo se localizan en ambientes geológicos Precámbricos. Ejemplos célebres de depósitos IOCG alrededor del mundo involucran al yacimiento Olympic Dam en

Australia, que fue el que dio origen a esta tipología o categorización de yacimiento y Candelaria y Monte Verde (Cretácico) en Chile [14], [16], por citar los más relevantes. Para el caso de México, el depósito de Guaynopa, en el estado de Chihuahua, podría entrar en esta categoría, se asocia a intrusiones gabroicas [12] y Peña Colorada, según [27] presenta similitudes relevantes con este tipo de depósitos. En ese contexto, la región de Las Minas, por sus características geológicas, mineralización y rocas asociadas representa típicamente un *skarn* de Cu-Fe con contenidos potencialmente económicos de Au que se circunscribe con bastante aproximación al tipo IOCG y podría constituir uno de los depósitos más recientes en términos de tiempo geológico.

### 1.1 Antecedentes

La cabecera municipal de Las Minas es una comunidad rural a la que se accede por caminos de terracería, cuenta con una planta de generación de energía eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que tiene una capacidad de 12 mil Kw de generación, misma que está construida sobre el cauce de río Las Minas; la población total, incluyendo a las comunidades aledañas es de 2900 habitantes (figura 1). En Las Minas se encuentra un importante y antiguo distrito minero que data de la época precolombina, ya que se existen registros que mencionan que los indígenas de la región de Chiconquiaco extraían oro y otros metales de sus terrenos para pago de tributos al entonces Imperio Azteca; para ésta época, las localidades de mayor relevancia fueron Tenepanoya, Tatatila y Zomelahuacan, conocido actualmente como Las Minas [2]; el principal auge del Distrito se llevó a cabo durante la época de la colonia, con el desarrollo de las principales obras mineras, que aún existen en la región. A mediados del siglo XX (décadas de los años 50's y 60's) se realizaron trabajos exploratorios en la zona encaminados a la exploración y evaluación de recursos de mineral de hierro.

Desde el punto de vista geológico, la zona ha sido poco estudiada, se tiene el registro de reportes geológicos antiguos en la zona [18], así como múltiples reportes técnicos inéditos realizados por personal del extinto Consejo de Recursos Minerales (hoy Servicio Geológico Mexicano), muchos de los cuales se agruparon en una compilación que refiere a la geología y yacimientos minerales de la zona Tatatila-Las Minas y que se consignó en la Monografía Geológico-Minera del estado de Veracruz [2]. En el año 2010 la empresa consultora Geoconsulting Ingenieros, S.C. realizó una exploración preliminar que incluyó muestreo de las principales minas y afloramientos mineralizados, así como el análisis de la información disponible constatando la importancia geológica del Distrito Minero [3].

Cartografía geológica regional (Carta Perote E14-B26) fue realizada por el Servicio Geológico Mexicano [23], un aporte significativo de dicha cartografía es el referente a la asignación de edad (Mioceno) a las principales rocas intrusivas de la región (obtenida por el método K-Ar). En fechas recientes, y desde el año 2011, el área de estudio se encuentra bajo una intensa actividad exploratoria con fines de evaluación económica, misma que ha contemplado cartografía geológica de detalle, prospección geofísica, muestreo intensivo en superficie e interior de mina, así como barrenación a diamante por parte de la empresa canadiense Source Exploration Corp. A la fecha no se cuenta con estudios de investigación metalogénica dentro del Distrito Minero; sin embargo, gracias a la exploración minera, la zona ha comenzado a despertar el interés de investigación geológica y de su evolución en términos de la tectónica del centro-sur de México. Los primeros estudios formales enfocados a conocer la petrología de los intrusivos y de los *skarns* derivados se han realizado recientemente y han permitido conocer y establecer, *a priori*, el potencial geológico de la mineralización existente [8].



*Figura 1.* Localización del Distrito Minero Las Minas.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El presente estudio se desarrolló en tres etapas principales: a). Planeación de trabajo de campo, interpretación de imágenes satelitales para mapeo preliminar e investigación de trabajos previos en la zona; b). Etapa de trabajo de campo de cartografía geológica y selección de sitios de muestreo con posicionamiento GPS de coordenadas en formato UTM; c). Preparación de muestras para determinaciones petrológicas, minerográficas y geoquímicas. De manera simplificada los análisis correspondientes se llevaron a cabo de la siguiente manera:

i). Para el análisis de los minerales translúcidos las muestras se cortaron, devastaron y pulieron para ser colocadas sobre un portaobjetos (láminas delgadas) a  $30\mu$  (micras) de espesor sobre bálsamo de Canadá, cuyo índice de refracción es conocido (1.52). Una vez preparadas se analizaron bajo luz transmitida (diascópica) y se realizó el conteo modal de la componente mineral esencial (porcentajes), mismo que se graficó en diagramas QAPF [26].

ii). Las muestras para minerografía (superficies pulidas) se analizaron bajo luz reflejada (episcópica).

Las fotomicrografías se obtuvieron con una cámara especial de 16 megapíxeles montada en el microscopio petrográfico marca Iroscope Modelo MG-323P, propiedad de Geoconsulting Ingenieros, S.C y analizadas con ayuda del software ToupView compatible Microsoft Windows 7 y posteriores.

Las muestras para análisis geoquímico de elementos traza, principalmente de Au, Cu, Fe, suman un total de 19, se mandaron a analizar a SGS laboratories en Canadá y el costo fue financiado por la empresa exploradora Source Exploration, Corp.; para el presente estudio se utilizaron aquellas representativas de las zonas con mejores contenidos en Oro y Cobre; se colectaron en promedio de 2kg por cada muestra.

El muestreo destinado a geoquímica de elementos mayores (12 muestras), se llevó a cabo principalmente en las rocas intrusivas; éstas rocas, primeramente, se descostraron para retirar la capa de alteración meteórica. **Para el análisis geoquímico, se utilizó el método de fluorescencia de Rayos X (FRX o XRF por sus siglas en inglés).** Para llevar a cabo el análisis FRX e ICPMS fue necesario seleccionar muestras de roca con el mínimo de alteración meteórica, obteniendo un peso aproximado

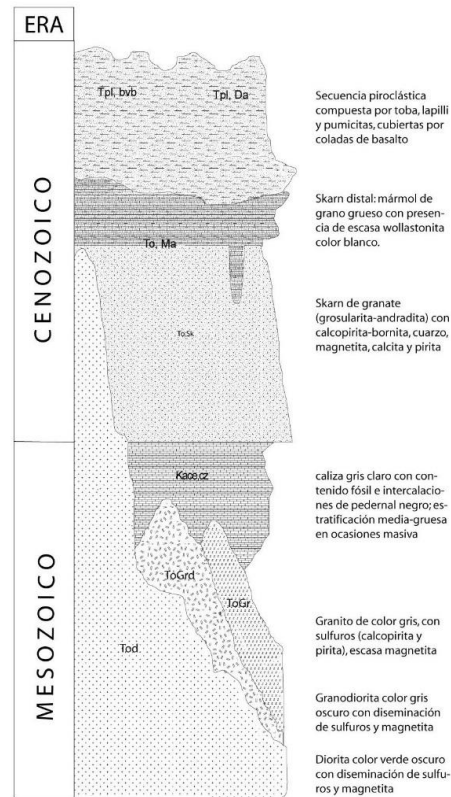
que varía entre 12 y 15 kg por cada muestra para el análisis de elementos mayores. **Estos análisis fueron realizados en el** Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, del Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la UNAM. El equipo consta de un espectrómetro secuencial de Rayos X equipado con tubo de rodio y ventana de berilio de 125  $\mu\text{m}$  para determinar el porcentaje en peso (5 wt) de los elementos mayores de las rocas: silicio (Si), titanio (Ti), aluminio (Al), hierro (Fe), manganeso (Mn), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y fósforo (P). Por último, los resultados obtenidos se graficaron en diagramas QAPF de Streckeisen para clasificación de rocas y las correspondientes a la geoquímica se procesaron en el software Iqpet.

## 2.1 Marco Geológico

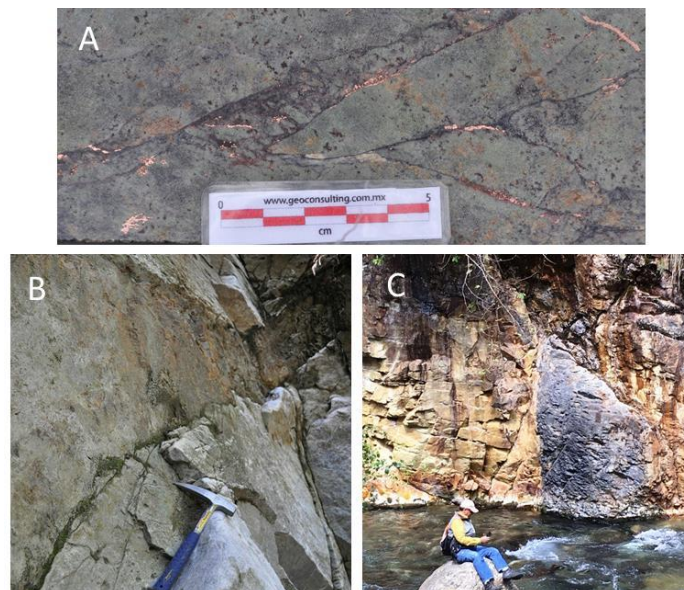
El marco geológico del Distrito Minero Las Minas, se caracteriza por una columna litológica expuesta que comprende del Cretácico Inferior al Holoceno (figura 2). De la base a la cima, la columna estratigráfica presenta una secuencia de caliza y dolomía que se correlaciona con la Formación Orizaba [23], misma que se encuentra intrusionada por stocks graníticos postorogénicos a la deformación Laramídica [7], [4] los cuales propiciaron un fenómeno de metamorfismo de contacto que generó la formación del skarn con mineralización de sulfuros de cobre, magnetita y valores de oro, localizados en las zonas proximales al contacto entre dichos intrusivos con las rocas calcáreas.

El skarn generado describe claramente una zona proximal, representada por rocas de textura granoblástica y mineralización metálica tipo IOCG, acompañada por cobre nativo y asociaciones de granate (grosularita-andradita)-wollastonita-clinopiroxenos y calcita; la zona distal se ve representada por mármol de grano grueso a mármol de grano fino hacia la periferia de las rocas intrusivas; la misma zonación se pudo corroborar en muestras obtenidas de barrenación. Los stocks graníticos presentan una clara diferenciación magmática, al variar de una composición intermedia (granodiorita-diorita) a una composición ácida (granítica).

Con el desarrollo del presente estudio se observó que, tanto las rocas plutónicas, como el skarn mismo, se encuentran, a su vez, intrusionados por diques postmagmáticos que varían en composición, de ferromagnesiana a cuarzo-feldespática; probablemente tales diques se hayan derivado de stocks porfídicos hipabisales (de poca profundidad) que también presenten una diferenciación magmática (figura 3). Toda la secuencia descrita se encuentra cubierta, de manera discordante, por un paquete de rocas piroclásticas representadas, de manera general, por secuencias de toba, lapilli y pumicitas del Terciario Superior (figura 4). Las estructuras geológicas mayores reconocidas corresponden a sistemas de falla complejos; con cinemática evolutiva de cizalla dextral a movimiento normal. Estas grandes estructuras corresponden a los ríos perennes Las Minas y Trinidad y actualmente tienen un corrimiento principal en dirección NNE-SSW [8].

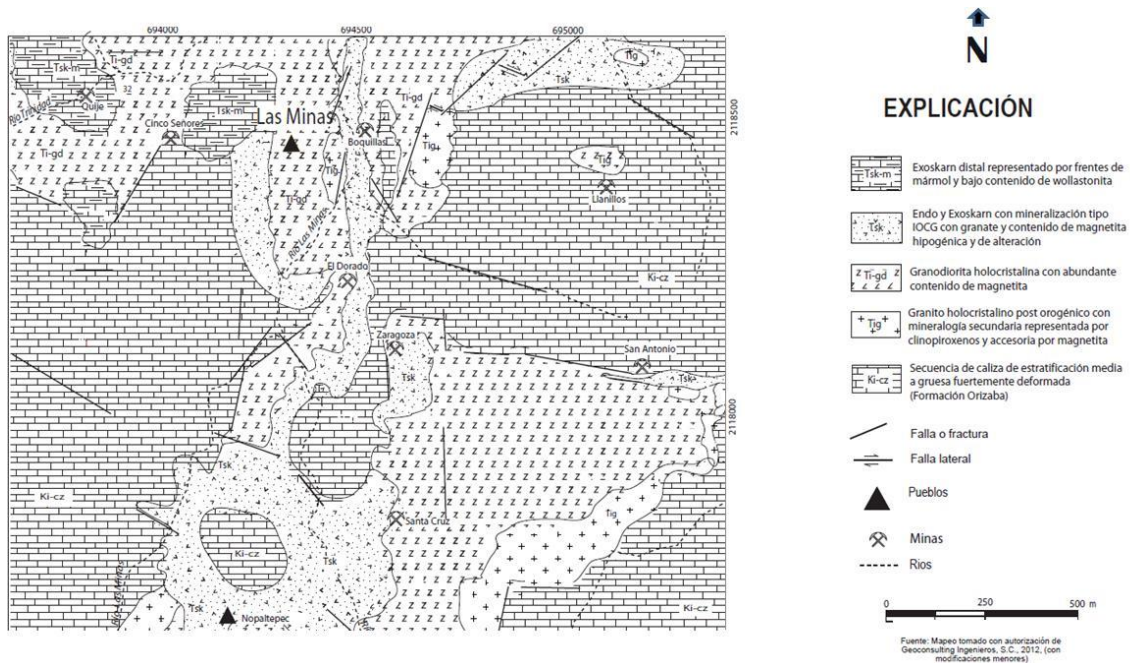


**Figura 2.** Columna estratigráfica del Distrito Minero Las Minas, estado de Veracruz (Modificado de Dorantes-Castro, 2016), con autorización de Geoconsulting Ingenieros, S.C.



**Figura 3.** A. Núcleo de perforación con Cu nativo alojado en las fracturas del skarn; B. Dique microgranítico que corta un afloramiento de mármol; C. Dique básico (oscuro) que corta granitos expuestos en el cauce del río Trinidad.





**Figura 4.** Mapa geológico simplificado del Distrito Minero Las Minas, estado de Veracruz (Modificado de Dorantes-Castro, 2016), con autorización de Geoconsulting Ingenieros, S.C.

## 2.2 Petrología y Minerografía

Para el presente estudio se colectaron y analizaron un total de 10 muestras para determinaciones petrológicas y siete para minerografía, de las cuales se seleccionaron dos para ilustrar las características bajo el microscopio de aquellos intrusivos que se localizan en las principales obras mineras (Boquillas y El Dorado) y que generaron los cuerpos mineralizados más prominentes del distrito (LBC8 y 31); Asimismo, se seleccionaron dos muestras para ilustrar las características y mineralogía del skarn, proximal y distal (LM-11-SC-44 a 11m de profundidad de barreno y LM-11-SC-44 a 98m de profundidad de barreno).

De igual manera, se presentan dos muestras de mineral económico estudiadas con microscopía de luz reflejada (LM-11-SC-44 a 11m de profundidad de barreno y LM-12-SC-54 a 100.3m de profundidad de barreno). (figuras 5 y 6). Las clasificaciones petrológicas se obtuvieron, una vez realizado el conteo modal, de acuerdo a diagramas QAPF [26]. (figura 7 y tabla I), definiéndose un predominio de rocas granodioríticas y graníticas. La zonación espacial del skarn se pudo establecer, de manera preliminar, tanto en superficie, como en sentido vertical a través de la cartografía, la petrología y la barrenación a diamante. Las rocas intrusivas claramente muestran un origen profundo, dado su grado de cristalinidad (holocristalinas) y a que presentan primordialmente fenocristales de composición cuarzofeldespática; puede notarse, en ambos casos, afectación de alteración retrógrada e hidrotermal dada por la presencia de clorita y sericita en ambas muestras intrusivas. Por su parte, las rocas que corresponden al skarn muestran claramente mineralogía representativa de la zona progradante (grosularita, magnetita, ortopiroxenos) y retrograda (clinopiroxenos, serpentización (antigorita), wollastonita, calcita).

### 2.3 Análisis Geoquímicos

Los análisis geoquímicos practicados se dividieron en geoquímica de elementos traza, con énfasis en los contenidos de oro y cobre; para ellos se tomaron 19 muestras de nueve barrenos localizados en las zonas de mayor potencial conocido hasta ahora (Tabla II).

