



**Revista Internacional de Investigación e Innovación  
Tecnológica**

Página principal: [www.riit.com.mx](http://www.riit.com.mx)

**Características Generales y Geológicas de la Celestina en la Sierra de Alamos,  
Plataforma de Coahuila- Límite Cuenca de Sabinas, México: Hacia una Clasificación  
Genética, a partir del análisis de inclusiones fluidas.**

González Partida E.<sup>1</sup>, Piedad-Sánchez N.<sup>2</sup>, González Ruiz L. E.<sup>3</sup>, Martínez L.<sup>4</sup>, Vázquez-Ramírez J. T.<sup>1</sup>

1 Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla; Apartado postal 1-742, C.P. 7600, Querétaro, Qro., México.

2 Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, Carretera 57 km 5, C.P. 25710, Monclova, Coahuila de Zaragoza, México.

3,4 Geología Minería y Consultoría, Cipreses 1904 f. Jurica Querétaro, Qro., México. y Laboratoire Géoresources, UMR 7359 CNRS, Faculté des Sciences, Université de Lorraine, BP-239, Boulevard des Aiguillettes, 54506 Vandoeuvre Lès Nancy. Cedex, France.

**RESUMEN**

México es un productor líder de celestina en el mundo, debido a la producción en el Estado de Coahuila, donde existe un conjunto de depósitos minerales estratoligados compuestos esencialmente de celestina ( $\text{SrSO}_4$ ), geológicamente se encuentran sobre la plataforma denominada de Coahuila y sistemáticamente en litologías del Cretácico de la formación Aurora y/o Acatita.

Los cuerpos mineralizados son estratoligados y están alojados en calizas de la Formación Acatita. El espesor de estos mantos es en promedio de 3 m, con longitudes que rebasan los 100 m, constituidos esencialmente de bandas claras y oscuras de celestina texturalmente similares a “ritmitas”, y manifiestan presencia de materia orgánica. Las inclusiones fluidas observadas tanto de ganga de calcita y dolomita como en la celestina, son de carácter primario y por los grados de relleno que presentan se pueden definir como del tipo líquido + vapor (L+V) a líquido dominante, igualmente se aprecian algunos cristales atrapados de dolomita y la presencia de materia orgánica, lo que asegura el sincronismo del evento mineralizante y de alteración diagenética (dolomitización). De acuerdo a los datos obtenidos, la celestina se formó en un rango de temperatura mínima de formación entre  $T_h = 95^\circ\text{C}$  a  $181^\circ\text{C}$ , con una salmuera de 9.6 a 17.3 % Eq. Peso NaCl. Estos son los rangos térmicos y de salmuera que caracterizan a los yacimientos denominados del Tipo Mississippi Valley ó MVT.

De acuerdo a los datos isotópicos de  $\delta^{34}\text{S}\%$  y  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  que presenta la celestina y de asumir el origen

de los fluidos a partir de salmueras de cuenca, se argumenta que esta, se desplazó debido a niveles piezométricos y a cambios en la densidad del fluido, producto de un gradiente geotérmico anómalo. Estas aguas evolucionadas, lixivian a los metales de las arcasas y sedimentos clásticos en las cuencas (formaciones La Joya, La Gloria, La Casita, Las Uvas), hasta sustituir el calcio de las anhidritas de la formación Acatita, por los metales en solución, debido a la baja solubilidad de los niveles evaporíticos.

**Palabras Clave:** celestina, inclusiones fluidas, cuerpos estratoligados, fluidos de cuenca.

### **Abstract**

Mexico is a leading producer of celestine in the world, due to the production of the State of Coahuila, where there is a set of mineral deposits stratabound composed essentially of celestine ( $\text{SrSO}_4$ ), geologically found on the platform called Coahuila and systematically in lithologies from the Cretaceous of Aurora/Acatita Formation.

The mineralized bodies are stratabound and are hosted in limestones of Acatita Formation. The thickness of these mats has an average of 3 m, a length that exceeds the 100 m, essentially consisting of a selection of light and dark bands that are similar to the "rhythmites" of Celestine, and manifest presence of organic matter. There are two inclusions observed in the Celestine, both of which are calcite and dolomite are classified as primary and based on the degrees of filling show can be set as type I fluid steam (L+V) to liquid equally dominant, It can be appreciated some trapped crystals of dolomite and the presence of organic matter, which ensures the mineralization of the event and diagenetic alteration (dolomitization). According to the data obtained, the Celestine was formed in a minimum formation temperature range between 95 ° C to 181 ° C, with a brine of 9.6 to 17.3 Eq. Weight NaCl. These are the temperature and brine that characterize deposits known as the Mississippi Valley type or MVT.

According to the isotopic data from  $\delta^{34}\text{S}$ ‰ and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  that presents the matchmaker and take on the origin of the fluids from brine basins, it is argued that this, moves due to groundwater level and changes in the density of the fluid, product of an abnormal geothermal gradient. This evolved water, causes leaching to the metals of the arches and clastic sediments in the basins (La Joya, La Gloria, La Casita, Las Uvas formations), to replace the calcium of the anhydrites of Acatita formation, with metals in solution, due to the low solubility of evaporitic levels.

## Introducción.

En el Estado de Coahuila existe un conjunto de depósitos minerales estratoligados compuestos esencialmente de celestina ( $\text{SrSO}_4$ ), geológicamente se encuentran sobre la plataforma denominada de Coahuila y sistemáticamente en litologías del Cretácico. Estos depósitos estratoligados presentan varias de las características definidas por diversos autores (Ohle, 1959; Kisvaransayi *et al.*, 1983; Sangster, 1983; Sverjensky, 1986, entre otros), como características diagnósticas de depósitos tipo Mississippi Valley ó “MVT” (“*Mississippi Valley Type*” por sus siglas en ingles), dentro de las cuales las más importantes son: (1) la mayoría de estos depósitos se encuentran alojados en rocas carbonatadas, (2) éstos tienden a localizarse en o cerca de las orillas de cuencas sedimentarias o sobre pilares tectónicos o arcos entre tales cuencas, (3) depósitos individuales semejantes unos a otros pueden estar distribuidos en zonas de varios  $\text{km}^2$  de extensión, (4) las rocas carbonatadas que los contienen no se encuentran metamorfoseadas, (5) se formaron a poca profundidad (generalmente menos de 1500 m), (6) existen evidencias de disolución de la roca carbonatada hospedante, con la formación de brechas y texturas de colapso, (7) consisten en reemplazamientos bandeados, geodas o filones, pero siempre estrictamente delimitados a un solo horizonte estratigráfico, (8) presentan una mineralogía relativamente simple, y a menudo son mono-minerales, (9) los depósitos están relacionados en tiempo a un evento orogénico, (10) son epigenéticos, estratoligados y los cuerpos presentan con frecuencia relictos de la misma roca hospedante, orientados en forma paralela a la orientación de los estratos, y (11) las brechas y vetillas están cementadas con la misma mineralización que conforma el cuerpo

mineralizado. En síntesis los podemos definir como: *Una familia de minerales epigenéticos precipitados a partir de densas salmueras de cuenca, en rangos de temperatura entre 75°C a 200°C, depositados en secuencias carbonatadas de plataforma y que carecen de afinidades genéticas relacionadas a actividad ígnea* (González Sánchez *et al.*, 2007).

## Generalidades de la Celestina.

La celestina es isoestructural con la barita y pueden ser confundidas, pero se diferencian por la menor gravedad específica (densidad) de la celestina y por pruebas químicas de estroncio. El nombre celestina proviene del latín “*caelestis*” que significa celestial, en alusión al color azul pálido característico de los primeros especímenes descritos. La celestina es la principal mena de estroncio, que es el 15° elemento en abundancia del planeta. Sólo dos minerales contienen suficiente estroncio para ser económicamente atractivos: celestina y estroncianita ( $\text{SrCO}_3$ ), la estroncianita sería más rentable pues no se tendría que procesar a la celestina para obtener carbonato de estroncio, sin embargo, la celestina ocurre con mayor frecuencia en depósitos de tamaño atractivo para ser minados.

Los diversos usos del estroncio se nombran en la Tabla 1. El carbonato de estroncio, por ejemplo, produce alta fuerza coercitiva y resistividad térmica y eléctrica en imanes, mejora también la calidad del vidrio en pantallas de televisores, computadoras, sonares, radares e instrumentos de control y mejora el vidriado en cerámica; en pirotecnia, el nitrato de estroncio produce una flama roja brillante única; el estroncio metálico se usa en varias aleaciones y la celestina se utiliza para incrementar el peso de lodos de perforación de pozos petroleros.

**Tabla 1.** Principales usos del estroncio en varias industrias (Informe de la Minería Mexicana 2002, Secretaría de Economía).

<b>Electrónica</b>	En la manufactura de bulbos o válvulas electrónicas a color de televisión. En tubos de televisores forma una barrera de absorción de los rayos X que se originan, añadiendo manejabilidad a la mezcla fundida del vidrio. Pequeñas cantidades de estroncio y sus aleaciones se usan para sacar restos de gases de tubos electrónicos. En la elaboración de tubos de rayos catódicos para producir los tres colores básicos, rojo, verde y azul. Otras aplicaciones son la producción de titanato, estanato y zirconato de estroncio para uso en electrónica, memorias de ordenador, telecomunicaciones e industria automotriz.
<b>Vidrio</b>	El carbonato de estroncio se emplea en numerosas aplicaciones del vidrio utilizado en óptica, cristalería, iluminación, fibra de vidrio, vidrio de laboratorio y farmacéutico, mejorando propiedades tales como el aumento de la dureza y de la resistencia al rayado, incremento del brillo y facilidad de pulido.
<b>Imanes</b>	El carbonato de estroncio es usado en la manufactura de ferrita magnética cerámica, ya que mejora la fuerza coercitiva y el grado de seguridad y eficacia en imanes usados en motores eléctricos de automóviles y altavoces, entre otros.
<b>Cerámica</b>	El carbonato de estroncio se utiliza en el vidriado y esmaltado de la cerámica para vajillas, reforzando su resistencia a la abrasión y al rayado y evitando la formación de burbujas en el proceso de cocción, además de dar mayor brillo y de presentar, en algunos casos, mejor comportamiento que el plomo, sin riesgo de toxicidad.
<b>Metalurgia</b>	En la producción electrolítica de zinc, para que éste se deposite en el cátodo y elimina impurezas de plomo. El estroncio metálico es usado en diversas aleaciones y como agente modificante en la producción de aleaciones sílico-alumínicas hipoeutécticas.
<b>Pirotecnia</b>	Las sales de estroncio se usan en la preparación del nitrato de estroncio que se emplea como componente en la fabricación de fuegos artificiales, bengalas y trazadores.
<b>Productos químicos</b>	El nitrato de estroncio con su color rojo brillante es usado en señalamientos luminosos; el fosfato de estroncio usado para hacer luces fluorescentes; el cloruro de estroncio se usa en la manufactura de pasta dental. Para eliminar sulfatos en el tratamiento de aguas residuales.
<b>Pinturas</b>	Para la manufactura de pigmentos para pinturas y para pinturas de extensión y esmaltes; protege a los pigmentos contra la corrosión. Se emplea en la fabricación de cromato de estroncio que es un inhibidor de la corrosión.
<b>Perforación de pozos</b>	Para incrementar el peso a los lodos de perforación.
<b>Farmacéutica</b>	En la fabricación de medicamentos.
<b>Alimentos</b>	Para la extracción de azúcar en la refinería de remolacha.
<b>Siderurgia</b>	Para desulfurizar el acero.
<b>Textil</b>	En la manufactura de sosa cáustica para elaborar un producto muy puro para la fabricación de rayón.
<b>Hule</b>	Para relleno en hule.

México es un productor líder de celestina en el mundo, debido a la producción del Estado de Coahuila y en mucho menor proporción la de Zacatecas, lo que sitúa a Coahuila como líder productor de celestina en el país y en el mundo. La producción de celestina a nivel mundial por décadas ha rondado entre 400,000 a 300,000 toneladas anuales. Existen dos empresas derivadas a países como Singapur (92.7%),