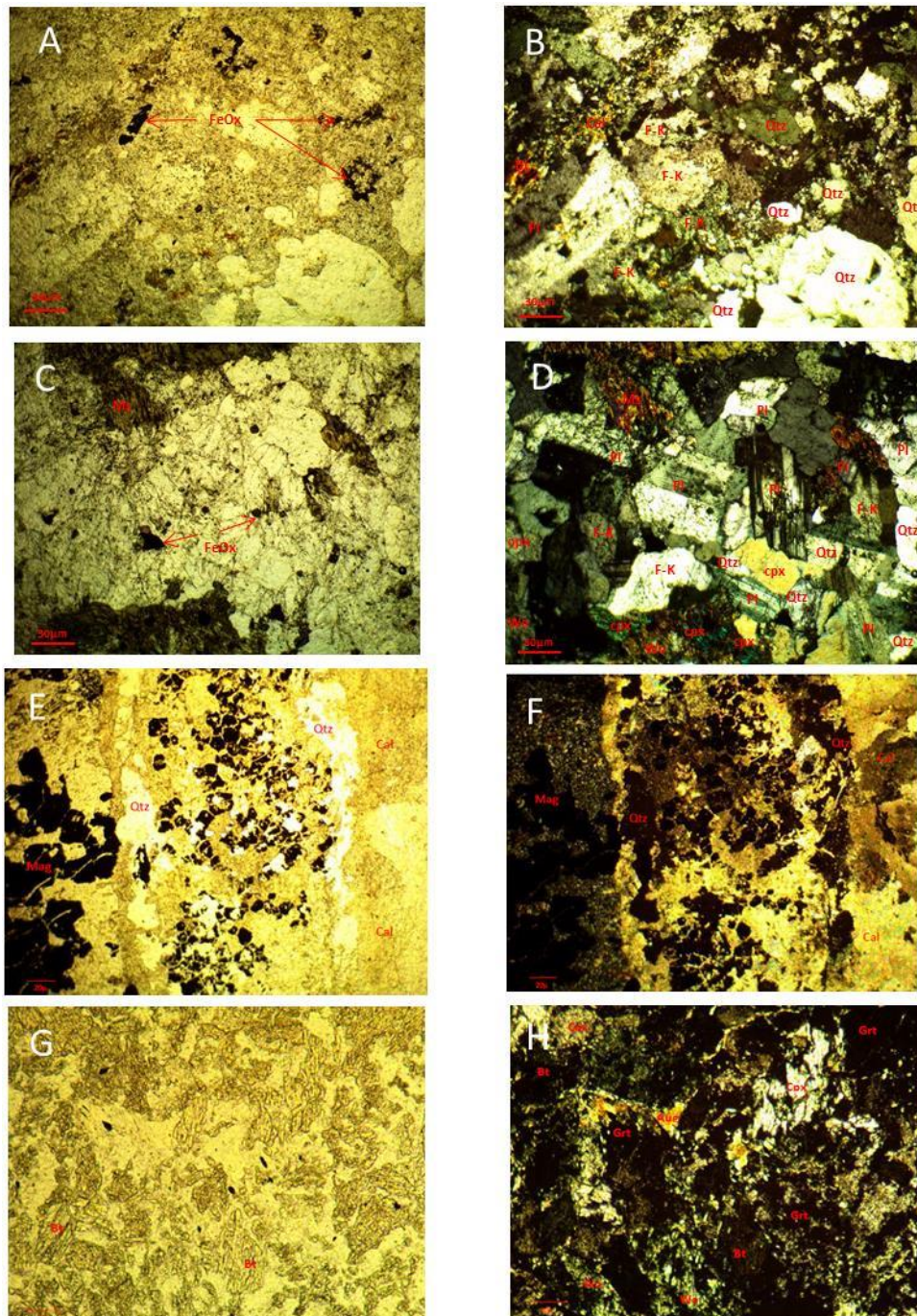
Por su parte, la geoquímica de elementos mayores se realizó con la toma de 12 muestras de los principales afloramientos de rocas intrusivas a las que se les atribuye la formación del skarn y de la zona mineralizada [8].

El objeto de la geoquímica de elementos mayores fue en el sentido de conocer, tanto el magmatismo al cual se asocian los intrusivos relacionados con la mineralización, como al ambiente tectónico de emplazamiento de los mismos obteniéndose concordancia en ambos aspectos.

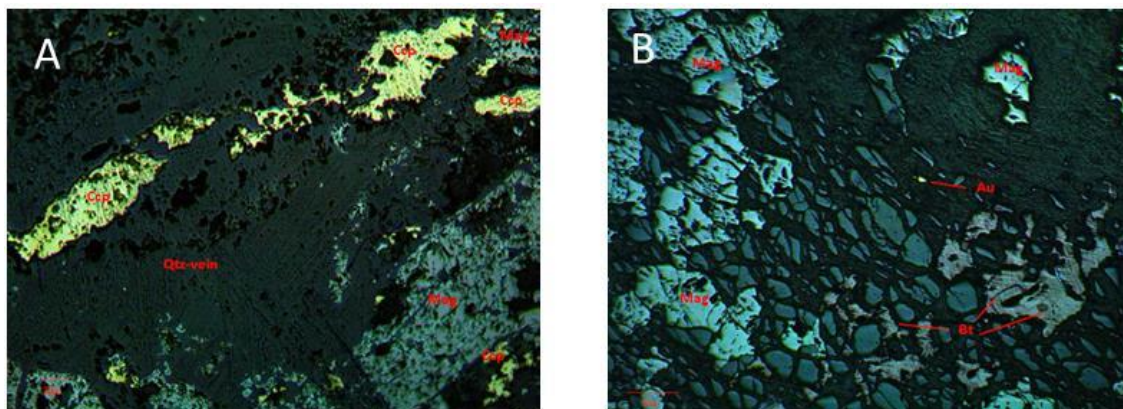
### 3. RESULTADOS

Con el presente estudio se establecen los siguientes resultados significativos:

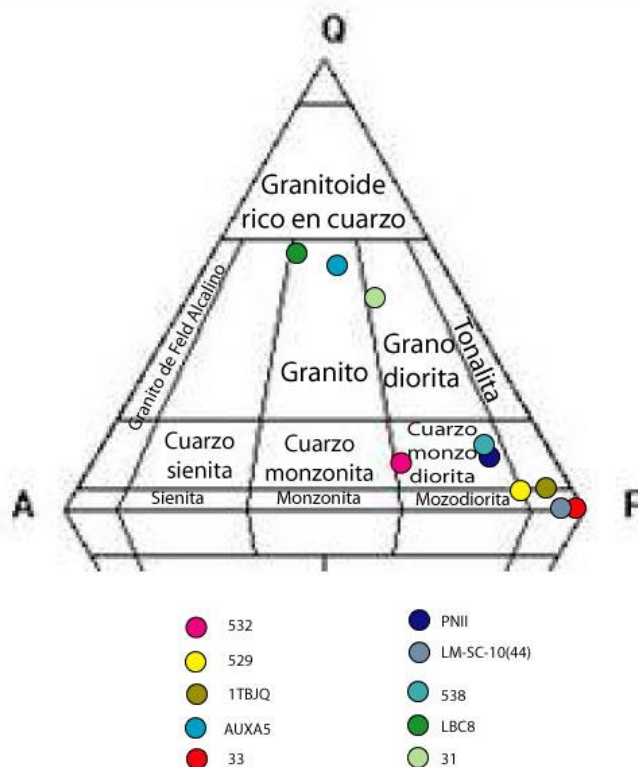
1. La caracterización petrológica de las rocas estudiadas deja en claro la estrecha relación que existe entre los intrusivos de naturaleza granítica-granodiorítica con la formación de skarn proximal con mineralización de magnetita y sulfuros de cobre con valores de oro.
2. La geoquímica de elementos traza deja en claro un sistema mineralizado con valores económicos de Cu y Au que se asocian al skarn de magnetita (tabla III).
3. El análisis de la geoquímica de elementos mayores da como resultado dos aspectos preponderantes: El diagrama de variación AMF pone de manifiesto el carácter calcialcalino de los magmas que dieron lugar al emplazamiento de las rocas intrusivas, que a su vez, una vez graficadas en diagramas de ambiente tectónico, considerando la relación Rb vs Y+Nb [20] muestran un emplazamiento de los magmas dentro de un ambiente de arco volcánico (figuras 8 y 9)



**Figura 5.** Selección de muestras de Las Minas: A. muestra LBC8 luz paralela, B. luz polarizada, nótese la componente cuarzofeldespática dominante (5X) GRANITO; C muestra 31 con luz paralela y D con luz polarizada, nótese que hay mayor porcentaje de plagioclasas (oligoclasa-andesina) con relación al cuarzo (5X) GRANODIORITA; E. muestra LM-11-SC-44 con luz paralela y F con luz polarizada, magnetita en una matriz de calcita y sílice con una vetilla de cuarzo post magnetita (5X) SKARN PROXIMAL; G. muestra LM-11-SC-44 a 98m profundidad con luz paralela se observan minerales de fuerte relieve y pleocroicos; H con luz polarizada, el 90% de la mineralogía corresponde a granate y clinopiroxenos en una matriz calcárea, se distingue wollastonita, biotita (5X), SKARN DISTAL, fase retrógrada.



**Figura 6.** Selección de muestras con mineralización metálica de Las Minas, observadas con luz reflejada: A. muestra LM-11-SC-44 a 11m de profundidad de barrenación, observación con luz polarizada, nótese calcopirita(ccp) alojada en una veta de cuarzo (qtz) y magnetita (Mag) (10X) en la parte inferior de la fotografía; B. muestra LM-12-SC-54 a 100.3m de profundidad de barreno, observación con luz polarizada, nótese predominio de magnetita (Mag) y bornita (bt) en donde destaca un fragmento de oro (Au) aislado (5X).



**Figura 7.** Muestras de las rocas intrusivas procedentes de Las Minas graficadas en un diagrama QAPF (en este caso por ser rocas sin feldespatoides solamente se utilizó la región QAP. Las clasificaciones correspondientes se muestran en la tabla I (basado en Streckeisen, 1974).

**Tabla I.** Muestras de las rocas intrusivas procedentes del Distrito Minero Las Minas donde se muestra la composición modal de las mismas en cuanto a la mineralogía esencial; los contenidos en minerales accesorios se discriminaron por ser porcentajes < 5% al momento de graficarlos en el diagrama QAP.

ROCA	MUESTRA	Q (%)	A (%)	P (%)
Cuarzomozodiorita	532	10	30	60
Granodiorita	529	5	10	85
Diorita	1TJBQ	4	6	90
Granito	AUXA5	52	21	27
Diorita gabroica	33	1	2	97
Monzodiorita	PNII	10	12	78
Gabro	LM-14-SC-10 (44m)	1	2	97
Monzodiorita	538	15	10	75
Granito	LBC8	55	25	15
Granodiorita	31	40	15	30

**Tabla II.** Contenidos metálicos de las muestras analizadas de núcleos de perforación de las zonas El Dorado-Juan Bran y Santa Cruz (tomado con autorización de Source Exploration, Corp., 2016) \* Au Eq g/t igual a Au g/t + (Ag g/t x 0.016) + (Cu% x1.71).

RESULTADOS DE LA BARRENACIÓN EN LAS LOCALIDAD EL DORADO/JUANBRÁN							
Barreno	Desde	Hasta	Intersección	Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu %	Au Eq* (g/t)
	(m)	(m)	(m)				
LM-15-ED-20	110.7	132.7	22	0.64	5.54	0.74	2
	114.7	132.7	18	0.74	5.9	0.86	2.3
	114.7	126.7	12	1.09	8.53	1.26	3.38
	114.7	122.7	8	1.58	12.03	1.7	4.67
LM-15-ED-21	85.6	99.6	14	1.56	7.5	1.36	4.01
	85.6	97.6	12	1.8	8.49	1.56	4.61
	85.6	95.6	10	2.05	9.27	1.74	5.17
	85.6	93.6	8	2.37	10.21	1.96	5.89
LM-15 ED-22	68.2	82.5	14.3	0.76	5.65	1.6	3.59
	68.2	80.5	12.3	0.87	6.55	1.85	4.14
LM-14-JB-01	131.5	174	42.5	0.77	2.35	0.48	1.55
LM-14-JB-02	13.5	19.5	6	4.43	0.33	0.01	4.45
Zona inferior	99.4	114.5	15.1	1.15	4.93	1.1	3.1
LM-14-JB-03	111.9	119.9	8	0.88	0.46	0.17	1.18
LM-14-JB-04	64.3	74.3	10	0.7	4.4	0.61	1.82
LM -11-SC-36	220.6	302.6	82	1.08	2.54	0.4	1.73
	220.6	230.6	10	2.98	2.9	0.36	3.58
LM-11-SC-49	251.6	293.6	42	1.08	3.05	0.42	1.78

	261.6	279.6	18	2.21	5.18	0.64	3.28
Ley Media				1.51	5.56	0.99	3.27

TABLA III. CONCENTRACION DE % EN PESO DE ELEMENTOS MAYORES													
COMPONENTE	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	BaO	PXC	Suma
UNIDAD	masa %	masa %	masa %	masa %	masa %	masa %	masa %	masa %	masa %	masa %	masa %	masa %	masa %
LBC8	56.143	0.854	18.75	5.58	0.104	2.044	6.114	3.758	3.134	0.26	0.069	3.19	99.931
1TJBQ	58.74	0.384	16.966	6.615	0.144	2.81	8.092	5.082	0.384	0.156	0.016	0.61	99.983
A	52.646	0.808	17.809	9.407	0.132	5.292	8.678	3.417	0.918	0.229	0.034	0.63	99.966
31	67.43	0.424	16.044	2.694	0.035	1.43	2.144	3.852	4.473	0.161	0.143	1.17	99.857
32	56.354	0.659	17.596	6.563	0.11	4.128	7.693	3.72	2.041	0.275	0.052	0.81	99.949
33	54.578	1.145	16.146	6.598	0.147	5.213	9.576	3.727	2.13	0.344	0.057	0.34	99.944
534	63.095	0.45	16.804	3.838	0.07	1.836	5.488	4.631	3.12	0.259	0.088	0.32	99.911
533	55.487	0.628	15.975	6.235	0.153	6.478	7.732	3.558	2.12	0.204	0.061	1.37	99.94
531	53.019	1.298	17.604	7.76	0.141	4.297	7.784	4.436	1.566	0.399	0.056	1.64	99.944
529	66.944	0.427	16.959	2.604	0.029	1.22	3.897	4.667	2.009	0.174	0.11	0.96	99.89
538	48.29	0.944	15.685	7.589	0.141	4.247	9.597	2.514	1.604	0.228	0.06	9.1	99.939
532	65.826	0.445	16.37	4.182	0.057	1.54	3.925	3.634	2.664	0.173	0.104	1.08	99.896

\*\*Laboratorio de fluorescencia de rayos X, Departamento de Geoquímica, Instituto de Geología, UNAM

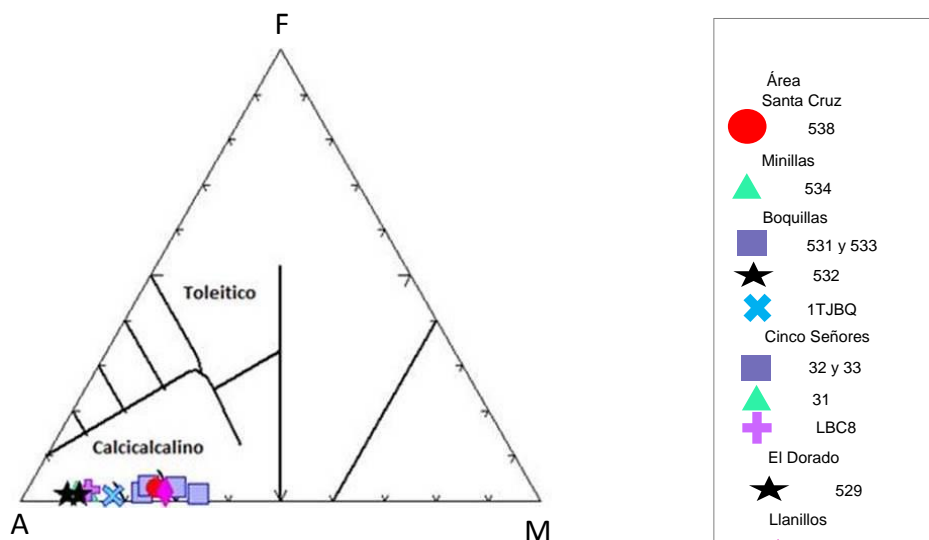
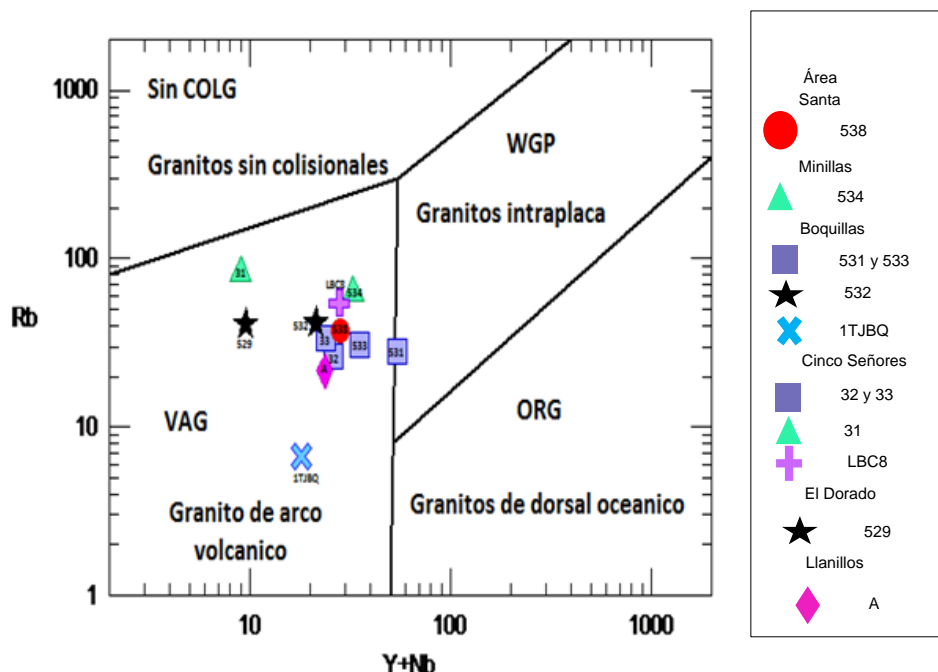


Figura 8. Diagrama de variación AFM para las rocas procedentes de Las Minas, estado de Veracruz, nótese que la totalidad de las muestras quedan circunscritas al campo de la serie magmática calcicalcalina.