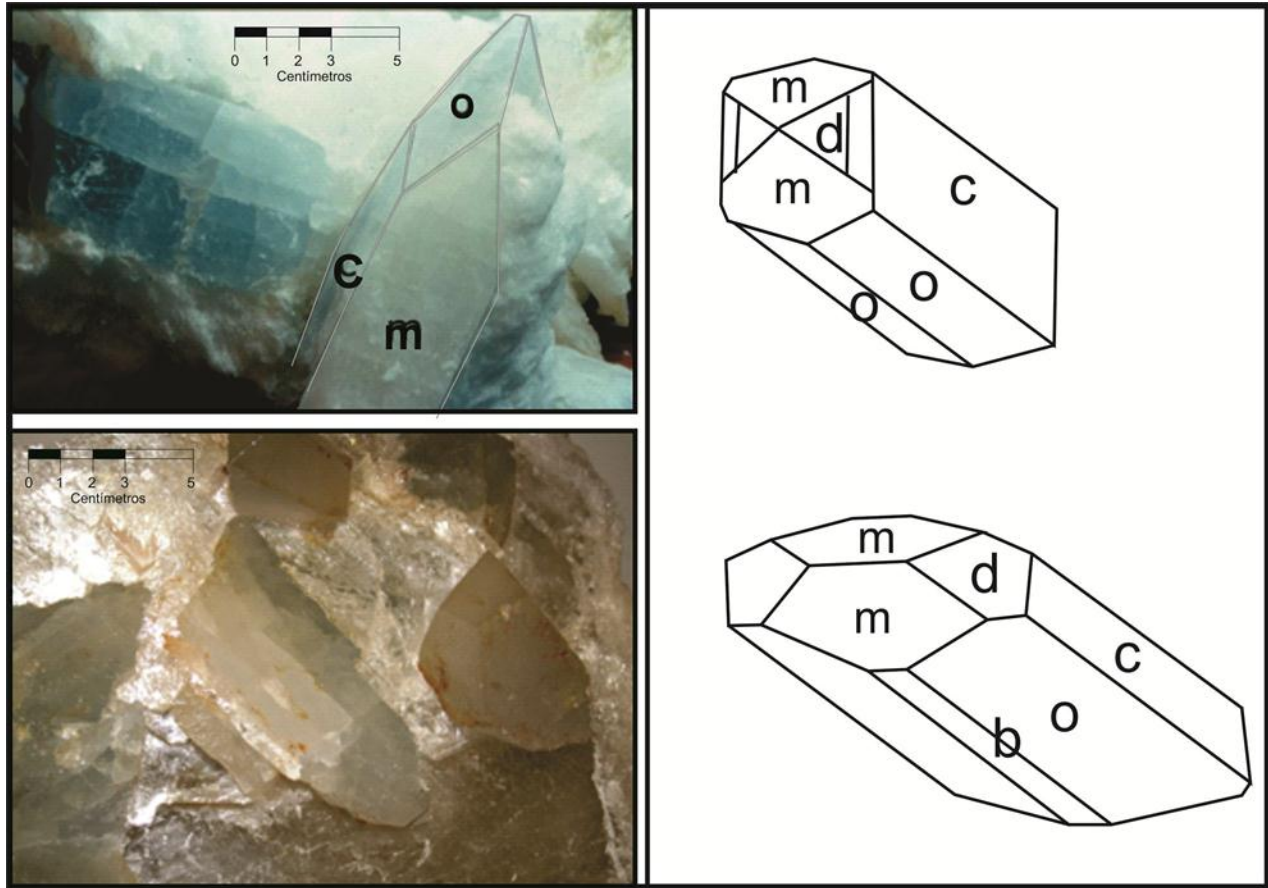
productoras de carbonato de estroncio en México: Solvay Química y Minera, S. A. de C. V. y Compañía Minera la Valenciana, S. A. de C. V. La mayor parte de la importación de estroncio de Estados Unidos proviene de México. Los principales productores de celestina en el mundo son México, España, Turquía y China. México exporta celestina y sus

básicamente como carbonato de estroncio, a Estados Unidos en un 4.1%, como carbonato de estroncio, óxido, hidróxido y peróxido de estroncio y mineral de celestina y a Japón con 3.2% como carbonato de estroncio. El valor promedio de la celestina importada de México ronda entre los 70 a 60 Dlls./Tonelada, el del carbonato de estroncio entre 0.50 Dlls. /Kg y el del nitrato de estroncio de 3.07 Dlls. /Kg. En 2002, España fue el principal país productor de este mineral a nivel internacional con una participación de 43%; seguido de México, cuya participación se redujo de 46 a 30%, y China, con una proporción de 15%. El aumento de la producción de celestina de algunos países y en consecuencia los precios bajos, han obligado a los productores mexicanos a modificar sus estrategias de producción, cerrando temporalmente algunas minas y operando aquellas que les brindan mayores ventajas. Actualmente México es nuevamente líder en la producción.

Como se mencionó antes, recientemente la capacidad de producción de carbonato de estroncio de China ha aumentado y se comercializa en Asia y Europa, causando caídas en los precios de celestina y carbonato de estroncio; lo que ha llevado también a empresas competidoras a cerrar minas. Sin embargo, las reservas de celestina chinas son más pequeñas y de menor calidad que las de México, España ó Turquía. La demanda de carbonato de estroncio

en el mercado de tubos de televisión se mantiene creciente; China, Europa y Norteamérica son los principales mercados para estos aparatos y presentan los principales mercados potenciales para la industria de la celestina. Eventualmente la tecnología de pantallas planas de plasma disminuirá la demanda de carbonato de estroncio para pantallas de televisión, por lo que una alternativa para esta industria podría ser el plantear y realizar proyectos de investigación sobre usos alternativos de este mineral con el fin de encontrar nuevas aplicaciones y contrarrestar la caída del consumo.

La celestina cristaliza en el sistema ortorrómbico, de hábito comúnmente tabular paralelo a  $\{001\}$  o prismático paralelo a “a” o “b” (Figura 1). También radial, fibroso o granular. Con crucero en dos direcciones, uno paralelo a  $\{001\}$  perfecto y otro paralelo a  $\{210\}$  bien desarrollado. Su dureza es de 3 a 3.5 y su gravedad específica de 3.95 a 3.97. Tiene un lustre de vítreo perlado y su color es ligeramente azul, aunque puede ser blanco, incoloro, amarillo, raras veces verde o rojizo y a veces es fluorescente. Es transparente a traslúcida, con raya blanca. El bario puede sustituir al estroncio en la red cristalina, de tal forma que una solución sólida completa existe entre barita ( $\text{BaSO}_4$ ) y celestina, aunque son raros los miembros intermedios. En temperaturas ordinarias sólo existe una serie limitada entre anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y celestina ( $\text{SrSO}_4$ ).



**Figura 1.** Cristales de celestina. Formas: c {001}, o {011}, d {101}, m {210}, l {104}.

### Metodología.

Antes de proceder al análisis microtermométrico de las inclusiones fluidas (IF) se realizó primeramente un estudio petrográfico convencional de las asociaciones minerales objeto de estudio (celestina), así como de las diversas fases minerales, es necesario llevar a cabo un estudio petrográfico de las diversas asociaciones de inclusiones fluidas presentes. La petrografía convencional debe llevar al establecimiento de una secuencia paragenética, con una identificación del tiempo relativo de formación de eventos y micro-eventos (definidos como etapas, sub-etapas, asociaciones y paragénesis minerales). Tal secuencia permite ubicar en un marco temporal los fenómenos geológicos asociados a la precipitación de los

minerales que la componen, lo cual incluye el atrapamiento de inclusiones fluidas. La petrografía de inclusiones fluidas asume el mismo esquema operativo, la definición y ordenación relativa de eventos, aunque a micro escala. Sin embargo la petrografía de inclusiones fluidas, al igual que la petrografía convencional, posee ciertas particularidades. Así, los objetivos básicos de la petrografía de inclusiones fluidas pueden resumirse como determinación de la presencia y las relaciones espaciales de asociaciones o grupos discretos genética, temporal y estadísticamente significativos de inclusiones fluidas con los minerales que las contienen.

Del análisis microtermométrico en inclusiones fluidas se obtienen tres tipos fundamentales de información,  $T_e$  = temperatura eutéctica del

sistema,  $T_{ff}$  = temperatura de fusión del último cristal de hielo dentro de la inclusión, y  $T_h$  = temperatura de homogeneización de fases. El análisis se realiza con la ayuda de un microscopio petrográfico de luz transmitida, de 1000 aumentos, al que se le ha adicionado una platina térmica que permite el calentamiento de especímenes hasta los + 650 °C, y un sistema de enfriamiento a base de nitrógeno líquido que baja la temperatura hasta - 200 °C. El método consiste en provocar la solidificación (bajo observación microscópica) de las fases fluidas, mediante la disminución progresiva de la temperatura (hasta -200 °C). El punto de solidificación de una sustancia es función de su contenido salino, por lo cual esta determinación permite el cálculo del porcentaje de sales disueltas en la fase acuosa en fluidos subsaturados. La temperatura de fusión es la temperatura a la cual el último cristal de hielo en una inclusión previamente congelada desaparece. Por convención, la salinidad es calculada (usando los datos de Bodnar 1994, Potter 1977, Potter y Brown 1975 y 1977) a partir de la  $T_{ff}$  asumiendo que el fluido solo contiene agua y NaCl. El análisis a altas temperaturas se fundamenta en homogeneizar las diferentes fases presentes a medida que se eleva la temperatura, así como obtener información sobre la temperatura de decrepitación (explosión) de la inclusión. El proceso de calentamiento se efectúa exactamente sobre las mismas inclusiones que se analizaron a baja temperatura, y es indispensable este análisis antes de calentarlas, ya que existe la posibilidad de que se produzca una decrepitación, sobre todo cuando los fluidos son muy densos. La temperatura de homogeneización brinda información sobre la temperatura de formación del cristal y las temperaturas de fusión sobre la salinidad del fluido. Los procesos de enfriamiento y calentamiento de las muestras se realizan a una velocidad lenta (1°C por minuto) a fin de permitir el equilibrio de las fases, y detectar ópticamente los fenómenos de fusión y homogeneización. Sabiendo que el rango de temperaturas de observación es de - 200° a + 650°C, hacen del método un proceso meticuloso.

Finalmente es importante mencionar que los datos de  $T_{ff}$  y  $T_h$  obtenidos deben de corregirse usando una curva de calibración para el equipo, construida con estándares de puntos de fusión conocidos, con la finalidad de tener una base de referencia para el manejo de los resultados, cabe mencionar que los equipos modernos como presentan directamente una auto corrección como la platina tipo LINKAM -THMSG-600 que se utilizó en este trabajo.

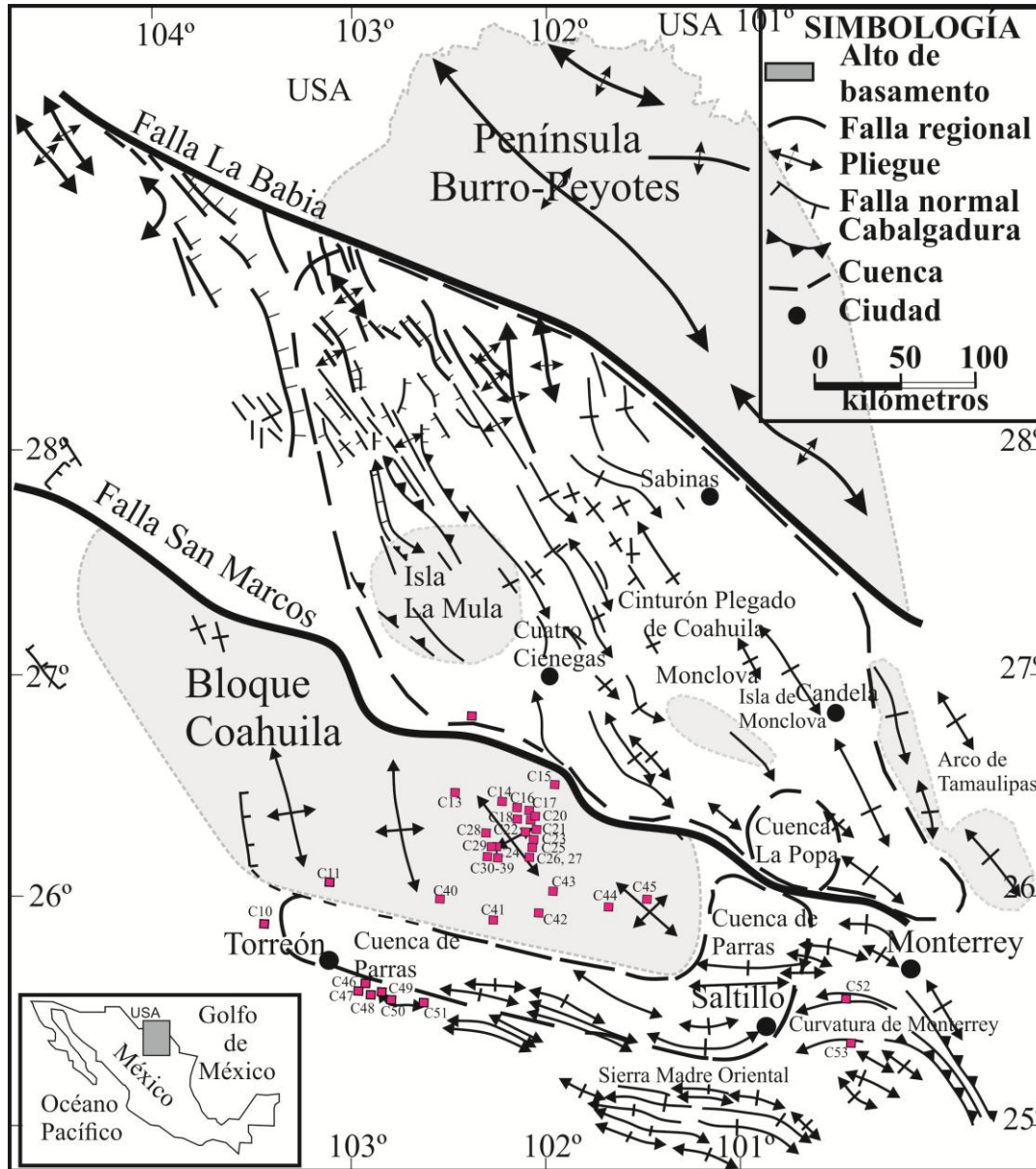
### **Geología regional y la plataforma de Coahuila.**