**Figura 9.** Diagrama de ambiente tectónico de acuerdo a Pearce et al, (1984); prácticamente la totalidad de las muestras que proceden de Las Minas, estado de Veracruz, se asocian a un ambiente de arco volcánico

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Al quedar localizada dentro del Macizo de Palma Sola [19], [17] [6], la región de Las Minas, según el estado del conocimiento actual, quedaría ubicada dentro de la Provincia Alcalina del Oriente de México, para la cual se han desarrollado numerosos y notables trabajos de investigación [5], [25], [20], [1], [28], [22]. Al tratarse de una zona poco explorada y conocida en términos geológicos y depósitos minerales, la zona de Las Minas puede representar un área clave para el mejor entendimiento y conocimiento de la evolución geológica de la porción oriental de México. Los estudios de geoquímica practicados a las muestras colectadas en la zona de Las Minas, reportaron un carácter calciocalino propio de una margen de tipo convergente; asimismo, el ambiente tectónico resultante de las rocas graníticas estudiadas, muestran claramente un carácter de “granito de arco volcánico” propio igualmente de márgenes convergentes. Es bien conocida la relación que existe entre el magmatismo de arco y zonas de subducción [24], [13] relación que llega a ser bastante común a nivel mundial. Por otra parte, la metalogenia asociada a la mineralización de Las Minas presenta mayor afinidad con sistemas magmático-hidrotermales profundos que inician justamente con la formación del skarn derivado de las intrusiones post-Laramílicas sobre las secuencias calcáreas Cretácicas, en ese sentido, y de manera concluyente, las características petrológicas de los intrusivos estudiados presentan una típica diferenciación magmática, desde gabros hasta rocas graníticas, que dieron lugar a la existencia de mineralización de magnetita-bornita-calcopirita con valores de Au, asociada al skarn, petrológicamente definido, con mineralización metálica de tipo IOCG.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean hacer patente su agradecimiento a las empresas Source Exploration, Corp. por permitir el acceso a los sitios de barrenación, a los núcleos de perforación uso de resultados relevantes de la exploración que realiza; de igual manera a Geoconsulting Ingenieros, S.C por el financiamiento de las campañas de campo y por permitir el uso de su laboratorio de petrografía, así como dar acceso y uso de la información geológica y cartográfica que ha generado en el Distrito Minero. Se agradece encomiablemente a las autoridades del cabildo de Las Minas, en particular a la Sra. Isidra Rangel Hernández, Presidenta Municipal, a la familia Rangel por todo el apoyo brindado en las campañas de campo. Al Güero Gil (QEPD) por ser el guía oficial en las prospecciones realizadas. Se agradece de igual forma al Dr. Eduardo González Partida del Investigador titular del Centro de Geociencias de la UNAM, por el financiamiento y trabajo realizado en la geoquímica de elementos mayores y traza que fueron parte del sustento de la tesis profesional de una de los autores del presente manuscrito. Por último, a toda la comunidad de Las Minas, por siempre recibir con los brazos abiertos a los visitantes de su comunidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Aranda-Gómez, J.J., Luhr, J.F., Housh, T.B., Valdez-Moreno, G., Chávez-Cabello, G.: El volcanismo tipo intraplaca del Cenozoico tardío en el centro y norte de México, 2005, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana: Volumen Conmemorativo del Centenario., LVII(3), pp. 225-187.
- [2]. Castro-Mora, J., Hernández-Pérez, I., Vélez-López, J., Baca-Carreón, J.C.: Monografía Geológico-Minera del estado de Veracruz: Pachuca, Hidalgo, Consejo de Recursos Minerales, 1994.
- [3]. Castro-Mora, J.: Technical report of the field examinations in Las Minas, Veracruz: prepared for Source Exploration, Corp., Geoconsulting Ingenieros, S.C. 2010, 15p.
- [4]. Cerca, M., Ferrari, L., Bonini, M., Corti, G., Manetti P.: The role of crustal heterogeneity in controlling vertical coupling during Laramide shortening and the development of the Caribbean-North America transform boundary in southern Mexico: insights from analogue models, en Grocott, J., Taylor G., Tikoff, B., eds., Vertical coupling and decoupling in the Lithosphere., 2004, Geological Society, Special Publication 227, pp. 140-117.
- [5]. Corriveau, L., and Mumin, H.: Exploring for Iron Oxide Copper-Gold (Ag-BiCo-U) Deposits., 2010, Examples from Canadá and Global Analogues. Short Course Notes, vol. 20, Canada: Geological Association of Canadá, 185 p.
- [6]. Cruz-Huicochea R., Verma S.P.: New critical values for F and their use in the ANOVA and Fisher's F tests for evaluating geochemical reference material granite G-2 from USA and igneous rocks from the Eastern Alkaline Province of México. *J Iberian Geology*, 2013, vol. 39, pp. 30-13.
- [7]. Damon, P.E., Shafiqullah, M., and Clark, K.F.: Age trends of igneous activity in relation to metallogenesis in the southern Cordillera: in Relations of tectonics to ore deposits in the southern Cordillera, Arizona Geol. Soc. Digest, 1981, vol. 14, pp. 153-137.



- [8]. Dorantes–Castro, C.G.: Características Petrológicas y Geoquímicas de los Intrusivos Relacionados a la Mineralización y Paragénesis del Skarn tipo IOCG en la Zona Minera de Las Minas, Estado de Veracruz, Instituto Politécnico Nacional, Tesis de Licenciatura, 2016, 120 p.
- [9]. Einaudi M.T., Meinert L.D., and Newberry R.J.: Skarn deposits, 1981, *Econ. Geol.*, 75th anniversary volume, pp. 391-317.
- [10]. Einaudi, M. T.: Description of Skarns associated with porphyry copper plutons, *Advances in geology of the porphyry coppers deposits*, Tucson, south western north America, university of Arizona Press, 1982, pp. 184-139.
- [11]. Groves D. I. P., Bierlein F. P, Meinert L. D, and Hitzman M. W.: Iron oxide copper–gold (IOCG) deposits through Earth history; implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits, 201, *Economic Geology* 105, pp. 654-641.
- [12]. Gutiérrez, A.E.: Estudio Metalogenético del Yacimiento de Guaynopa Municipio de Madera Chihuahua: hacia una tipología del yacimiento del espécimen óxido de hierro, cobre y oro (IOCG), Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en ciencias de la tierra, Centro de Geociencias, 2015, 105 pp.
- [13]. Hedenquist, J.W. and Lowenstern, J.B.: The role of magmas in the formation of hydrothermal ore-deposits. *Nature*, v. 370, p. 519-527
- [14]. Hitzman, M. W., Oreskes, N., & Einaudi, M. T.: Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits, 1992, *Precambrian Research* 58, pp. 287-241.
- [15]. Lentz, D.R.: Petrogenetic and Geodynamic Implications of Extensional Regimes in the Phanerozoic Subduction Zones and their Relationship to VMS-forming Systems, 1998, *Ore Geology Reviews* 12, pp. 327-289.
- [16]. Marschik R, Fontbote L.: Copper (-iron) mineralization and superposition of alteration events in the Punta del Cobre Belt, Northern Chile:in Camus E, Sillitoe R H, Peterson R (Eds), *Andean Copper Deposits*, 1996. *New Discoveries, Mineralisation, Styles and Metallogeny Soc. Econ. Geol. Spec Pub no. 5* pp. 190-171.
- [17]. Mumin A. H., Somarin A. K., Jones B., Corriveau L., Ootes L., and Camier. J.: The IOCG-Porphyry-Epithermal Continuum of Deposits Types in the Great Bear Magmatic Zone, Northwest Territories, 2010, Canada. *Short Course Notes*, vol. 20.
- [18]. Ordoñez, A.: Las barrancas de las Minas y de Tatatila (México), 1904, *Soc. Geol. Mex, Boletín* 1, pp. 133-119.
- [19]. Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldán-Quintana, J., Aranda Gómez, J. J., Morán-Zenteno, D. J., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto Samaniego, Á. F.: Carta geológica de la República Mexicana, quinta edición escala 1:2.000,000: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales, 1992.
- [20]. Pearce, J. A., Harris, N. W. & Tindle, A. G.: Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks, 1984, *Journal of Petrology* 25, pp. 983-956.
- [21]. Pollard, P. J.: An intrusion-related origin for Cu–Au mineralization in iron oxide– copper–gold (IOCG) provinces, 2006, *Mineralium Deposita* 41, pp.187-179.

- [22]. Ramirez-Fernandez., J.A., Keller J. and Hubberten, H.W.: Relación genética entre las carbonatitas y las rocas nefeliniticas del complejo Picacho, Sierra de Tamaulipas, NE de México, 2000, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 7, no, 1, pp. 55-45.
- [23]. Salinas-Rodríguez, J.M., Lenus-Buston, O.: Carta geológica Minera y Geoquímica perote, E14-B26, escala 1:50,000, estado de Veracruz Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano, informe técnico, 2007, 156 pp.
- [24]. Sillitoe. R.H.: Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region: Australian Journal of Earth Science, 1997, v.44, p. 373-388
- [25]. Sillitoe, R.H.: Iron oxide-copper-gold deposits: And Andean view, 2003, Mineralium Deposita 38, pp. 812-877
- [26]. Streckeisen, A. L.: Classification and nomenclature of igneous rocks, 1967, Neues jahrbuch fur mineralogy 07, pp. 240-114.
- [27]. Tritlla, J., Camprubi, A., García, C., et. al.: Estructura y Edad del depósito equivalente de Peña Colorado (Colima) un posible equivalente fanerozoico de los depósitos de tipo IOCG, 2003, Revista mexicana de Ciencias Geológicas V, 20, núm. 3, pp. 201-182.
- [28]. Viera-Décida, F., Ramírez-Fernández, J.A., Velasco-Tapia, F. & Orozco-Esquivel, M.T.: Relaciones petrogenéticas del magmatismo en la Provincia Alcalina Oriental Mexicana, Ciencia, UANL, 2009, Vol. XII, No. 1, p. 49-42.
- [29]. Williams, P. J., Barton, M. D., Johnson, D. A., et. al.: Iron Oxide Copper- Gold Deposits: Geology, Space Time Distribution, and Possible Modes of Origin. Society of Economic Geologists, 2005, Inc. Economic Geology 100th Anniversary Volume, pp. 399-371.

### III.4-APLICACIÓN DE UNA PRAXIS DE INVESTIGACIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DE LA TERMODINÁMICA EN LA GEOLOGÍA

I.G. Meza-Pardo <sup>a\*</sup>, G.A. Ramos-García<sup>a</sup>, H.A. Guerrero-Vidal<sup>b</sup> y J.A. Cobos-Murcia<sup>a,b\*</sup>

<sup>a</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Carr. Pachuca-Tulancingo km 4.5 s/n, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

<sup>b</sup>Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Depto. de Cátedras, Av. Insurgentes Sur 1582, Col. Crédito constructor, Deleg. Benito Juárez, Ciudad de México, CP 03940, México.

\* Autor de correspondencia: [catseven78@gmail.com](mailto:catseven78@gmail.com)

#### RESUMEN

El presente trabajo muestra dos casos de estudio en los cuales se aplicó una praxis pedagógica, la cual fue realizada simultáneamente a la clase tradicional de Termodinámica. Consiste en realizar un proyecto de investigación, el cual fue elegido por los propios alumnos que cursan la materia de termodinámica en la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental de la UAEH, considerando la afinidad de la temática a su futuro ámbito profesional y con la dirección de parte del profesor. Con ello se mejora la interpretación de procesos geológicos y se logra que el alumno desarrolle empatía con la temática y su conexión con el ámbito de aplicación, obteniendo un aprendizaje grupal e individual, favoreciendo la construcción de conocimientos experimentales, no solo teóricos sino también prácticos. Mediante la simulación con programas computacionales de los casos de estudio, con los que obtuvieron características y propiedades termodinámicas de sus sistemas, generando un análisis de los datos generados y con lo que les permite establecer un dictamen, conclusión y solución a problemas que se puedan presentar en dichas aplicaciones termodinámicas.

**Palabras clave:** Enseñanza, Aprendizaje, Praxis, Termodinámica, Geología.

#### ABSTRACT

This paper presents two case studies in which a pedagogical praxis was applied, which was conducted simultaneously with the traditional class of Thermodynamics. It is to conduct a research project, which was elected by the students enrolled in the field of thermodynamics in the Bachelor of Engineering in Environmental Geology UAEH, considering the affinity of the issue to their future professional field and the direction of the teacher. This interpretation of geological processes is improved and achieved that students develop empathy with the theme and its connection with the scope, obtaining a group and individual learning, promoting the construction of experimental knowledge, not only theoretical but also practical. By simulating with computer programs, case studies, with which they obtained characteristics and thermodynamic properties of systems, generating an analysis of the data generated and allowing them to establish an opinion, conclusion and solution to problems that can be presented in these thermodynamic applications.

**Keywords:** Teaching, Learning, Praxis, Thermodynamics, Geology.

## 1. INTRODUCCIÓN

Existen temas considerados por los propios alumnos como complejos, por pertenecer a ciencias como la Matemática, Química o Física, dando pauta a que el alumno desarrolle apatía a la temática y generando dificultad en la enseñanza-aprendizaje, lo que provoca dificultad en la interpretación y correlación en el ámbito a desarrollarse de materias tan importantes [1]. La teoría del aprendizaje enunciada por Piaget, apoya el análisis del conocimiento dentro del ámbito experimental, creando así una praxis pedagógica la cual permita al docente efectuar el proceso de enseñanza-aprendizaje de manera que optimice el desarrollo cognitivo del alumno [2]. Es por eso, que ha surgido la necesidad de utilizar diferentes medios que atraigan la atención del alumno, tales como incorporar las TIC's como herramienta de estudio y en específico programas computacionales tales como TermoGraf, HSC Chemistry, Avogadro, Mathematic, entre otros. Que permiten formar un aprendizaje consolidado, evitando la falta de concordancia, y logrando la eficiencia en el entendimiento de la información adquirida. [3] Dada esta problemática se ha implementado en el aula de clases otras propuestas didácticas, como la utilización de programas computacionales, como apoyo en la adquisición de competencias básicas que el alumno necesita desarrollar para su buen desempeño en el ambiente laboral, obteniendo resultados e interpretación de los sistemas termodinámicos estudiados en la geología y que ayuden a resolver problemáticas aplicando conocimientos adquiridos durante la clase. En este trabajo se muestran dos casos de estudio termodinámicos aplicados a la geología; el primero en la interpretación del desarrollo de los depósitos supérgenos de oro (Au) en las zonas de oxidación en yacimientos de oro [4], como resultado del proceso sucede la migración de Au y por remoción de la ganga soluble y los sulfuros. Evidenciándolo mediante la evaluación de la energía molecular de cada especie química que pudiera formarse bajo las condiciones del estudio. El segundo caso de estudio se realizó el estudio de procesos mineralógicos que suceden durante el calentamiento del mineral ortosa y su posterior cambio de fase a Leucita considerando un proceso a presión constante y construyendo diagramas que ayudan a la interpretación. [7]

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

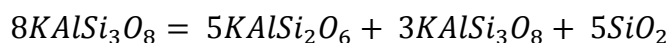
### 2.1. Primer caso de estudio

En este primer caso de estudio se analizó la interacción que presenta el oro nativo, aunque relativamente inerte puede presentarse en muchos depósitos de sulfuros y otras sulfosales, zonas oxidadas esencialmente en la misma condición de la mena primaria, pero en ciertas condiciones puede disolver el Au y formar complejos iónicos. Por otro lado, la energía molecular de los minerales que pueden formarse bajo estas condiciones, es una función de estado que solo depende de la composición química y por lo tanto es posible determinar cuáles serían las especies químicas favorecidas termodinámicamente en el ambiente químico presente. A partir del Au supérgeno que puede cristalizar a minerales hipógenos en este tipo de yacimientos que pueden ser generados; Oro nativo (Au), Aurostibnita ( $\text{AuSb}_2$ ), Fischerita ( $\text{Ag}_3\text{AuSe}_2$ ), Electrum (AuAg), y Aurocúprico ( $\text{AuCu}_3$ ) [5] Para analizar la energía molecular de cada mineral se utilizó el programa computacional Avogadro, con el que se realiza el diseño de las moléculas, se optimiza la geometría y se calculó la energía molecular empleando el campo de fuerza UFF.

### 2.2. Segundo caso de estudio

En el segundo caso de estudio se realizó el estudio de las propiedades termodinámicas de la Ortosa y la Leucita, tales como entalpía de formación ( $\Delta H_f$ ) y Capacidad Calorífica ( $C_p$ ). [4] Para analizar el cambio de fases entre la Ortosa a Leucita se consideró el equilibrio químico (Figura 1) entre las

especies químicas que están involucradas en el cambio de fase, y se obtuvieron los valores de las propiedades termodinámicas Energía Libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) y la Constante de Equilibrio (K). Para la obtención de estos parámetros termodinámicos se utilizó el programa computacional de HSC Chemistry version 5.11. Con los datos obtenidos se construyó un diagrama de calentamiento y cambio de fase utilizando el programa computacional Microsoft Excel 2016 [6].




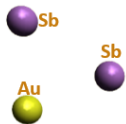
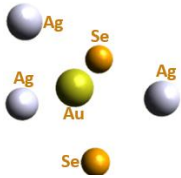
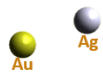
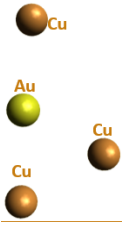
Ortosa                      Leucita                      Mezcla fundida

**Figura 1.** Equilibrio químico del cambio de fase entre Ortosa y Leucita.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran los resultados del diseño, optimización de geometría y cálculo de energía molecular de cada mineral. Con ello le es posible al alumno identificar que la Fischerita es el mineral con menor energía molecular con 4.944 kJ/mol, en comparación con los otros minerales lo que puede correlacionarse con la mayor abundancia de estos depósitos de minerales asociados al Au.