Los principales elementos tectónicos creados en el Noreste de México durante la etapa del “*rifting*” del Triásico comprenden altos de basamento entre los que destacan el Bloque Coahuila (ó plataforma de Coahuila), Península de Burro-Peyotes, el arco de Tamaulipas y las Islas de La Mula y Monclova, así como bloques bajos de basamento que forman la Cuenca de Sabinas (Figura 2). El Bloque Coahuila es un alto de basamento que está intrusionado por rocas graníticas a granodioríticas de edad permo-triásica (Wilson, et al., 1984). Hacia el oeste, en el área del Valle Acatita - Las Delicias, el bloque presenta una sucesión volcanoclástica y flysh del Pensilvánico Medio al Pérmico. Este bloque esta delimitado al norte por una falla lateral izquierda conocida como la falla San Marcos la cual se cree que estuvo activa durante la etapa de *rifting* del Triásico Tardío al Jurásico Tardío, al sur se delimita por el lineamiento lateral izquierdo Torreón-Monterrey (Anderson y Schmidt, 1983), localizado a lo largo de la cuenca de Parras. Actualmente, el área ocupada por este bloque se caracteriza por la presencia de carbonatos de plataforma del Cretácico débilmente deformados por la Orogenia Laramide (Imlay, 1936; Charleston, 1981; Johnson, 1989; C. A., Johnson, et al., 1991). La distribución de yacimientos de celestina en Coahuila, coinciden con la posición de elementos paleogeográficos Jurásicos relacionados a las cuencas petroleras de Sabinas y Chihuahua y es lo que se denomina “La

plataforma de Coahuila”, la cual esta conformada por un complejo de rocas paleozoicas que permanecieron emergidas hasta el Aptiano tardío – Albiano. Entre el Jurásico-Cretácico inferior , la cuenca de Sabinas recibió más de 1200 m de sedimentos clásticos, carbonatos y algunas evaporitas (Formación Yesos Minas Viejas, Zuloaga, La Caja, Menchaca, San Marcos y Taraises). El Cretácico medio se caracterizó por el desarrollo de una extensa plataforma con un arrecife bien desarrollado (Fm. Cupido) de hasta 880 m de espesor. Plataformas mayores, separadas por una cuenca más profunda, se desarrollaron durante el Cretácico tardío. La Fm. Aurora, un arrecife calcáreo con un espesor de

600 m se depositó sobre la Fm. La Peña, que es una secuencia de lutitas y lutitas calcáreas de 20-60 m de espesor que descansa sobre la Fm. Cupido, pero sobre la plataforma de Coahuila se presenta como un cambio de facies con la Formación Acatita: Es en estas unidades litológicas donde se encuentran los mantos de celestina. Hacia el fin del Cretácico, el material terrígeno aumentó y dominó sobre los carbonatos. Estos terrígenos se formaron por la erosión de nuevas tierras altas producidas por las etapas tempranas de la Orogenia Laramide, que se extendió desde el Turoniano hasta el Terciario medio.





**Figura 2.** Delimitación de la Provincia de celestina y distribución de yacimientos donde: (C1) Oasis; (C2) Elvia; (C3) Max II; (C4) El Gari, El Cuadrangular; (C5) El Tule; (C6) La Victoria; (C7) Santa María; (C8) Las Peñitas; (C9) La Noria; (C10) Pirámide III; (C11) La Candelaria; (C12) Angélica; (C13) El Lucero; (C14) San Marcos; (C15) Blanquita; (C16) San José; (C17) Sotolito; (C18) Ocotillo; (C19) San Fernando; (C20) El Quemado; (C21) Ampliación San Marcos, Prospecto 5; (C22) Australia; (C23) Montejano I; (C24) Montejano II; (C25) El Latrisco; (C26) La Bola; (C27) La Carroza; (C28) La Tinaja; (C29) San Lorenzo; (C30) El Venado; (C31) Campo Patricio 2; (C32) Campo Patricio 1; (C33) El Diablo; (C34) El Volcán; (C35) Campo Patricio 4; (C36) Campo Patricio 3; (C37) Campo Patricio 5; (C38) La Chenta Norte; (C39) La Chenta Sur; (C40) El Caviar; (C41) La Guadalupana; (C42) La Ilusión; (C43) Del Rincón; (C44) La Yesuda; (C45) San Agustín; (C46) La Discordia; (C47) San Lorenzo 3; (C48) San Luis; (C49) Santo Tomás; (C50) Cerro Bola; (C51) La Milagrosa; (C52) La Flor; (C53) Ampliación La Flor.

### ***Geología local.***

Como ya se mencionó, una provincia importante a nivel mundial de celestina ( $\text{SrSO}_4$ ) se encuentra en el NE de México y ésta ubicada en la Plataforma de Coahuila (Figura 2), y específicamente sobre la sierra de Alamitos que está constituida casi en su totalidad por rocas sedimentarias carbonatadas de la Formación Aurora y Acatita. En efecto, la unidad predominante son las calizas de la Formación Acatita, que consisten en una interstratificación de calizas, yeso, dolomía y anhidrita (Humphrey, 1956); cuya distribución se restringe a la Plataforma de Coahuila, teniendo su límite a la base, al interdigitarse con facies arrecifales de la Formación Cupido. Las calizas dolomíticas presentan una textura sacaroidea de color gris oscuro. En general se observa la predominancia de yesos en la Formación Acatita en lo que pudiera haber sido el relieve más alto de la preexistente Plataforma de Coahuila, cambiando gradualmente hacia los bordes a dolomías, con intercalaciones de yesos y calizas de plataforma dolomitizadas. Por su posición estratigráfica, la Formación Acatita se considera del Albiano Inferior y Medio.

La Formación Acatita fue propuesta por Humphrey (1956), como una unidad sedimentaria de facies lagunar del Albiano Inferior y Medio, que ocurre sobre un área considerable del Sur-Centro de Coahuila y Noreste de Durango. Como localidad tipo fue asignado el frente Suroeste de la Sierra de Acatita, entre el Cañón Grande y Las Uvas, Coahuila, y la sección tipo se considera en el Rancho Acatita. En la localidad tipo, la formación descansa sobre un miembro basal calcáreo potente, en forma de escarpe, sobre calizas impuras y clásticos de la formación Las Uvas, a la vez es cubierta por estratos con rudistas característicos a la Formación Aurora. La Formación Acatita fue acumulada en lagunas marginales que existieron sobre la Península de Coahuila. El basamento de la Península se hundió gradualmente, pero su superficie permaneció

aproximadamente al nivel del mar, lo que propició el depósito de evaporitas. Periódicamente hubo una mayor circulación de las aguas con vida marina capaz de florecer temporalmente y se depositaron sedimentos que dieron lugar a capas de caliza y dolomías fosilíferas interstratificadas con yesos. Al mismo tiempo en las aguas someras que circundaban la península, con circulación marina normal, prevalecieron rudistas en los bancos submarinos. Por su parte La Formación Aurora está constituida por calizas de color gris claro, en estratos gruesos a masivos, tipo mudstone con nódulos de pedernal, fosilífera y presenta estilolitas paralelas a la estratificación. Su espesor es variable oscilando entre 400 a 600 m, por su posición estratigráfica y por su contenido faunístico se considera esta formación del Albiano. Se correlaciona con la Formación Acatita, parte inferior de la Formación Glen Rose y la parte media de la Formación el Abra. Por su litología y contenido faunístico esta facies calcárea se depositó en un medio de plataforma carbonatada, de aguas profundas (Golfo de Sabinas) y con un desarrollo arrecifal (Toucasia, caprina y miliólidas), bordeando la ya sumergida Isla de Coahuila.

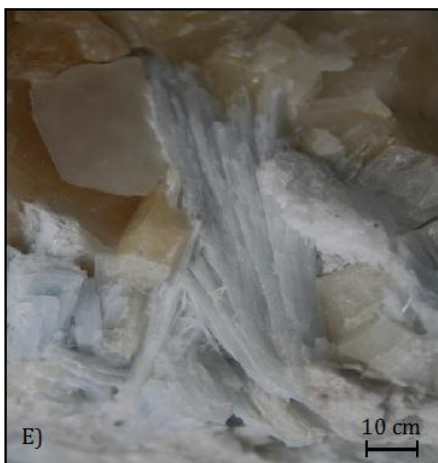
### **Características de los yacimientos.**

En la plataforma de Coahuila existen varias minas de celestina como El Venado, El Diablo, La Tinaja, La Víbora, El Lucero y El Volcán (figura 2). Los cuerpos mineralizados son estratoligados, es decir, concordantes a la estratificación y están alojados en calizas de la Formación Acatita (figura 3). El espesor de estos mantos es en promedio de 3 m, con longitudes que rebasan los 100 m, constituidos esencialmente de bandas claras y oscuras de celestina texturalmente similares a "ritmitas", así como de celestina masiva, con presencia de yeso y calcita. Los mantos generalmente son horizontales o con buzamientos muy leves (de  $10^\circ$  a  $25^\circ$ ), debido a que en la zona no existe una deformación significativa. En la roca encajonante

y de manera adyacente a la mineralización, se aprecia una dolomitización.

Presentan gran variabilidad de texturas, desde reemplazamientos coloidales de grano fino, hasta cristales euhedrales a subhedrales de pocos centímetros, con texturas radiales parecidas a “abanicos”; en el caso de las bandas rítmicas de tonos claros y oscuros, las bandas oscuras constituyen roca encajonante parcialmente

reemplazada, sobre las cuáles, se desarrollan texturas de crecimiento radial, constituyendo la mineralización en forma de cristales euhedrales a subhedrales a grano medio a fino en las bandas claras, semejantes a texturas de enrejado; además, es común la presencia de espacios vacíos.



**Figura 3.** Características del yacimiento. a) Carácter estratoligado del yacimiento, donde se aprecia la leve deformación y el método de explotación. De lado a lado en la fotografía hay 200 m. b) Acercamiento a la entrada de uno de los socavones. c) Dentro de la mina, en la parte inferior, la mineralización consiste de bandas claras y oscuras de celestina de espesor centimétrico con abundante presencia de materia orgánica, texturalmente similares a ritmitas; esta parte tiene un espesor promedio de 1.2 m. D-E-F) En la parte superior existe celestina masiva, con cristales de hábito radial de tamaños disimétricos con ganga de calcita.

### Resultados Microtermométricos.

Se analizaron muestras de diez minas de la zona de la Sierra de Alamitos, los resultados de manera resumida se presentan en la tabla 2. Se sabe que una inclusión fluida se forma cuando en una cavidad o laguna de crecimiento de un mineral, se atrapan uno o varios fluidos en los cuales puede además haber uno o más minerales sólidos (cristales: hijos ó atrapados). De esta manera, las inclusiones fluidas son trazas microscópicas de fluidos sub-superficiales o profundos, de diferentes unidades de tiempo (muy antiguas o muy jóvenes) que quedan atrapadas en los minerales formadores de roca. Los tamaños de las inclusiones normalmente son inferiores a las 100  $\mu\text{m}$ , en su mayoría están entre

5 y 30  $\mu\text{m}$ , como es el caso de las muestras estudiadas. Los fluidos atrapados pueden ser líquido, vapor o fluidos supercríticos y su composición puede incluir esencialmente agua pura, salmueras de varias salinidades, gas o líquidos gaseosos y silicatos, sulfuros o mezclas de carbonatos entre otros. Dentro del estudio de las inclusiones fluidas (IF), la determinación de su origen es una de las etapas más importantes, durante esta tarea, se crean esquemas con relación al “*timing*” de atrapamiento de las IF relativo al mineral que las contiene. Se evalúan estas paragénesis con el objetivo de determinar cual de ellas esta relacionada con el problema a resolver. En el caso del presente estudio la mena es mono-mineral de celestina, con ganga de yeso y calcita.