**Tabla 1.** Diseño de moléculas del programa Avogadro, con su descripción.

Estructura	Nombre	Energía
	Au Nativo	0 kJ/mol
	Aurostibnita	-2.98779 kJ/mol
	Fischerita	-4.94365 kJ/mol
	Electrum	-0.156879 kJ/mol
	Aurocúprico	-0.199362 kJ/mol

En la Tabla 2 se muestran los resultados de  $C_p$  de la Ortosa entre 100 y 250°C, así como la  $\Delta H_{reacción}$ ,  $\Delta S_{reacción}$  y  $\Delta G_{reacción}$ , que se calcularon utilizando el programa HSC Chemistry a partir de estos resultados el alumno debió tratar y analizar los datos para el estudio del sistema de su interés.

Para determinar el calor para el calentamiento de la Ortocita ( $Q_c$ ) se determina por regresión cuadrática la ecuación;  $C_p = -0.0007T^2 + 0.5206T + 201.76$  (1) a partir del análisis de la variabilidad de la capacidad calorífica en función de la temperatura (Tabla 2) y de acuerdo a la definición de calor  $dQ_c = C_p dT$  (2), se puede obtener  $dQ_c = (-0.0007 T^2 + 0.5206T + 201.76)d$  (3).

**Tabla 2.** Resultados de entalpía, entropía y energía libre de Gibbs de la reacción de cambio de fase. Los resultados demuestran que el sistema gana energía, siendo un proceso termodinámico.

$T / ^\circ C$	100	125	150	175	200	225	250
$C_p / kJmol^{-1} K^{-1}$	246.1	255.4	263.3	270.0	275.9	281.0	285.5
$\Delta H_{reacción} / kJmol^{-1}$							42.320
$\Delta S_{reacción} / JK^{-1}$							- 23.409
$\Delta G_{reacción} / kJmol^{-1}$							54.567

Por otro lado, el calor de cambio de fase que corresponde a la  $\Delta H_{reacción}$ , por lo que el calor total

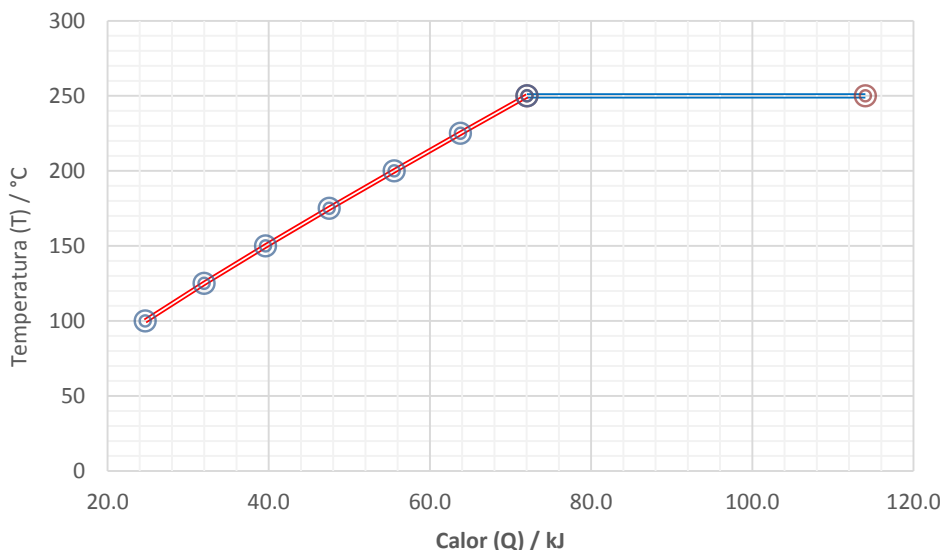
$$dQ_T = \Delta H_{reacción} + (201.76 + 0.5206T - 0.0007T^2) dT \quad (4)$$

y finalmente se obtiene el calor total  $Q_T$  de 77.653 kJmol<sup>-1</sup> utilizando la ecuación integrada (5);

$$Q = \Delta H_{reacción} - \frac{0.0007}{3} (T_2 - T_1)^3 + \frac{0.5206}{2} (T_2 - T_1)^2 + 201.76(T_2 - T_1) \quad (5)$$

En la figura 1 se muestra el diagrama de calentamiento y cambio de fase construido a partir de los datos de la Tabla 2 que fueron obtenidos mediante la ec. 5, donde el calor total del proceso representa el área debajo de la curva y que se representa matemáticamente con la ecuación integrada. Finalmente, los valores de entropía y energía libre de Gibbs, indican que la reacción no se realiza de manera espontánea y que se encuentra favorecida a la formación de la Ortosa.

Es así como se demuestra en estos dos casos de estudio que el alumno, al utilizar éste tipo de herramienta didáctica (software) puede consolidar sus conocimientos, así como darle mayor importancia a éste tipo de temática viendo la correlación que existe con el medio que se va a desempeñar terminando su carrera profesional, dando resultados eficientes dentro de su ambiente laboral.



**Figura 1.** Se muestra el cambio de fases entre la ortosa y leucita considerando a Q. En  $Q_2$  a temperatura se mantiene constante ( $250^\circ\text{C}$ ).

#### 4. CONCLUSIONES

Se determinó que utilizando diferentes técnicas de enseñanza se corrobora que el alumno puede ver desarrollado su conocimiento dentro del ámbito experimental, logrando así que haya afinidad entre la temática denominada compleja y el alumno, como se puede observar en los casos de estudio los alumnos pudieron llegar a una conclusión satisfactoria que de acuerdo a la literatura preexistente [8], es concordante con resultados previos, provocando la formación de un conocimiento más sólido, de tal manera que cuando salgan al ambiente laboral sus conocimientos les sean útiles para la resolución de problemas en su ámbito de desarrollo.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores IGMP, GARG y HAGV agradecen a la UAEH por los estudios de posgrado y por sus estudios de licenciatura respectivamente y JACM agradece a Conacyt, por el programa de Cátedras Conacyt.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pozo, J.A. et al. (1991). Las ideas de los alumnos sobre la ciencia: una interpretación desde la psicología cognitiva. Enseñanza de las Ciencias, 9(1), pp. 83-94.
- [2] Wilson A.F., (1984), Origin of quartzfree gold nuggets and supergene gold found in laterites and soils — a review and some new observations, Australian Journal of Earth Sciences, Volume 31, Issue 3, pp. 303 – 316.
- [3] Pozo, J.A. et al. (1991). Las ideas de los alumnos sobre la ciencia: una interpretación desde la psicología cognitiva. Enseñanza de las Ciencias, 9(1), pp. 83-94.
- [4] A. Dongo: revista IIPSI, 2008, vol. 11, 167-181 pp.

- [5] Toselli, A., (2009), Elementos básicos de petrología ígnea: San Miguel de Tucumán, Mineralogical Society of America, 270 pp.
- [6] Best, M., (2003), Igneous and Metamorphic Petrology: Oxford, Blackwell Publishing, 758 pp.
- [7] Price, M., Walsh, K., (2005), Pocket Nature Rocks and Minerals: Great Britain, Dorling Kindersley, 224 pp.
- [8] Klein, C. (1993). Minerals and Rocks. John Wiley and Sons, New York.



### III.5-GEOLOGÍA DEL SISTEMA DE VETAS POLIMETÁLICAS DEL DISTRITO MINERO TAVICHE, ESTADO DE OAXACA

Jesús Castro-Mora<sup>a\*</sup>, J.C. Escamilla-Casas<sup>a</sup>, L. E. Ortiz-Hernández<sup>b</sup>, E. Cruz-Chávez<sup>c</sup>, Dorantes-Castro, C.G.<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
jocesca@uaeh.edu.mx

<sup>b</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
leoh44@hotmail.com

<sup>c</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
kius\_ec@yahoo.es

<sup>d</sup> Instituto Politécnico Nacional, IPN, ESIA Ticomán, tesista de licenciatura  
ing\_geologa-ipn@hotmail.com

\* Autor de correspondencia: [jesus\\_castro11293@uaeh.edu.mx](mailto:jesus_castro11293@uaeh.edu.mx)

#### RESUMEN

El Distrito Minero Taviche (DMT) se localiza en la porción central del estado de Oaxaca, en la región de los Valles Centrales, su historia se remonta a la época de la colonia, destacándose por su producción de oro. Geológicamente la zona de estudio presenta un predominio de rocas volcánicas y subvolcánicas, de composición félsica y afinidad calcialcalina de edad Terciaria, que hospedan un sistema de vetas polimetálicas de sulfuración baja-intermedia, las cuales atraviesan una columna estratigráfica representada por un basamento metamórfico de edad Grenvilliana, cubierto por una secuencia sedimentaria de edad Mesozoica. Las vetas estudiadas presentan mineralización económica de oro-plata, con contenidos de alta ley de metales base, cuya roca encajonante corresponde a un pórfido de composición ácida, el cual tiene la particularidad de presentar mineralización diseminada de sulfuros de cobre-molibdeno en contenidos considerados anómalos, por localizarse en la parte apical del mismo. Las características texturales observadas en los principales sistemas de vetas, de rumbo dominante NW-SE, en combinación con las paragénesis metálicas definidas, permiten establecer la posibilidad de un proceso de telescopio en la evolución y emplazamiento de estas vetas mineralizadas.

**Palabras Clave:** Taviche, Subvolcánicas, Sulfuración, Grenvilliana, Telescopio

#### ABSTRACT

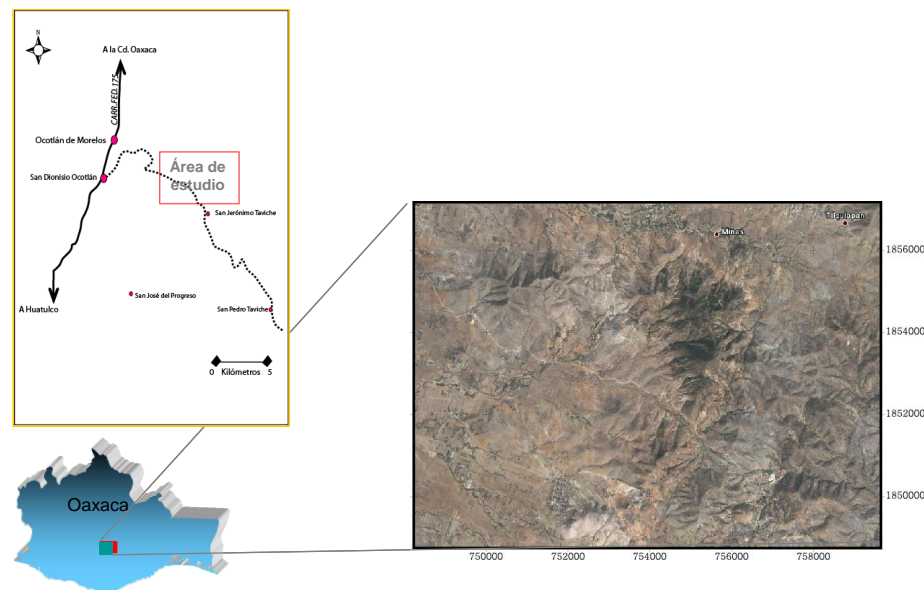
The Taviche Mining District (TMD) is located in central Oaxaca, on the Central Valleys Region. The story of the mining district begins during colonial times due to its gold production. The geological framework of the studied area presents a prominent exposure of volcanic and subvolcanic rocks, mostly felsic and calck-alkaline affinity of Tertiary age, that host a polymetallic of low-intermediate sulfidation vein system that cross a stratigraphic column represented by a metamorphic basement of Grenvillian age covered by a Mesozoic sedimentary sequence. The vein studied holds economic gold-silver mineralization with high grade base metals contends, hosted on a felsic porphyry that is the wall

rock of the vein structures; the porphyry also presents disseminated copper-molly sulfides. Textural characteristics observed on the main vein systems, with dominant NW-SE strike direction, in combination with the metallic paragenetic associations, could establish the possibility of a telescoping process on the evolution and emplacement of the mineralized veins.

**Key words:** Taviche, Subvolcanics, Sulditation, Grenvillian, Telescoping

## 1. INTRODUCCIÓN

México posee una gran tradición minera, desde tiempos precolombinos ya se extraían metales para la fabricación de objetos artesanales [1]. Durante la época de la colonia, los españoles desarrollaron una importante actividad minera mediante la explotación de las vetas de plata y oro que se conocían en lo que hoy son grandes distritos mineros, como es el caso de Pachuca, Guanajuato, Zacatecas, Durango, por citar los de mayor relevancia. La exploración minera en México ha estado dirigida a yacimientos que se presentan justamente en estructuras en forma de vetas. El área de estudio se localiza, a 32 km al sureste de la Ciudad de Oaxaca de Juárez, jurisdicción del Distrito Político de Ocotlán de Morelos (figura 1).



**Figura 1.** Mapa de Localización del DMT, estado de Oaxaca [2].

El Distrito Minero de Taviche (DMT) alberga sistemas de vetas polimetálicas que tienen un corrimiento preferencial en dirección NW-SE. Las vetas que existen se alojan en rocas porfídicas de composición félsica y edad Terciaria; se caracterizan por presentar longitudes de varios kilómetros, espesores que van desde medio metro, hasta 50 metros y profundidades que sobrepasan los 300m [2]. El presente estudio forma parte de una investigación doctoral [4], y pretende mostrar la importancia de las vetas y su contexto geológico regional.

## 1.1 Antecedentes

El DMT, es conocido por sus vetas de oro y plata; la mayoría de las minas datan de la época de la Conquista; sin embargo, su explotación más importante data de finales de los años 1800's y principios de los años 1900's. La explotación reciente de las minas de este Distrito se realizó durante los años 1960 a 1962, con actividad esporádica en los años 1980-1990 cuando la zona formaba parte de la entonces conocida como Zona de Reserva Minera Nacional Taviche establecida por el entonces Consejo de Recursos Minerales [5]. Actualmente, existe una mina en producción en la localidad de San José, municipio de Ocotlán de Morelos; esta mina es operada por Minera Cuzcatlán, que es subsidiaria de la empresa canadiense Fortuna Silver Mines. Diversas compañías mineras, principalmente canadienses, realizan intensas campañas de exploración en la zona, incluyendo barrenación a diamante para evaluar la continuidad y contenidos metálicos de las vetas y roca encajonante a profundidad. La información geológica y aquella referente a las antiguas minas del DMT se localiza en los archivos del Servicio Geológico Mexicano, que desarrolló la carta geológica Santa María Zoquitlán [9]. La mayor parte de esta información es inédita, una buena síntesis puede ser consultada en la Monografía Geológico-Minera del estado de Oaxaca [5].

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

Para la realización del presente estudio se llevó a cabo la metodología que se enlista a continuación:

- Cartografía geológico-estructural a escala de semidetalle (1:10,000) y detalle (1:2,500), con apoyo de un sistema de información geográfica (ArcMap, 10).
- Muestreo de las unidades ígneas para análisis geoquímico de elementos mayores, así como para la elaboración de láminas delgadas y su correspondiente estudio petrográfico.
- Muestreo de esquirlas de roca para análisis geoquímicos en superficie, interior mina
- Toma de muestras de mineral de mena y obtención de superficies pulidas para análisis mineragráficos
- Toma de datos estructurales para definir los principales sistemas de fracturas y fallas.

Los estudios petrográficos y mineragráficos, fueron realizados en el laboratorio de Petrografía del Instituto de Geofísica de la UNAM, con un microscopio Zeiz Axioplan Imaging 2, la toma de fotomicrografías se realizó con la ayuda del *software* Image Focus, instalado en la computadora del laboratorio.

Los análisis geoquímicos incluyeron 35 elementos, éstos se realizaron en los laboratorios de *Als Chemex* en Vancouver, Canadá, así como también los análisis de elementos mayores y tierras raras, los cuales se graficaron con la ayuda del *software* IGPED.

### 2.1 Marco Geológico

Regionalmente el DMT se localiza dentro de la Provincia Geológica Zapoteca [14], la cual presenta como rocas basales una serie de rocas metamórficas de alto grado que se encuentran cubiertas por una secuencia compleja de rocas pre-Terciarias, que incluyen depósitos terrígenos de edad Jurásica, secuencias carbonatadas que van del Jurásico al Cretácico Superior, así como secuencias Cenozoicas muy variadas de ambiente continental. Parte fundamental del presente trabajo de investigación fue obtener el mapa geológico del área (figura 2), En lo que se refiere a la zona del DMT, se cuenta con pocos estudios geológicos acerca de la región, algunos son de carácter netamente cartográfico [9] y otros más enfocados a la caracterización isotópica y geoquímica de las rocas volcánicas a una escala regional [10]; otras investigaciones clásicas, a mayor escala, hacen referencia a la evolución tectónica

de este sector del sur de México [12] [13]. Las rocas ígneas Terciarias expuestas en el sur de México, han sido estudiadas a nivel de provincia magmática, para este caso, se cuenta con algunos datos geocronológicos y geoquímicos en diversas localidades aledañas a la zona de estudio [11].

Estratigráficamente, la suite de rocas ígneas, presenta como unidad más antigua a un *stock* granítico holocristalino (Ti) que muestra evidencias de una deformación incipiente, misma que podría estar vinculada a una actividad magmática sinorogénica y contemporánea con la orogenia Laramide, con lo cual su edad tentativa podría estar referida al Paleoceno-Eoceno [7].

Las rocas graníticas, se encuentran intrusionadas por rocas subvolcánicas (Tsp) de afinidad riodacítica (pórpidos), que llegan a desarrollar diques de composición aplítica que tienen relación cortante con los granitos.