**Tabla 2.-** Resumen de los resultados microtermométricos de las minas de estroncio. Donde:  $T_h$ = temperatura de homogeneización,  $T_m$ = temperatura de fusión del hielo.

Localidad	Mineral	$T_h(^{\circ}\text{C})$ Promedio	$T_m(^{\circ}\text{C})$ promedio	% peso eq. NaCl
El Tule	Celestine	135	-6.3	9.6
San Agustín	Celestine	128	-13.5	17.34
Lucero	Celestine	107.48	-6.97	10.5
Ana Gabriela	Celestine	121	-9	12.85
Volcán	Celestine	118.72	-8.26	11.96
Venado	Celestine	122.14	-9.68	13.58
Diablo	Celestine	109.63	-8.13	11.83
Tinaja	Celestine	129.6	-5.88	9.09
Víbora	Celestine	95	-6.5	9.86
Berrendo	Celestine	181.7	-11.79	15.8

La clasificación más usual (*in* Bodnar 2003a) reconoce tres términos que son usados para clasificar el origen de la IF. Estos términos a saber, son: primario, secundario y pseudo-secundario. El término primario se usa normalmente para referirse a las inclusiones que han sido atrapadas como un resultado directo del crecimiento del cristal. Las inclusiones

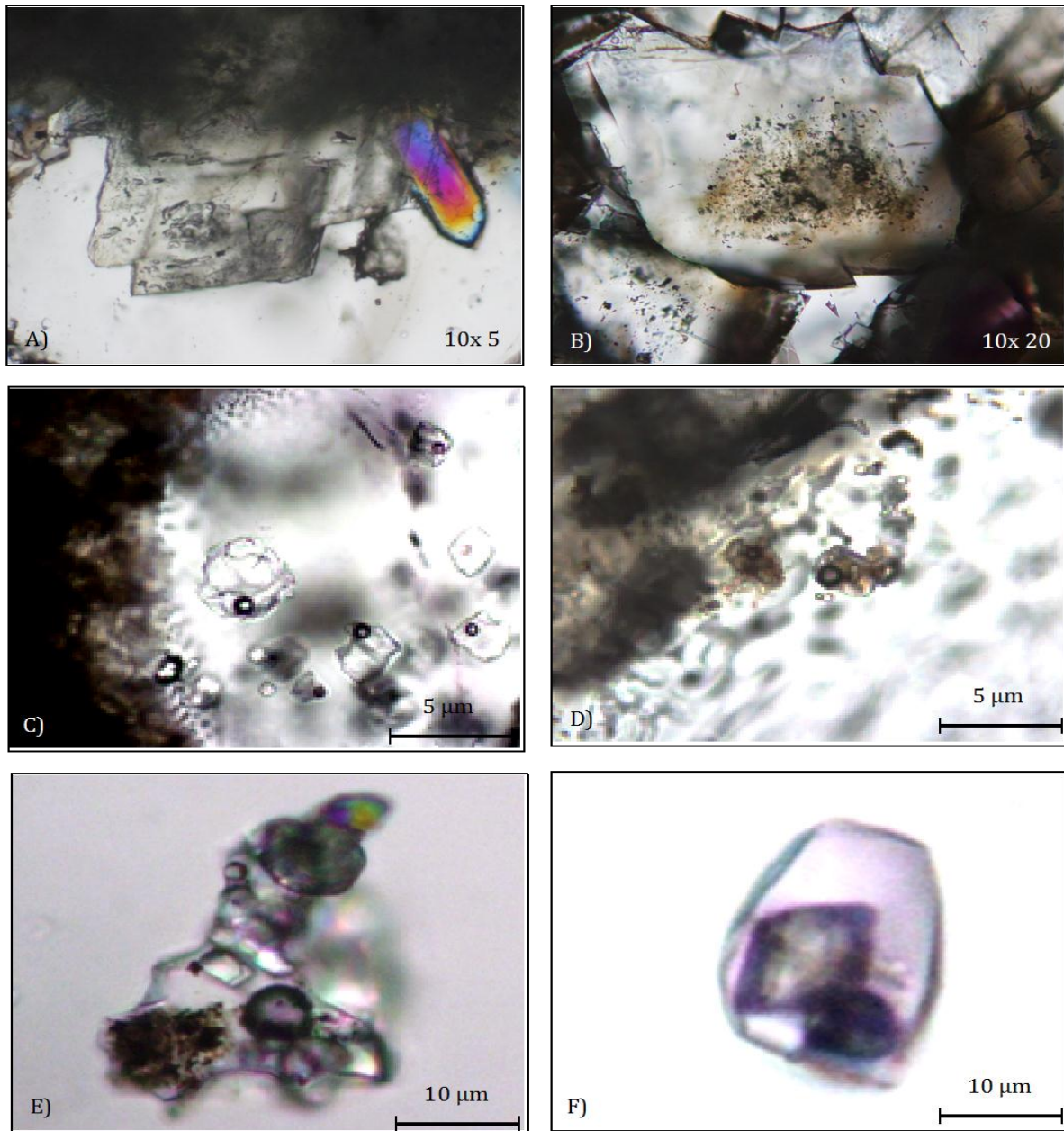
secundarias se forman después que el cristal ha concluido su desarrollo, normalmente cuando se rellenan micro fracturas o rasgos de deformación que cortan al cristal. Bajo este criterio las IF estudiadas de la Sierra de Alamitos son primarias por estar relacionadas al crecimiento del cristal, las secundarias no fueron analizadas. En la actualidad, otro intento de clasificación muy

extendido es el de indicar con letras los diferentes tipos en función de las fases principales presentes a temperatura de laboratorio. Antes que cualquier asociación de inclusiones fluidas pueda ser utilizada para estudiar la evolución térmica y química de un sistema geológico, se debe estar seguro de que los fluidos atrapados en las inclusiones sean representativos de los fluidos existentes en el momento de la formación de la inclusión, esto es, deben de cumplir con tres premisas conocidas como “Reglas de Roedder” las cuales establecen que (Bodnar 2003a):

- 1). Las inclusiones deben ser atrapadas en una fase homogénea.
- 2). Las inclusiones representan un sistema isocórico.