Como cobertura del pórfido y de los granitos, existe una secuencia de rocas piroclásticas, representadas de la base a la cima por una unidad vulcanoclástica continental, compuesta por fragmentos de andesita aglutinados por una matriz tobácea (Tivc) de composición andesítica, sobre la cual se encuentra una unidad de tobas compactas de composición ácida a intermedia (unidades Tvi, Tva), las cuales a su vez están cubiertas por *lapillis* (Tst) con horizontes de ceniza y depósitos de caída libre (*ash flow air fall*), mismas que son cubiertas, de manera discordante por lavas de composición andesítico-basáltica y brechas volcánicas (Tsv), cuyos fragmentos se observan fuertemente cementados por sílice. Tal secuencia podría correlacionarse parcialmente con algunos miembros de la Formación Suchilquitongo [8], que aflora principalmente en la parte norte de los Valles Centrales de Oaxaca. Como unidad volcánica más reciente, se tiene la presencia de afloramientos restringidos de coladas basálticas (Qba) que cubren de manera discordante a toda la secuencia descrita, tales rocas están expuestas en las partes topográficamente más elevadas y, debido a su posición estratigráfica, se les asigna una edad probable Pliocénica (figura 3).

Se distinguen, de manera general, dos sistemas de falla, uno de tipo normal y otro de tipo lateral; tales sistemas estructurales tienen consecuencias importantes, ya sea como controles del depósito o emplazamiento de la mineralización, o bien como agentes que rompen o dislocan los cuerpos mineralizados (tabla 1). La estructura más prominente es la que en este trabajo se define como falla Yabeló [2], la cual corresponde a una falla de tipo normal de rumbo NE-SW con una componente de tipo lateral; la importancia de esta estructura radica en que disloca a los sistemas de vetas originales (definidas en el presente estudio como San Jorge y Chicharra), propiciando que actualmente se encuentren expuestos, tanto en el sector San Jorge (SE), como en el sector Chicharra (NW).

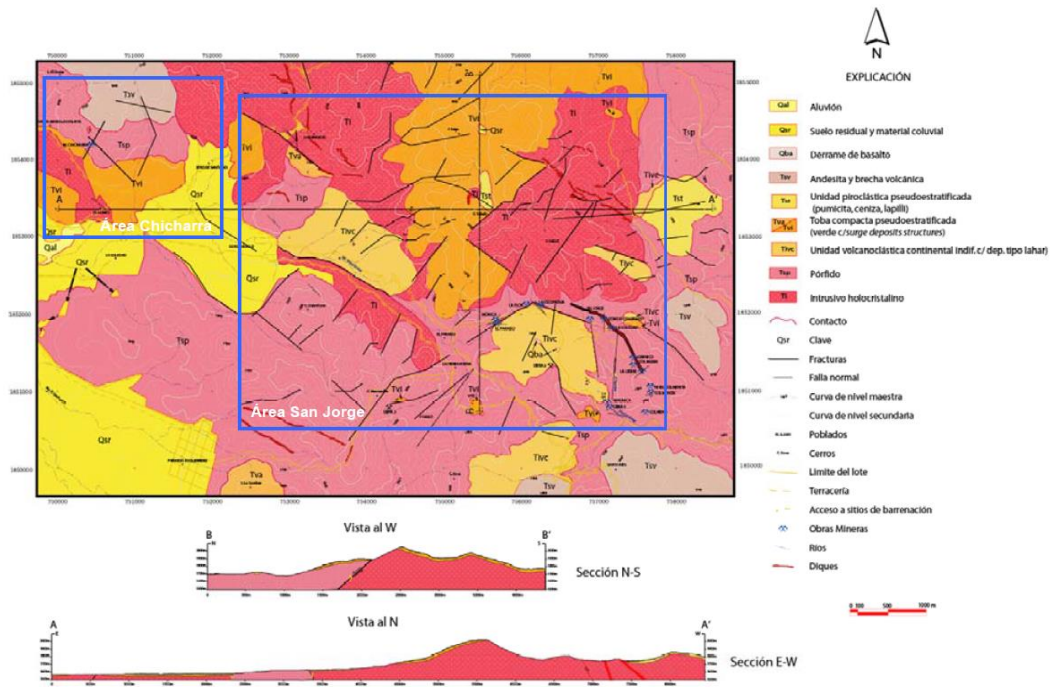


Figura 2. Mapa geológico del Distrito Minero Taviche (modificado de [3])

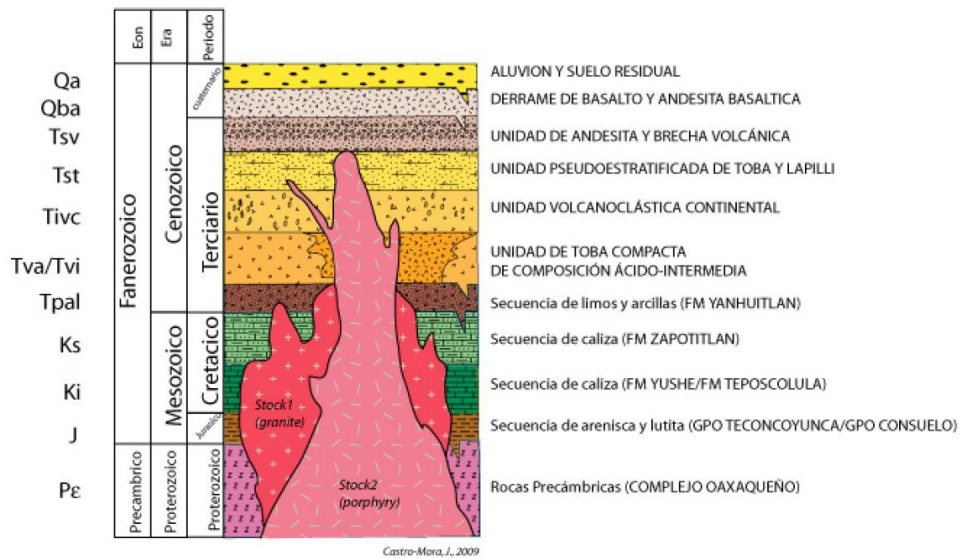


Figura 3. Columna estratigráfica del Distrito Minero Taviche, estado de Oaxaca [3].

**Tabla 1.** Principales sistemas de falla y fractura del Distrito Minero Taviche, estado de Oaxaca.

Sistema		San Jorge	Chicharra	Yabeló	Mónica y Paraíso	Sistema lateral 1	Sistema lateral 2	Veta-Falla
Fallas	Rumbo	30°-40° NW-SE	30° NW-SE	20°-40° NE-SW	44° NE-SW	08°-25° SE-NW	60°- 65° NW-SE	40°-52° NW-SE
	Buzamiento	65°-85° SW	70°-80° SW	-----	10°-20° SE	42° NW 30°-0° pitch	60°-80° SW 30-40° pitch	32°-52° SW
Fracturas	Rumbo	N-S	85° SW°	80° NW°	E-W	-----	-----	-----
	Buzamiento	90°	75° °NW	50° SE	38° S	-----	-----	-----

## 2.2 Mineralización y Magmatismo asociado

Las vetas epitermales están alojadas dentro de una unidad litológica de tipo pórfido de edad Miocénica [4], cuya composición varía de riodacítica a andesítica. La mineralización que existe de Au-Ag +/- Cu presenta características de un depósito de baja sulfuración (tipo adularia-sericita) cuya mineralización se aloja en estructuras tipo veta (fotografía 1) de cuarzo en drusas (*cocks comb*) con mineralización de sulfuros; por su parte, la roca encajonante aparentemente se formó bajo condiciones de alta sulfuración (tipo ácido-sulfato), ya que los sulfuros que presenta se encuentran en forma diseminada, así como en un sistema de vetas multidireccionales de sílice tipo *stockwork* con texturas de cuarzo poroso (*vuggy*).



**Fotografía 1.** Sistema de vetas de cuarzo alojadas en estructuras silicificadas.

Los patrones de alteración hidrotermal se caracterizan por extensas áreas de alteración argílica avanzada (caolinita-alunita), sobre todo en aquellas donde está expuesto el pórfido con desarrollo de *stockwork*; mientras que la zona de vetas presenta predominantemente un patrón de alteración que varía de potásica a argílica intermedia e incluso sericítica, con horizontes de alteración caolinítica concentrada tanto al alto como al bajo de las vetas.

Las vetas del DMT presentan una dirección predominante NW 40°-70° SE con buzamientos que fluctúan entre 38° hasta 75° hacia el SW y cuyos espesores oscilan entre varios centímetros hasta mayores de 10m. La estructura más prominente (Crestón San Jorge) está expuesta por más de 2km.

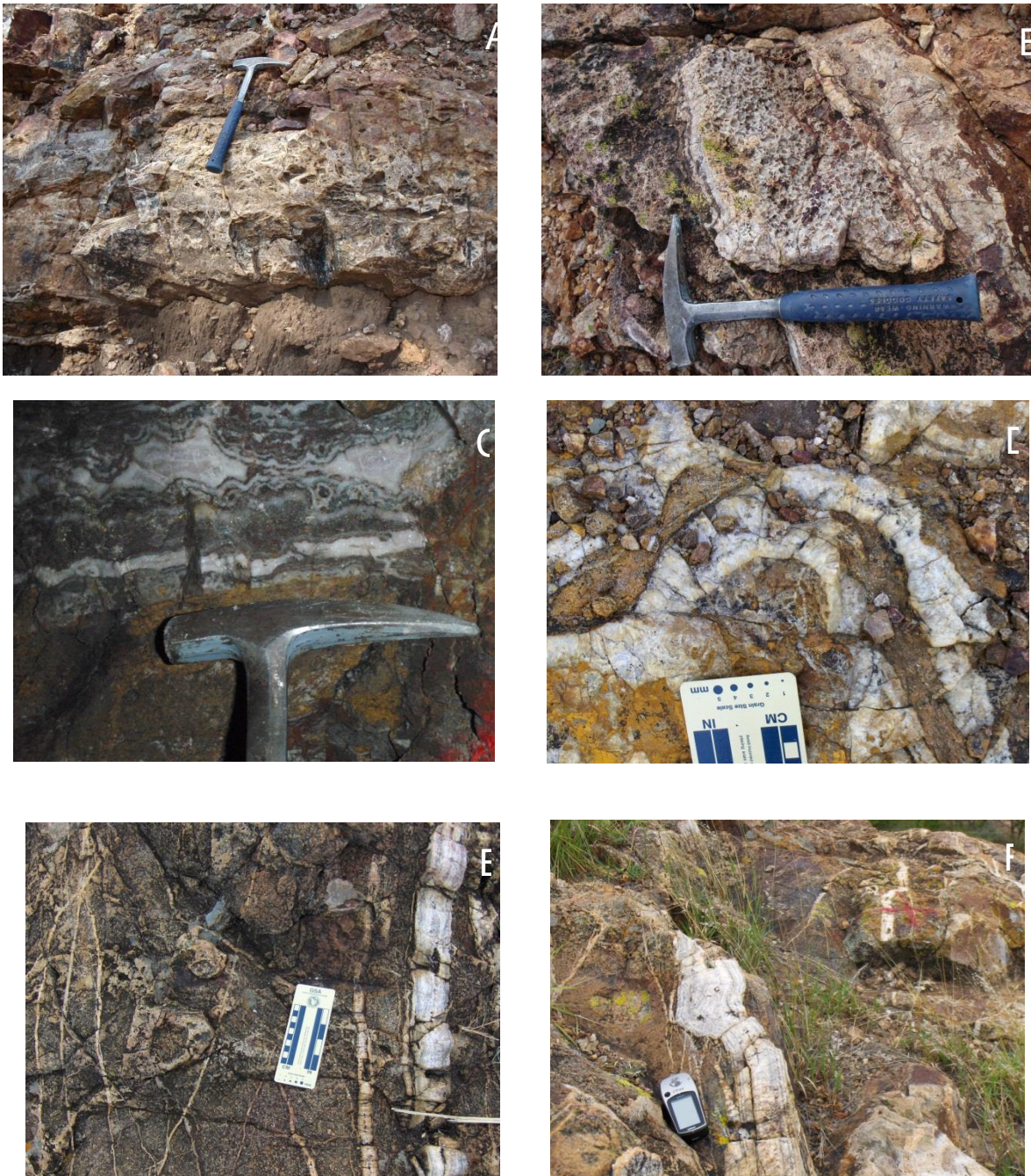
El muestreo tanto en interior mina, como en superficie realizado en esta estructura reporta valores atractivos de oro, plata, cobre, zinc y plomo para las vetas: Au: 1-10g/t; Ag: 1g/t-100g/t; Cu: 1.3-3.09%; Zn: 1.05-14.95%; Pb: 1-29.3%), y valores anómalos en superficie de estos metales para el pórfido.

Otros sistemas secundarios de vetas han sido reconocidos; uno de dirección N-S y otro NE-SW (porción central del área estudiada), este último aparentemente posterior al sistema principal y con una mineralización más rica en cobre se desarrolla sobre una de las fallas más prominentes de la zona estudiada: la falla Yabeló, misma que disloca el sistema principal de vetas de rumbo NW-SE [2].

Las texturas que comúnmente se observan en las vetas son típicas de un ambiente de baja sulfuración, las cuales incluyen zonación bandeada de sílice calcedónica, texturas crustiformes con desarrollo de cuarzo tipo *drussy* y *cocks-comb*; así como brechas hidrotermales y texturas de recristalización (figura 4) que sugieren condiciones atípicas para un ambiente de baja sulfuración que requerirá mayor trabajo de investigación. El análisis textural de estas estructuras sugiere la existencia de múltiples fases de mineralización en un ambiente hidrotermal muy activo, producto de procesos de *overlapping* o bien de *telescopeo* [4].

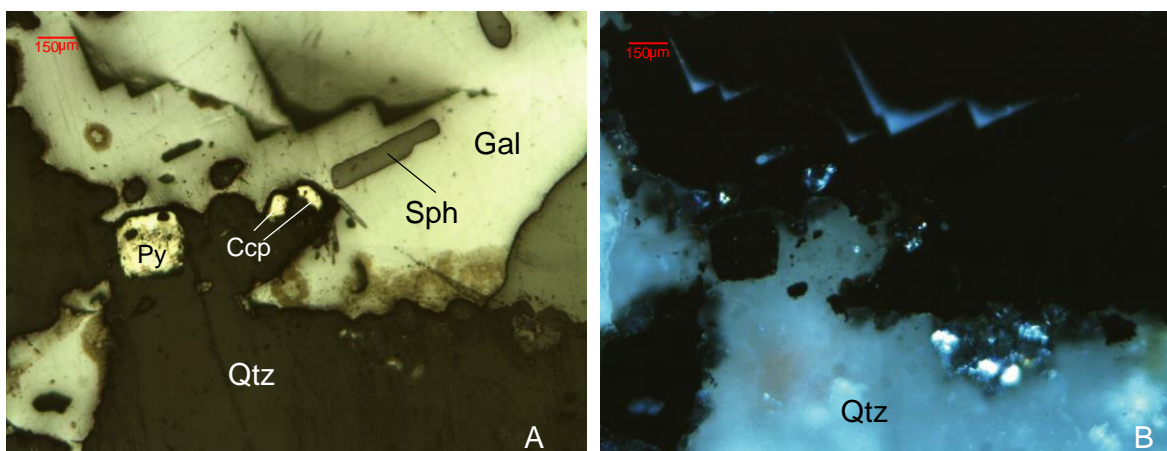
La mineralogía de las vetas del DMT es polimetálica y relativamente simple, las descripciones, tanto de ejemplar de mano, como de láminas delgadas y superficies pulidas muestran asociaciones de galena-esfalerita-calcopirita y pirita que arrojan valores de oro-plata (figura 5). La mineralogía de ganga está representada fundamentalmente por cuarzo microcristalino, que varía a cuarzo cristalino bien desarrollado.

La zonación principal que muestran estos minerales en las estructuras tipo veta es la siguiente: i). cuarzo microcristalino, sericita y pirita en los respaldos de las vetas (*hangingwall* y *footwall*); ii). Calcita y cuarzo cristalino con paragénesis de sulfuros (esfalerita-galena) contenidos en las vetas, con valores de oro y plata y, iii). Metales base contenidos en fragmentos brechados de la roca encajonante.



**Figura 4.** Obsérvese en A y B: vetas con sobreimpresión de texturas vuggy; C y D: vetas de sílice bandeada; E y F: sistemas de vetas de cuarzo tipo stockwork.





**Figura 5.** Muestra procedente de la Mina Colmena, localizada en el extremo sur del Distrito. La fotomicrografía corresponde a una vista al microscopio con luz reflejada (A) donde claramente se observa la mineralización de galena (Gal) calcopirita (ccp), esfalerita (Sph) y pirita (Py). En B: se aprecia en mismo campo pero con luz transmitida (nícoles cruzados) donde se aprecia que los metales descritos se alojan en una veta de cuarzo (Qtz).

El análisis geoquímico de las rocas plutónicas e intrusivas de ambiente somero (pórfidos), que afloran en el área de estudio, permitió conocer la serie magmática a la cual se asocian dichas rocas, obteniéndose que la totalidad de las muestras colectadas pertenecen a la serie magmática calcialcalina y, por tanto, a un ambiente tectónico de emplazamiento de arco volcánico asociado a zonas de subducción. Se colectaron cinco muestras para análisis geoquímico que incluyera elementos mayores expresados en óxidos (tabla 2); tres de ellas correspondiendo a las rocas intrusivas (granitos y pórfido), colectadas en la porción central de la zona de estudio, en el flanco NE del cerro conocido como Giavitune (754000E, 1852000N); las otras dos muestras analizadas corresponden a las coladas de lava y tobas compactas, que se localizan en el extremo SE de la zona de estudio, próximo al poblado de San Jerónimo Taviche (756200E, 1851700N).

Tabla 2: Geoquímica de elementos mayores y menores practicada a las muestras procedentes del DMT.

No CRPG	Demandeur	Ref Echantillon	Jcodel	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5		
912171	CHEILLETZ	(porfido) LP/01	1	54.05	17.03	9.70	0.17	4.05	7.04	3.70	1.51	0.95	0.28		
912172	CHEILLETZ	(granito) 6UT-1	2	68.23	14.44	3.03	0.07	1.17	2.91	3.78	4.16	0.50	0.11		
912173	CHEILLETZ	(granito) D/01	3	53.01	17.94	8.94	0.16	3.79	8.33	3.19	0.71	0.96	0.27		
912174	CHEILLETZ	(colada) TS-1	4	56.12	16.74	6.66	0.07	3.86	7.22	3.16	0.92	1.19	0.30		
912175	CHEILLETZ	(colada) TS-2	5	56.96	16.11	6.62	0.11	3.69	7.44	2.99	0.22	1.01	0.22		
Jcodel	As	Ba	Ba	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Ga	Gd
1	3.957	343.6	<L.D.	<L.D.	<L.D.	32.85	23.24	12.26	2.207	61.72	3.917	2.255	1.195	18.9	4.241
2	3.392	722.9	1.931	<L.D.	0.169	64.7	6.437	28.55	2.951	29.31	3.748	1.929	1.067	20.06	4.434
3	<L.D.	296.4	<L.D.	<L.D.	<L.D.	25.65	21.63	23.36	0.157	87.01	3.536	2.015	1.237	20.01	3.869
4	1.885	380.1	1.158	<L.D.	<L.D.	45.64	18.52	104.1	1.353	45.74	3.127	1.404	1.576	22.45	4.301
5	2.668	290.1	1.369	<L.D.	0.154	42.43	16	51.01	2.497	15.65	3.95	2.101	1.364	20.42	4.488
Jcodel	Ga	Hf	Ho	In	La	Lu	Mo	Nb	Nd	Ni	Pb	Pr	Rb	Sb	Sm
1	1.482	3.833	0.777	<L.D.	14.61	0.372	0.668	3.131	19.44	10.79	5.8127	4.474	41.31	0.563	4.529
2	1.253	6.591	0.693	<L.D.	31.23	0.288	1.385	8.673	28.98	11.87	14.7901	7.746	165.5	<L.D.	5.532
3	1.577	2.55	0.707	<L.D.	10.99	0.324	0.782	2.416	16.42	14.42	3.7796	3.62	8.761	<L.D.	4.028
4	1.413	4.336	0.538	<L.D.	20.91	0.184	1.044	7.286	25.07	36.04	7.7717	5.983	12.81	0.245	5.176
5	1.385	4.382	0.758	<L.D.	19.68	0.317	0.848	6.948	22.78	13.77	7.8429	5.48	1.931	0.757	4.927
Jcodel	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr	% TOTAL	
1	1.231	455.9	0.244	0.658	2.76	0.339	0.799	209.2	0.333	22.68	2.355	60.36	152.5	99.42	
2	2.231	325.4	0.946	0.665	17.58	0.284	4.426	56.09	1.334	20.87	1.891	70.32	238.2	99.07	
3	0.991	703.1	0.194	0.598	2.138	0.302	0.568	194.6	<L.D.	20.09	2.032	93.87	93.32	100.17	
4	1.518	605.9	0.517	0.601	3.036	0.191	0.713	143.9	<L.D.	15.25	1.231	115.3	174.7	100.14	
5	1.5	661.3	0.572	0.688	5.203	0.305	1.497	156.9	0.621	22.05	2.078	87.67	170.1	99.45	

Tabla 3: Resultados del muestro geoquímico de elementos traza realizados a las estructuras (vetas) observadas en el interior de las principales minas (abandonadas) del DMT. (tomado de [6])

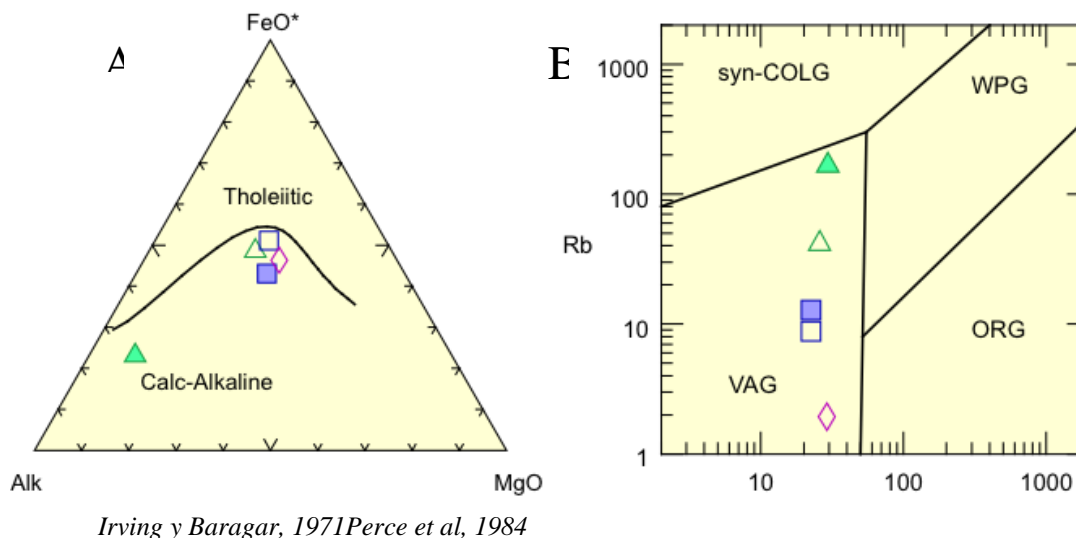
Obra Minera	Ley Media	Espesor metros	Au ppm	Ag ppm	Cu %	Pb %	Zn %
Gwinico	Media	2.03	1.72	21.58	0.04	0.77	1.00
	máxima	2.20	5.90	64.40	0.05	2.76	3.68
Colmenita	Media	1.23	0.13	16.27	0.01	0.25	0.68
	máxima	3.30	0.33	47.60	0.04	0.73	1.73
Conejo Colorado	Media	1.78	4.63	94.36	0.06	0.18	0.01
	máxima	1.30	6.92	94.40	0.03	0.08	0.00
La Liebre	Media	1.40	5.97	110.00	0.06	0.02	0.01
	máxima	1.61	1.41	84.66	0.03	0.42	0.25
Soledad	Media	1.60	3.24	258.00	0.03	1.28	0.69
	máxima	2.11	0.07	5.16	0.04	0.44	0.60
San jorge	Media	1.20	0.60	13.80	0.09	1.41	0.96
	máxima	1.80	0.08	11.00	0.09	1.05	1.88
Santa Maria	Media	2.11	1.45	40.71	0.43	3.01	0.52
	máxima	2.60	0.42	41.80	0.36	8.66	11.90
	Media	3.00	4.28	70.40	0.43	4.04	0.06
	máxima	1.70	4.66	82.13	0.03	0.32	0.33
	Media	1.60	24.50	515.00	0.03	0.48	0.63
	máxima	1.80	16.10	206.00	0.04	1.01	0.63
	Media	1.60	7.82	70.50	0.03	0.59	0.19
	máxima						

### 3. RESULTADOS

De los trabajos realizados, cartografía y muestreo se determinó que el DMT posee un gran potencial en términos de exploración de vetas a profundidad; los contenidos metálicos de las vetas que afloran y que se pueden observar en las diferentes obras mineras abandonadas, muestran valores que resultan de interés económico (tabla III).

Por su parte, el pórfido, que constituye la roca encajonante de las vetas, es una roca ampliamente expuesta en el DMT y muestra mineralización diseminada de sulfuros de cobre y hierro, lo que representaría la posibilidad de incrementar las reservas de mineral de cobre en la región.

La geoquímica reporta magmatismo calcialcalino relacionado a zonas de subducción que generan magmatismo calcialcalino de arco (figura 6).



**Figura 6.** Gráficas obtenidas que muestran claramente A: El carácter calcialcalino de las rocas colectadas, relacionado a un ambiente tectónico de margen convergente (B). Los rectángulos representan a las coladas; los triángulos a las rocas graníticas y el rombo al pórfido. Los campos son: SynCOLG: granitos sincolisionales; **VAG: granitos de arco volcánico**; WPG: Granitos intraplaca; ORG: Granitos de dorsal oceánica.

### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El hecho de que en México se haya desarrollado una actividad minera a partir de vetas polimetálicas, ricas en plata, por más de 500 años, no significa que dichos recursos estén agotándose; por el contrario, se ha observado que con frecuencia las vetas se encuentran “ligadas” a sistemas porfídicos, sobre todo de cobre-molibdeno [16] que muchas de las veces se localizan estructuralmente próximos a la superficie, a través de procesos de telescopio [17]. El DMT representa una zona que, además del interés propio de las vetas, podría tener relevancia en términos de investigación geológica.

Del presente trabajo se marcan las siguientes conclusiones:

- El trabajo realizado a la fecha prueba, razonablemente, que el DMT alberga un depósito de vetas polimetálicas de tipo epitermal, que se hospedan en rocas porfídicas de afinidad calcialcalina.
- La geoquímica de las muestras de estructuras mineralizadas prueba que existen contenidos de metales preciosos que son de interés económico, y que en algunos casos, coexisten con la presencia de

metales base, representados por asociaciones paragenéticas de esfalerita-galena-calcopirita, lo que significa que la teórica “zonación metálica” se encuentra yuxtapuesta y que tal situación se puede atribuir a un fenómeno de telescopio, o bien a cambios en las condiciones de pH de los fluidos mineralizantes, haciendo que el sistema constituya un depósito de sulfuración intermedia.

- El análisis de la geoquímica de las rocas procedentes del DMT muestra un carácter calcialcalino del magmatismo y una afinidad de emplazamiento de ambiente de arco magmático asociado a zonas de subducción, lo que no contrapone las características tectonomagmáticas de la mineralización del DMT con los ambientes pórfido-hidrotermales del cinturón de fuego del Circumpacífico [16].

De corroborarse que las vetas del DMT se hospedan en un sistema tipo pórfido de cobre-molibdeno se podría establecer una cierta continuidad de los sistemas porfídicos de Norte América con los de América del Sur, ya que aparentemente existe un “*lack*” de pórfidos en México [15], lo cual abriría grandes posibilidades para proyectos de exploración y establecería una conexión, *a priori*, con los sistemas porfídico-hidrotermales del continente Americano.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado al Instituto de Geofísica de la UNAM, al Dr. Eduardo González-Partida Investigador titular del Centro de Geociencias de la UNAM, por los análisis de geoquímica de elementos mayores, a Newstrike Capital Inc. Por todo el apoyo brindado en las campañas de campo y a toda la comunidad de San Jerónimo Taviche por su hospitalidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. J.M. Bradomin: Monografía del estado de Oaxaca, 1991, 4a ed. José Ma Bradomin, 355 p.
- [2]. J. Castro-Mora: Geología del depósito epitermal Monte Albán (Au-Ag-Cu), Distrito Minero Taviche, estado de Oaxaca, 2007, XXVII Convención Internacional de Minería, octubre 2007, Veracruz, Ver, 8 p.
- [3]. J. Castro-Mora: Metalogénesis del Depósito San Jorge-Chicharra (Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Mo), Distrito Minero Taviche, estado de Oaxaca: Magmatismo Asociado y Modelo de Emplazamiento, 2010, Proyecto de Investigación doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Inédito.
- [4]. J. Castro-Mora: Metalogénesis del Depósito San Jorge-Chicharra (Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Mo), Distrito Minero Taviche, estado de Oaxaca: Magmatismo Asociado y Modelo de Emplazamiento, 2012, Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, en proceso.
- [5]. J. Castro-Mora y F. Arceo y Cabrilla: Monografía Geológico-Minera del estado de Oaxaca, 1996, Consejo de Recursos Minerales, SECOFI, ISBN 968-6710-68-X, 280 p.
- [6]. J. Castro-Mora, y G. Kearvell: Exploration activity Report Monte Alban Property, Oaxaca state, Mexico, 2008, Prepared for Aurea Mining Inc. 49 p. (inedito).
- [7]. P.E. Damon, M. Shafiqullah, K. F. Clark: Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis, 1981, Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología; vol 5 num. 2, pp. 238-223.
- [8]. I. Ferrusquía-Villafranca: Estudios geológico-paleontológicos en la región Mixteca; parte 1: Geología del área Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlán, Mixteca Alta, estado de Oaxaca,

- México, 1976, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 97, 153 p.
- [9]. J.L. García-Díaz, T de J. Torreblanca-Castro, M.F. Campa-Uranga, L. Onofre-Espinoza, J.Zárate-López, F.Arceo y Cabrilla: Carta Geológico-Minera, Santa María Zoquitlán, E14D-68, escala 1:50,000, 1997.
- [10]. R.G. Martínez-Serrano, G. Solís-Pichardo, L.E. Flores-Márquez, C. Macías-Romo, J. Delgado-Durán: Geochemical and Sr-Nd isotopic characterization of the Miocene volcanic events in the Sierra Madre del Sur, central and southeastern Oaxaca, Mexico, 2008, UNAM, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 25, núm. 1, pp. 20-1.
- [11]. D.Morán-Zenteno, B. Matiny, G. Tolson, G. Solís-Pichardo, L. Alba-Aldave, M.S. Hernández-Bernal, C. Macías-Romo, R. Martínez-Serrano, P. Schaaf, S Gilva-Romo: Geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur, 2000, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. LIII, No. 1, pp. 58-27.
- [12]. F. Ortega-Gutiérrez: Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance, 1981a, Geofísica Internacional, v. 20, No.3, pp. 202-177.
- [13]. F. Ortega-Gutiérrez: La evolución tectónica premisisípica del sur de México, 1981b, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, revista, v. 5, No. 2, pp. 157-140.
- [14]. F. Ortega-Gutiérrez, L.M. Mitre-Salazar, J. Roldán-Quintana, J.Aranda-Gómez, D.Morán-Zenteno, S.A. Alaniz-Álvarez, A.F. Nieto-Samaniego: Carta geológica de la República Mexicana, escala 1:2'000,000, 1992, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología y Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales, 5ª. Edición, 1 mapa con texto explicativo.
- [15]. M. Podozis: Mineralización y eventos orogénicos globales, Pórfidos Cupríferos “colisionales”, Curso Pórfidos Cupríferos, 2010, Universidad de Chile, handout, 26 p.
- [16]. R.H. Sillitoe: Porphyry Copper Systems, Economic Geology, Society of Economic Geologist, 2000, v. 105, núm 1, pp. 41-3.
- [17]. R.H. Sillitoe, y J.W. Hedenquist: Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions and epithermal precious metal deposits. En: Simmons, S.F. y Graham I. (Eds). Volcanic, geothermal and ore-forming fluids; rulers and witnesses of processes within the earth, 2003, Society of Economic Geologist, Special publication, No. 10, pp. 343-315

### III.6- SISTEMA BIOTECNOLÓGICO PARA REDUCCIÓN DE CROMO (VI) EN AGUAS RESIDUALES

Alejandra Tovar-Corona<sup>a\*</sup>; O. Vázquez-Cuchillo<sup>b</sup>; F.B. Moreno-Luna<sup>c</sup>, Diego Hernández-Tosca<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ingeniería en Biotecnología, UPMP, Puebla, Puebla.

alejandra.tovar@metropoli.edu.mx

<sup>b</sup>Departamento de Ciencias Básicas, ITP, Puebla, Puebla.

odilon\_vazquez\_c@hotmail.com

<sup>c</sup>Instituto Politécnico Nacional, SEPI-UPIITA, Gustavo A. Madero, México, D. F.

\* Autor de correspondencia: alejandra.tovar@metropoli.edu.mx

#### RESUMEN

Debido a su toxicidad el Cr (VI) en aguas y sedimentos de ríos representa un serio problema de salud para las poblaciones que utilizan dichos afluentes, cuya exposición se relaciona con enfermedades tales como: retrasos en el desarrollo, diferentes tipos de cáncer, daño en riñones, e incluso, con casos de muerte [1, 2]. En el presente trabajo se describe la aplicación de un sistema bio reductor para la disminución de cromo hexavalente en aguas residuales, a través de un biofiltro compuesto por bagazo de *Agave potatorum* utilizado como soporte, extractos orgánicos polares ricos en ácido ascórbico, ácido cítrico y flavonoides, metabolitos con una alta capacidad antioxidante y el ligante *N*-donador Tris-(2-(((1E, 2E)-3-fenilaliliden)amino)etil)imina, obtenido por química verde [3-5] y caracterizado por técnicas espectroscópicas de rutina: EM por impacto electrónico, IR y UV-Vis. El último componente presenta una importante actividad quelante sobre el ion Cr (VI) el cuál es reducido y adsorbido por el sistema de origen biotecnológico eliminándolo del agua con una eficiencia del 96%, evaluando los resultados por espectrofotometría UV-Vis.

**Palabras Clave:** Cromo (VI), biofiltro, quelante, antioxidantes, biotecnología

#### ABSTRACT

Due to its toxicity, the Cr (VI) in water and sediment of rivers represents a serious health problem for people who use these flowing, whose exposure is related to diseases such as delays in development, cases of different types of cancer, damage to kidneys, and even with cases of death [1, 2]. This paper describes the application of a system bio reductor for the decrease of hexavalent chromium in wastewater, through a bio filter composed of *Agave potatorum* fiber, polar organic extracts rich in ascorbic acid, citric acid and flavonoids, metabolites with a high antioxidant capacity and ligand *N*-donator Tris-(2-(((1E, 2E)-3-fenilaliliden) amino)ethyl)imine obtained by green chemistry [3-5] and characterized by spectroscopic techniques of routine: mass spectroscopy by electron impact, FT-IR and UV-Vis. The latter compound presents an important activity chelating over ion Cr (VI) that is reduced and absorbed by the biotechnology system on deleting it from the water with an efficiency of 95%, evaluating the results by UV-Vis spectrophotometry.

**Keywords:** Chrome (VI), bio filter, chelation, antioxidants, biotechnology.

## 1. INTRODUCCIÓN

La presencia de metales pesados en el medio ambiente es una fuente de contaminación y daño potencial para cualquier ser vivo, ya que debido a su alta estabilidad no pueden biodegradarse, por lo que sólo cambian de estado de oxidación y se combinan con otras sustancias, dando lugar a formas más tóxicas del metal por lo que los seres vivos son incapaces de bio-transformarlos (no se metabolizan) [6,7].

El cromo hexavalente, Cr (VI), es el contaminante principal en las aguas residuales provenientes de industrias metalúrgicas, galvanoplásticas y del cuero. Es carcinógeno y mutagénico, así como un agente altamente oxidante. Se difunde fácilmente en los suelos, ambientes acuáticos y a través de la piel [8-10].

La cuantificación del contenido de metales pesados se puede determinar en muestras de aire, suelo, agua, sedimentos y tejidos de organismos vivos a partir de técnicas espectrofotométricas. De acuerdo a *los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89)* los valores de Cr en agua permitidos en México es de 0.05 mg /L [5] por lo cual la concentración de dicho metal en la mayoría de cuerpos de agua supera el límite establecido [11].

Es debido a estas alarmantes cifras que en los últimos años las investigaciones se han centrado en desarrollar procesos para eliminar el cromo presente en aguas residuales industriales, entre los que podemos mencionar: intercambio iónico sobre resinas poliméricas, coagulación-floculación, adsorción sobre carbón activado y reducción; precipitación química y sedimentación [12-14]. En este sentido, la síntesis química de ligantes y el uso de reductores, pretende ser un aliado en el procesamiento y mejora en la calidad de aguas contaminadas con Cr (VI), disminuyendo considerablemente el impacto que tiene en la salud y medio ambiente [15-19].

En condiciones naturales el cromo se presenta casi siempre en forma trivalente y prácticamente todo el cromo hexavalente que existe es generado por las actividades humanas.

Las especies de Cr (VI) en solución acuosa son  $[\text{Cr}_2\text{O}_7]^{2-}$ ,  $[\text{CrO}_4]^{2-}$ ,  $[\text{HCrO}]^4$  y su distribución depende del pH de la solución y de la concentración del metal [20]. Aunado a la actividad antropogénica normal, la extensa aplicación de este metal en la industria y manufactura ha permitido que sus niveles se eleven considerablemente [21,24]. Por otro lado, como resultado del proceso de reducción la especie de Cr (VI), se transforma a  $\text{Cr}^{3+}$ . Este catión, a un pH en condiciones ambientales precipita como hidróxido,  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ . Este hidróxido suele formarse en estado coloidal, con lo que permanece en suspensión o bien se adhiere a otras partículas sólidas mayores, precipitando e incorporándose en el sedimento. No obstante, si el pH es menor a 5, el ion  $\text{Cr}^{3+}$  no precipita, manteniéndose en disolución. De las dos especies que se encuentran en la naturaleza, la trivalente es relativamente benigna, mientras que la hexavalente es tóxica [25,26]. El Cr (VI) es de naturaleza aniónica y no es fuertemente adsorbido por el sedimento o la materia particulada, por ello es más móvil que el Cr (III) y no es propenso a sedimentar. Tiene tendencia a reaccionar fuertemente con sustancias oxidantes, moléculas orgánicas normalmente y formar Cr (III). El cual tiene una fuerte tendencia a formar complejos estables con especies orgánicas o inorgánicas cargadas negativamente [27,28].

En este trabajo presentamos un biofiltro que se basa en el uso de la capacidad reductora de los extractos naturales obtenidos de la cascara de naranja dulce (*Citrus sinensis*) y la actividad quelante de un ligante orgánico, a partir del cual podemos disminuir las concentraciones de cromo tóxico (Cr hexavalente) en aguas residuales contaminadas.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiales y métodos

Los espectros de IR fueron registrados en un aparato Nicolet FT-IR Magna 700 en pastillas de KBr y de polietileno. Los espectros de masas mediante la técnica de impacto electrónico IE fueron registrados con un espectrómetro JEOL JMS-SX 102A operado en el modo ion positivo a 70 eV, los espectros de masas FAB<sup>+</sup> se registraron con un espectrómetro JEOL JMS AX505HA; los datos están expresados en unidades masa /carga (*m/z*). Los puntos de fusión fueron medidos utilizando un aparato Melt-Temp II y no están corregidos. Las reacciones fueron monitoreadas por cromatografía en placa fina, empleando cromatoplasmas analíticas de óxido de aluminio TLC60F<sub>254</sub> neutras de 0.54 mm de espesor. La extracción de la fase orgánica a partir del crudo de reacción se realizó mediante extracciones con acetato de etilo y agua tridestilada. La separación de las mezclas de reacción se efectuó mediante placa preparativa DC-Fertigplatten SIL G-100 UV<sub>254</sub>, 1,0 mm. La placa preparativa se fue eluyendo con una proporción 7:3 de Hexano/Acetato de etilo, los cuales fueron previamente destilados.

### 2.2. Síntesis de base de Schiff L1 y preparación de solución ligante

Se sintetizó el ligante polidentado *N*-donador mediante condensación agregando cinamaldehído con la amina primaria en una proporción estequiométrica 3:1 equivalentes en un matraz de bola, dejando en agitación durante 24 horas, posteriormente se hicieron lavados con agua destilada y extracciones con acetato de etilo [29-31]. La solución amarilla resultante fue secada sobre Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> anhidro. Por último, se dejó cristalizando en una mezcla AcOEt/Hexano 1:1, obteniendo cristales amarillos con un rendimiento de 96%. A partir del compuesto obtenido, se preparó una solución 3.10<sup>-3</sup> M, utilizando 0.4g de ligante L1 Tris (2-(((1E, 2E)-3-fenilaliliden) amino) etil)imina y aforando a 250 ml con acetona como disolvente.

### 2.3. Desarrollo de biofiltro a partir de *Agave potatorum* y *Citrus sinensis*

La naranja dulce (*Citrus sinensis*) fue obtenida de manera comercial, seleccionando las frutas que presentaran color característico, que no presentaran manchas o abolladuras en la cascara.

Se pesaron 150 gr de cascara de naranja, se colocaron en el cartucho de extracción del equipo Soxhlet y se adicionaron 300 mL de etanol absoluto. Se colocó a reflujo con un tiempo de reacción de 3 horas con agitación. Una vez obtenido el extracto se concentró hasta obtener un volumen final de 50 mL utilizando vacío a presión reducida. Las muestras de *Agave potatorum* fueron hojas basales obtenidas de plantas cultivadas de 8 años de edad.

Obtenidas las hojas (100gr), se procedió a lavarlas cuidadosamente con agua tridestilada hasta obtener hojas libres de polvo, posteriormente se trituró hasta alcanzar una fase sólido líquido para ser posteriormente separada por filtración, la fase sólida (fibra) se deshidrató por convección natural para su posterior uso en la extracción. Posterior a esto se procedió a un secado en estufas a 80°C por 24hrs y la fibra seca se combinó con 50mL de la solución quelante-bioreductora, generando una masilla que fue empaquetada en una columna de vidrio.

Los 50mL de solución quelante-bioreductora fue obtenida utilizando distintas cantidades del extracto orgánico (0-25mL), 25mL del ligante L1 y completando la solución con agua tridestilada (0-25mL) hasta alcanzar un volumen constante de 50mL. Cada prueba se realizó por triplicado para garantizar la repetitividad de los resultados.



#### 2.4. Técnica colorimétrica para cuantificación de cromo hexavalente [32]

Se pesaron 250 mg de difenilcarbazida y se disolvió en 50 mL de acetona. La solución se almacenó en frascos de color ámbar con tapa y recubierta de teflón; esta disolución es transparente al momento de prepararla, después toma un color amarillo claro. Se secó dicromato de potasio en horno a 105°C por 1hr., dejando enfriar en el desecador. Posteriormente se pesó 141,4 mg de dicromato de potasio, se disuelve con agua y se afora a 100mL. Un mililitro de esta disolución es equivalente a 500,0 µg de Cr (VI). Se adicionó una alícuota de 1 mL de la disolución madre de cromo (VI) a un matraz volumétrico de 100 mL y se aforó con agua destilada. 1 mL de esta disolución equivale a 5,0 µg de Cr (VI).

La muestra problema fue ajustada a pH<2 con ácido sulfúrico 0.2 N, se tomó una alícuota de 100 ml y se agregan 2 ml de la disolución de difenilcarbazida, se mezcla y se deja reposar por 10 min para desarrollar el color completamente.

#### 2.5. Curva de calibración

Se midieron volúmenes de disolución estándar de Cr (VI) 5,0 µg/mL entre 2,0 mL y 20,0 mL. de esta disolución con 10 disoluciones para obtener estándares en el intervalo de 10 ppm a 100 ppm de Cr (VI), en matraces aforados de 100 mL. Después se transfirieron a matraces Erlenmeyer de 250 mL; para agregar ácido sulfúrico 0,2 N hasta llegar pH<2 y se siguió el procedimiento que se indica a la muestra para el desarrollo de color, posteriormente se transfirió una alícuota de cada estándar a una celda de cuarzo de 1cm y se midió su absorbancia en el espectro UV-VIS a 540nm.

#### 2.6. Evaluación quelante y bioreductora

Con la finalidad de evaluar la capacidad quelante y bioreductora de nuestros distintos componentes, llevamos a cabo tres experimentos (cada uno por triplicado), en el primero de ellos (Experimento A) se busca conocer la proporción metal-ligante ideal para poder obtener la mayor cantidad de complejos, suponiendo una unión 1:1 entre cada molécula orgánica y cada uno de los iones metálicos Cr<sup>6+</sup>. Sin embargo, al tratarse de un ligante polidentado, se puede pensar en que dicha proporción cambie.

Posteriormente debido a los altos volúmenes (100mL) de solución problema y hasta 70mL de solución orgánica utilizados en el primer experimento de decidieron realizar procedimientos de prueba más alineados con la química verde (señalado como B) con un modelo a escala manejando volúmenes máximos de 5mL.

Por último, se integró el ligante orgánico, al sistema bioreductor y el bagazo de *Agave potatorum* para evaluar la eficacia del sistema biotecnológico desarrollado para la adsorción-reducción del metal tóxico (experimento C).

#### Experimento A

Se prepararon soluciones estándar de Cr (VI) con un volumen final de 100 ml, a las cuales se les agregó el ligante L1 en las proporciones descritas en la tabla 1. Estas soluciones se hicieron reaccionar de acuerdo a la técnica antes mencionada para el desarrollo de color y se leyeron a los 10 minutos en una celda de cuarzo a 540 nm.

**Tabla1:** Componentes de aguas modelo experimento A

Cr (VI) [100ppm]	SOLUCIÓN L1	Difenilcarbazida
100 ml	0 ml	2ml
33,3ml	66,6ml	2ml
50,0ml	50,0ml	2ml
66,6ml	33,3ml	2ml
45,0ml	25,0ml	2ml

### Experimento B

Se realizó un segundo experimento alineándonos a la química verde, preparando soluciones modelo a escala con 5 ml como volumen final, se tomaron alícuotas de la disolución estándar de Cr (VI) y de la solución de ligante con las proporciones señaladas en la tabla 2. A cada una de las muestras se les hicieron reaccionar de acuerdo a la técnica para el desarrollo de color y se leyeron en celda de cuarzo a 540 nm a los 10 minutos. Se dejan reposar las soluciones 24 hrs, se agitan por 10 min y se repite la lectura

**Tabla2:** Componentes de aguas modelo experimento B

Cr (VI) [100ppm]	LIGANTE L1	DIFENILCABAZIDA
5,0ml	0 ml	0,1ml
4,5 ml	0,5ml	0,1 ml
4,0 ml	1,0 ml	0,1 ml
3,5 ml	1,5 ml	0,1ml
3,0 ml	2,0 ml	0,1 ml
2,5ml	2,5 ml	0,1 ml
2,0ml	3,0 ml	0,1 ml
1,5ml	3,5ml	0,1 ml
1,0ml	4,0ml	0,1 ml
0,5ml	4,5ml	0,1 ml

### Experimento C

La mezcla preparada según la descripción del apartado 2.3 y según las proporciones señaladas en la tabla 3, se dejó secar a temperatura ambiente y fue colocada en columnas cromatográficas de vidrio.

Sobre la misma se hicieron pasar 50mL de una solución estándar de Cromo (VI) con una concentración de 100ppm, la cual fue recuperada y tratada de acuerdo a la norma correspondiente para conocer su concentración por espectrofotometría UV-Vis.

**Tabla 3:** Proporciones de mezcla quelante-bioreductora

No.	Solución Ligante L1	Extracto orgánico (mL)	H2O (mL)
1		0	25
2		5	20

3	25 mL	10	15
4		15	10
5		20	5
6		25	0

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Ligante L1 Tris (2-(((1E, 2E)-3-fenilaliliden) amino)etil)imina

El ligante L1 se obtuvo con un rendimiento del 96% como un sólido cristalino amarillo con p.f.=85°C en su espectroscopia FT-IR se encuentran bandas de absorción con frecuencias de 1666.49  $\text{cm}^{-1}$  ( $\nu$ ) C=N; 1624.752  $\text{cm}^{-1}$  ( $\nu$ ) (C=C), 1115.654  $\text{cm}^{-1}$  ( $\nu$ ) (C-N); 680.10  $\text{cm}^{-1}$  ( $\nu$ ) (C-H) fuera de plano. En el espectro de masas por impacto electrónico se observa el ion molecular del compuesto  $m/z = M^+ + \text{H}_2\text{O} = 501$  y confirmando la fórmula molecular propuesta  $\text{C}_{33}\text{H}_{36}\text{N}_4$ . Los picos con relación  $m/z$  258, 155, 90, 31, 27, corresponden a los fragmentos ( $M^+ - 243$ )  $\text{C}_{15}\text{H}_{22}\text{N}_4^+$ , (-346)  $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{N}_4^+$ , ( $M^+ - 411$ )  $\text{C}_7\text{H}_6^{2+}$ , ( $M^+ - 470$ )  $\text{C}_2\text{H}_6^+$ , ( $M^+ - 474$ )  $\text{C}_2\text{H}_2^{4+}$ . Estos parámetros permiten determinar cuantitativamente los componentes del ligante sintetizado *N*-donador, los cuales representan la abundancia de los diferentes tipos de iones en función de la relación masa/carga de cada uno de ellos presentes en el sistema orgánico.

#### 3.2 Curva de calibración

Se realizaron diluciones con diferentes concentraciones de cromo hexavalente que fueron desde aquella que tenía 10ppm hasta la que su concentración era de 100ppm de dicho metal, posteriormente se sometió a la técnica de desarrollo de color para realizar las lecturas de absorbancia en el espectrofotómetro UV-VIS, después de hacer las lecturas de absorbancia a 540nm observadas en la tabla 4, este gráfico no ayudo como referencia para determinar la cantidad de Cr (VI) presente las siguientes muestras estudiadas [32].

**Tabla 4:** Curva de calibración  $A_{540\text{nm}}$

[Cr <sup>6+</sup> ]ppm	$A_{10 \text{ min}}$
10	0.0128
20	0.0526
30	0.1194
40	0.2054
50	0.2335
60	0.3123
70	0.3492
80	0.4064
90	0.4592
100	0.5882

*Espectro 1. UV-VIS curva de calibración.*

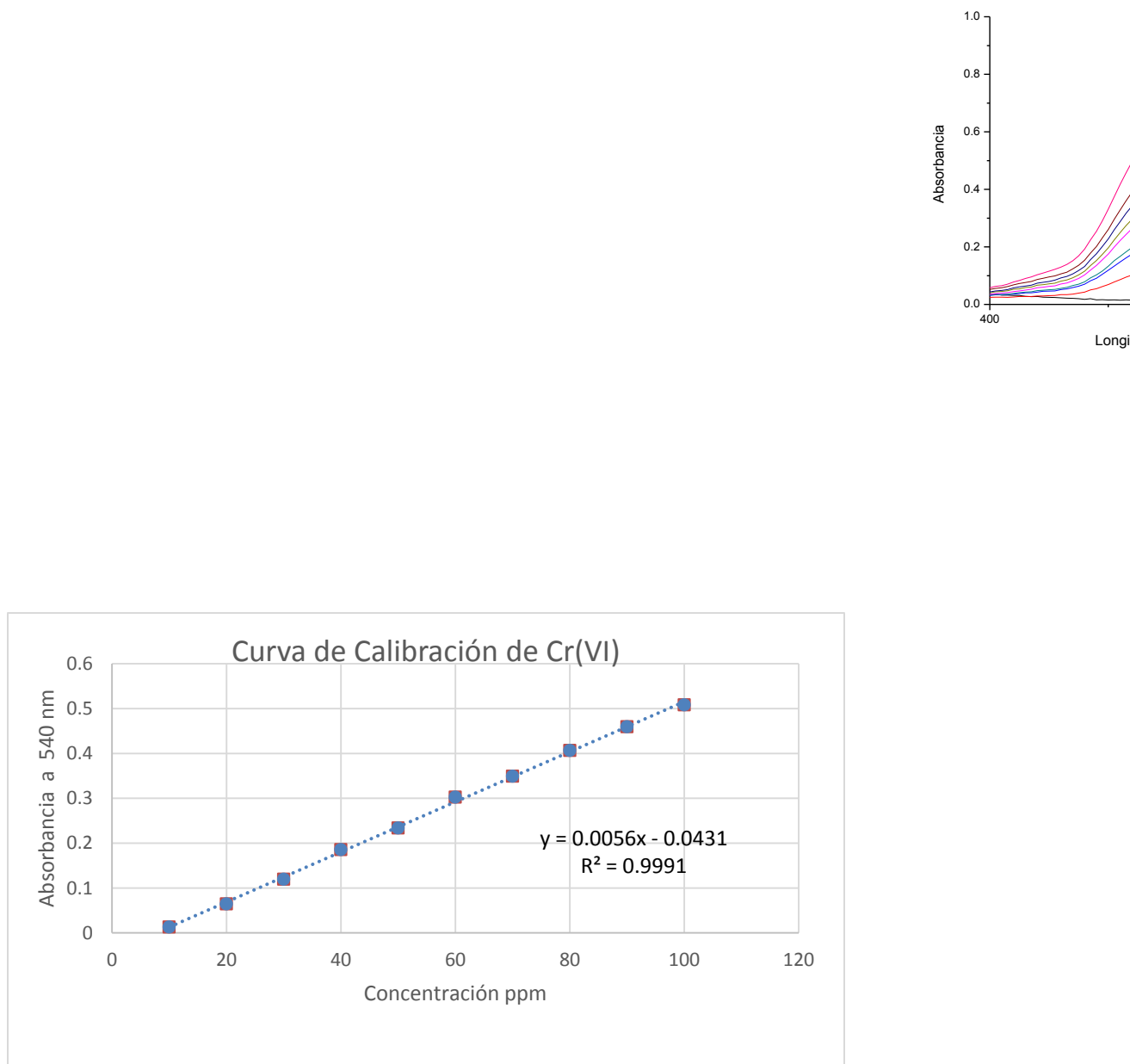
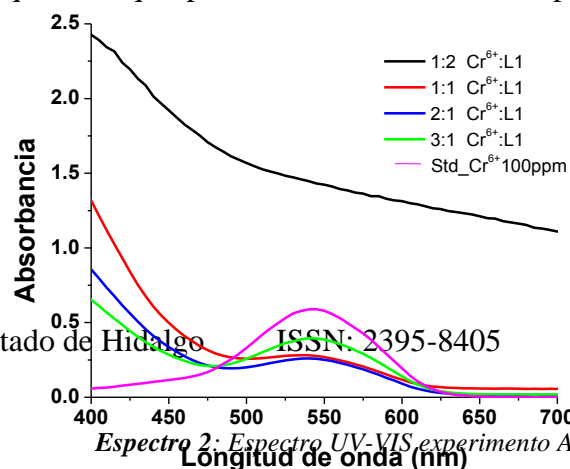


Figura 1. Curva de calibración de Cr.

### 3.3 Experimento A

En el espectro 2 verificamos que el ligante sintetizado tiene la capacidad de reducir en diferentes proporciones la cantidad de Cr(VI) gracias al efecto quelante que presenta, formando un complejo metal-ligante, el cual macroscópicamente se puede observar en forma de precipitado. Las muestras que contenían una mayor cantidad de ligante respecto al Cr, no mostraron lectura a 540nm, puesto que prevalecía la cantidad de ligante y el cromo hexavalente es atrapado en su totalidad; mientras que aquellas en las que había una cantidad menor



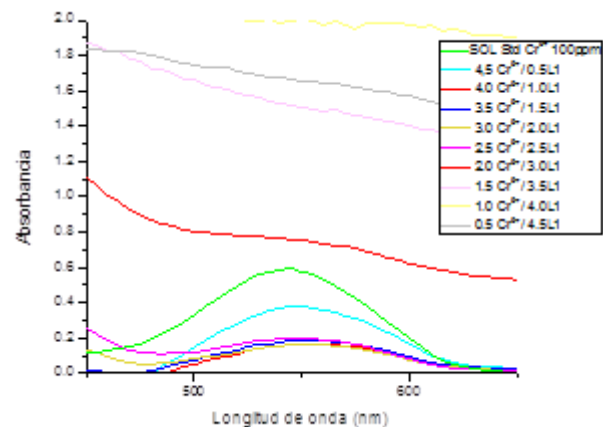
de ligante contra la cantidad de Cr (VI) (muestras 2:1 y 3:1), mostraron una reducción considerable, siendo aquella que contiene 2:1 equivalentes de Cr (VI):L1 (curva color azul). La efectividad de la actividad quelante se evaluó con base en la curva de calibración correspondiente de acuerdo a la norma NMX-044, observando una disminución del ion hexavalente hasta en un 87%, esto nos permite verificar no sólo la eliminación del ion libre en aguas modelo sino la proporcionalidad quelante superior a la proporción 1:1 comprobando que nuestro ligante tiene un mayor efecto quelante que el esperado.

### 3.3 Experimento B

Se trabajaron disoluciones a escala con un volumen final de 5ml apegándonos al fundamento del experimento A. Repitiendo la metodología, se tiene una dilución estándar 100 ppm de Cr (VI), otra cuya cantidad de cromo es la misma al ligante, así como en las que hay un exceso de L1 y otras donde prevalece en mayor proporción el Cr (VI) con respecto al ligante (Tabla 4). La curva de color verde es nuestro estándar con una concentración de 100ppm de Cr VI, las muestras que están bajo esta curva son aquellas donde existe una concentración igual o menor de ligante con respecto al metal, en las cuales se observa una disminución en la concentración del Cr hexavalente. Por lo tanto se reitera que la capacidad quelante de metales pesados del ligante Tris (2-(((1E, 2E)-3-fenilaliliden)amino)etil)imina L1, es realmente efectiva ya que se reduce hasta en un 87%, gracias a la formación de quelatos que precipitan y a los cuales posteriormente se les puede hacer un diferente tratamiento de purificación para el control de contaminación por dicho metal.

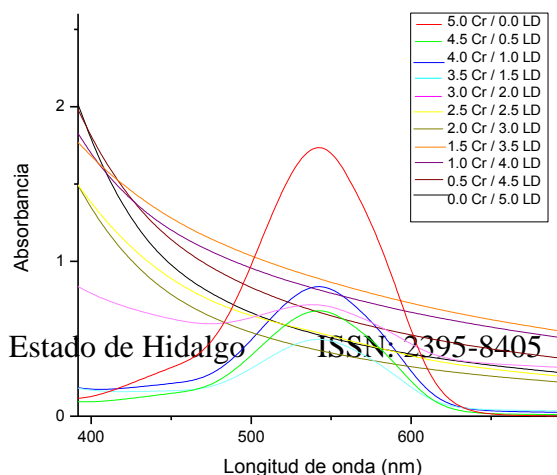
**Tabla 5.** Absorbancias  $T_{10min}$  y  $T_{24hrs}$  experimento B

No.	A $\lambda=540nm$ 10 min	A $\lambda=540nm$ 24 hrs.
1	0,588	0,588
2	0,368	0,314
3	0,155	0,199
4	0,177	0,260
5	0,157	0,204
6	0,195	0,225
7	0,764	0,149
8	1,522	0,053
9	1,986	0,373
10	1,671	0,106



**Espectro 3.** UV-VIS Experimento B ( $t=10$  min).

Las muestras 7, 8, 9, 10 contienen un exceso de ligante, por lo tanto ya no se observa en la presencia de Cr (VI) en estas aguas modelo ya que prevalece L1. Los agentes quelantes



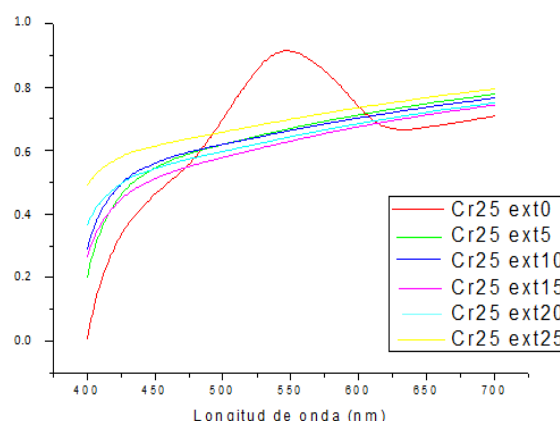
poseen diversas características, como la gran estabilidad en la formación de complejos sin toxicidad partiendo de elementos que si son tóxicos como el Cr (VI), por tal razón se decidió dejar en reposo durante 24 horas estas aguas modelo para cerciorar que se cumpla dicha propiedad, pasado este tiempo se realizaron las lecturas de absorbancia (espectro 4).

*Espectro 4: UV-VIS Experimento B (t=24hrs).*

### 3.4 Experimento C

La solución pasada por el biofiltro no presenta la absorción característica a los 540nm lo que corrobora la eliminación cuantitativa del ion  $\text{Cr}^{6+}$ , el sistema estudiado mostró propiedades de adsorción comparables a las de la alúmina comercial (97%) de eliminación de Cr(VI) [33,34]. En todas las repeticiones, la columna que mostró la menor absorbancia es la que contiene la mezcla 4: 25ml de ligante L1/ 15 mL de extracto bioreductor/ 10mL de  $\text{H}_2\text{O}$  soportados sobre el adsorbente de *Agave portatorum* (ver tabla 3), obteniendo una efectividad de reducción- adsorción hasta del 96%, lo que nos permite estandarizar las proporciones en nuestro biofiltro.

Cabe mencionar que el color natural de la solución bioreductora genera un color característico (café) en la solución resultante por lo que se observa una absorbancia interferente típica. Por otro lado el espectro obtenido nos muestra la gran estabilidad del complejo formado por el ligante L1 y el Cr (VI), al igual que en el experimento A, donde en cada disolución se muestra la reducción en la concentración de Cr hexavalente, al dejar reaccionar por mayor tiempo nuestros componentes en estudio se tuvo una mayor interacción entre los pares electrónicos libres de los nitrógenos presentes en el ligante Tris (2-(((1E, 2E)-3-fenilaliliden)amino)etil)imina con el ácido de Lewis (Cr( VI)) y una reducción casi total en la concentración de cromo hexavalente.



*Espectro 5. UV-Vis experimento C*

## 4. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió establecer el enorme potencial de un producto biotecnológico en la adsorción/eliminación de Cr(VI) en medio acuoso, en concentraciones de metal equivalentes a las halladas en aguas residuales provenientes de industrias en México. Este biofiltro se desarrolló a partir de la bagazo de *Agave potatorum* como adsorbente, extracto etanólico de *Citrus sinensis* y el ligante orgánico Tris (2-(((1E, 2E)-3-fenilaliliden)amino)etil)imina el cual fue sintetizado mediante procesos sustentables y se caracterizó con métodos espectrofotométricos infrarrojo, ultravioleta-visible y espectrometría de masas. Al evaluar la actividad quelante de dicho ligante frente a Cr (VI) en aguas

modelo de concentración conocida mediante el seguimiento por espectrofotometría ultravioleta-visible, de acuerdo a la NORMA OFICIAL MEXICANA NMX-AA-044-SCFI-2001 se obtuvo una efectividad de hasta el 96% en la remoción de Cr (VI). Además se integró con un adsorbente orgánico realizado a partir de bagazo de *Agave potatorum* y el extracto etanólico obtenido a partir de *Citrus sinensis*, dicho sistema además de la propiedad quelante tiene adicionado un sistema bioreductor natural convirtiendo al ion tóxico Cr(VI) en iones biocompatibles, asegurando no solo el saneamiento acuoso sino la disminución en la toxicidad de los sedimentos.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue desarrollado gracias al financiamiento PRODEP DSA/103.5/15/10800 y de la Universidad Politécnica Metropolitana de Puebla, así como con la colaboración del Instituto Tecnológico Nacional (Campus Puebla).

## REFERENCIAS

- [1] Oze, C., Bird, D. K., & Fendorf, S. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 104(16), 6544-6549.
- [2] Martínez, R. M. Q., Chacón, G. S., Arias, H. R., Prieto, J. R. E., Licón, C. H., & Acosta, J. C. Evaluación de parámetros físico químicos y contenido de metales en sedimentos de la Laguna de Bustillos en Chihuahua, México. Investigación no publicada, 2011.
- [3] Anastas, P. a. (2000). Green Chemistry: Theory and Practice. *J. C. Green Chemistry: Theory and Practice, New York, Oxford University*, pp. 30-36.
- [4] Newman Stephen G., Jensen Klays F. *Green Chem.*, 2013, 15, 1456-1472
- [5] Clark James, Sheldon Roger, Raston Colin, Poliakoff Martyn, Leitner Walter, *Green Chem.*, 2014,16, 18-23
- [6] Gutiérrez, R. L., Rubio-Arias, H., Quintana, R., Ortega, J. A., & Gutierrez, M. *International journal of environmental research and public health*, 2008, 5(2), 91-98.
- [7] Reyes-Gutiérrez, L. R., Romero-Guzmán, E. T., Olmos-Salinas, M. G., & Rodríguez-Castillo, R. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2009, 26(1), 104-116.
- [8] Fiedler, S., Siebe, C., Herre, A., Roth, B., Cram, S., & Stahr, K., *Water, air, and soil pollution*, 2009, 197(1-4), 35-47.
- [9] Rubio-Arias, H., Quintana, C., Jimenez-Castro, J., Quintana, R., & Gutierrez, M. *International journal of environmental research and public health*, 2010, 7(5), 2071-2084.
- [10] Rubio-Arias, H., Rey, N. I., Quintana, R. M., Nevarez, G., & Palacios, O. *International journal of environmental research and public health*, 2011, 8(6), 2386-2400. 6
- [11] Villalobos-Aragón, A., Ellis, A. S., Armienta, M. A., Morton-Bermea, O., & Johnson, T. M. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(9), 1783-1794.
- [12] Steffy, D. A., Nichols, A. C., Morgan, L. J., & Gibbs, R. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2013, 224(11), 1-11.

- [13] Wise Jr, J. P., Wise, J. T., Wise, C. F., Wise, S. S., Gianios Jr, C., Xie, H., & Wise Sr, J. P. *Environmental science & technology*, 2015, 48(5), 2997-3006.
- [14] Cai, Y., Rooker, J. R., Gill, G. A., & Turner, J. P. *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2007, 64(3), 458-469.
- [15] Guentzel, J. L., Portilla, E., Keith, K. M., & Keith, E. O. *Science of the Total Environment*, 2007, 388(1), 316-324.
- [16] Trefry, J. H., Trocine, R. P., McElvaine, M. L., Rember, R. D., & Hawkins, L. T. *Environmental geology*, 2007, 53(2), 375-385.
- [17] García-Hernández, J., Cadena-Cárdenas, L., Betancourt-Lozano, M., García-De-La-Parra, L. M., García-Rico, L., & Márquez-Farías, F. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2007, 89(3), 507-522. 7
- [18] Lewis, M., & Chancy, C. *Chemosphere*, 2008, 70(11), 2016-2024.
- [19] Gutiérrez-Galindo, E. A., Casas-Beltrán, D. A., Muñoz-Barbosa, A., Daesslé, L. W., Segovia-Zavala, J. A., Macías-Zamora, J. V., & Orozco-Borbón, M. V. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2008, 80(2), 123-127.
- [20] DeLaune, R. D., Devai, I., Hou, A., & Jugsujinda, A. *Soil & Sediment Contamination*, 2008, 17(2), 98-106.
- [21] Osuna-Martínez, C. C., Páez-Osuna, F., & Alonso-Rodríguez, R. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2012, 85(3), 339-343.
- [22] Shah, A. Q., Kazi, T. G., Baig, J. A., Afridi, H. I., Kandhro, G. A., Khan, S., & Wadhwa, S. K. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, 48(6), 1550-1554.
- [23] Leal-Acosta, M. L., Shumilin, E., Mirlean, N., Sapozhnikov, D., & Gordeev, V. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2010, 85(6), 609-613.
- [24] Macias Medrano, R., Hinojosa Reyes, L., Hernandez-Ramirez, A., & Acuna-Askar, K. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 2010, 55(4), 486-490.
- [25] Trasande, L., Cortes, J. E., Landrigan, P. J., Abercrombie, M. I., Bopp, R. F., & Cifuentes, E. *Environmental Health*, 2010, 9(1),
- [26] Páez-Osuna, F., Calderón-Campuzano, M. F., Soto-Jiménez, M. F., & Ruelas-Inzunza, J. *Marine pollution bulletin*, 2011, 62(6), 1320-1323.
- [27] Evan P. Beaumier, Brennan S. Billow, Amrendra K. Singh, Shannon M. Biros and Aaron L. Odom *Chem. Sci.*, 2016, 7, 2532-2536
- [28] Jie Liu, Yuan-Ye Bao, Ye Liu, Wei-Min Ren, Xiao-Bing Lu, *Polym. Chem.*, 2013, 4, 1439-1444
- [29] Guo, B. L.-J.-G.-P.-Y. *Inorganica Chimica Acta*, 2012, 392, 4987-4994.
- [30] Bao-Lin Liu, Yan-Xia Wang, Fan-Hong Kong, Ruo-Jie Tao, *Inorganica Chimica Acta*, 2012, 392, 469-472
- [31] Kusai Alomar, Vincent Gaumet, Magali Allain, Pascal Richomme, Gilles Bouet, *Inorganica Chimica Acta*, 2012, 433-439
- [32] CONAGUA, *Norma Mexicana NMX-AA-044-SCFI-2014 Análisis de agua, medición de cromo hexavalente en aguas naturales, salinas residuales y residuales tratadas-Método de Prueba*, 2014.



[33]Vargas-Nieto C., Carriazo J.G., Castillo E., *Ing. Investig*, 2011, 31,154-162.

[34]Glorias-García F., Arriaga-Merced J.M., Roa-Morales G., Varela-Guerrero V., Barrera-Díaz C.E., Bilveu B., *Journal on Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, 20, 2477-2483