- 3). Después de su atrapamiento, nada ha sido adherido a, o removido de, las inclusiones.

Estos criterios fueron aplicados en las muestras analizadas, así en la figura 4 se puede apreciar el carácter primario de las IF observadas tanto en la ganga de calcita y dolomita como en la celestina, por los grados de relleno que presentan se pueden definir como del tipo líquido + vapor (L+V) a líquido dominante, ya que el grado de relleno entre estas fases oscila entre 5-10 % de V a 90-95% de L, igualmente se aprecian algunos cristales atrapados de dolomita y la presencia de materia orgánica, lo que asegura el sincronismo del evento mineralizante y de alteración diagenética (dolomitización).



**Figura 4.-** Detalle al microscopio petrográfico. A).- cristales de dolomita, B).- Detalle de un cristal de dolomita donde al centro muestra una congregación de inclusiones fluidas (puntos negros) de carácter primario, C).- Inclusiones fluidas primarias de salmuera que contiene una fase vapor + líquido, D-E-F).- Inclusión fluida que contiene en su interior cristales hijos de dolomita y materia orgánica (color amarillo-café).

De acuerdo a los resultados que se muestran en la tabla 2, se puede apreciar que la celestina se formó en un rango de temperatura mínima de formación entre  $T_h = 95^\circ\text{C}$  a  $181^\circ\text{C}$ , con una salmuera de 9.6 a 17.3 % Eq. Peso NaCl. Estos son los rangos térmicos y de salmuera que

caracterizan a los yacimientos denominadas del Tipo Mississippi Valley ó MVT.

#### **Discusión.**

Como ya se mencionó en los párrafos anteriores:  
1) Los depósitos están alojados en unidades

estratigráficas que contienen rocas carbonatadas de plataforma y/o evaporitas, formadas durante las etapas iniciales de transgresiones marinas en fosas tectónicas que describen rasgos paleogeográficos como el Golfo de Sabinas, y en altos de basamento o pilares tectónicos que describen rasgos paleogeográficos como el Bloque de Coahuila; 2) Los depósitos están localizados sobre los límites (o en sus proximidades) de los pilares tectónicos constituidos por rocas del basamento, o bien, 3) están localizados en las proximidades de grandes sistemas de fallas que han sido reactivadas en varias épocas, y derivan o son el reflejo de grandes estructuras generadas durante la apertura del Golfo de México como es la falla de San Marcos. 4) Igualmente, los mantos de celestina están caracterizados por presentar estructuras bandeadas texturalmente similares a “ritmitas”, compuestas por bandas “claras” y “oscuras” de celestina alternadas. Estas texturas, junto con la presencia de abundante materia orgánica, sugieren que dichos mantos pudieron tener un origen a partir de salmueras de cuenca por procesos similares a los que originan los depósitos del tipo Mississippi Valley y 5) Las temperaturas de formación de la celestina en el presente estudio oscilan entre 95° a 181°C. Kesler y Jones (1981) llevaron a cabo el análisis de la composición isotópica en azufre y estroncio de muestras de barita y celestina de todo el Estado de Coahuila y concluyen, con base en datos analíticos, que tanto los depósitos de celestina como de barita, probablemente se formaron a partir de elementos derivados de una cuenca sedimentaria durante procesos diagenéticos. Así mismo, proponen que el Ba y el Sr de la barita y la celestina, muy posiblemente provienen del lavado de rocas clásticas presentes en el basamento.

El estudio del origen de este tipo de depósitos ha de estar basado además del comportamiento isotópico, en el conocimiento previo de los diferentes procesos físicos y químicos que dan lugar a la formación de acumulaciones anómalas de sulfatos de cationes no comunes (Sr, Ba, Ca

ver Hanor 1968, 1980, 1994). Los fluidos implicados en la génesis de dichos yacimientos pueden tener diversos orígenes (González-Partida et al., 2000): a) fluidos hidrotermales oxidantes (con sulfato) de origen profundo; b) fluidos hidrotermales profundos que reaccionen con soluciones carbonatadas de la misma fuente; c) aguas connatas (atrapadas en los sedimentos) que debido a procesos diagenéticos (illitización de los feldespatos, p. e.) se enriquecen en bario o estroncio y posteriormente reemplazan formaciones de sulfatos pre-existentes; y d) soluciones sulfatadas superficiales. Geoquímicamente, en los sistemas hidrotermales, la solubilidad de los sulfatos se incrementa con el incremento de la salinidad y decrece al disminuir la temperatura. Igualmente, se ha reportado la precipitación directa de sulfatos en las surgencias de fluidos hidrotermales en los fondos marinos (*white smokers*), debido a la interacción entre esta agua caliente y salmuera marina. En el agua del mar, los sulfatos están presentes en altas concentraciones y pueden precipitar por calentamiento, ya que presentan una solubilidad inversa (Hanor 1968, 1980, 1994). Si una solución rica en sulfatos ebulle, estos pueden precipitar al mismo tiempo que lo hacen otros minerales que tienen baja solubilidad. Y finalmente, pueden tener un origen bacteriano.

Las composiciones isotópicas de  $\sigma^{34}\text{S}\%$  reportados por Kesler 1977 y Kesler y Jones 1981 para algunos mantos de celestina de la plataforma de Coahuila es alrededor de  $\sigma^{34}\text{S}\%$  = +17.5 ‰, extendiéndose a composiciones más ligeras, mientras que la barita muestra una dispersión mas amplia ( $\sigma^{34}\text{S}\%$  = +9.1 ‰ a +38.3 ‰); por otro lado, la composición isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  para la celestina, se agrupa alrededor de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  = 0.70765 y para la barita se presentan datos desde  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  = 0.7077 a 0.7094. Estos depósitos comúnmente presentan alteraciones hidrotermales de baja temperatura, como dolomitización y silicificación incipientes, aunque también pueden estar ausentes; ésta zona

alterada no se extiende a más de 1m hacia el alto y bajo de la estructura mantiforme.

### Conclusión.

Se interpreta a los depósitos estratoligados de la plataforma de Coahuila como similares al tipo *Mississippi Valley*, y además de asumir el origen de éstos a partir de salmueras de cuenca, podemos argumentar que, las salmueras de cuenca (sometidas al gradiente geotérmico y a la presión litostática de cada cuenca en particular) se desplazaron debido a niveles piezométricos y a cambios en la densidad del fluido, producto de un gradiente geotérmico anómalo. Estas aguas evolucionadas, lixivian a los metales de las arcosas y sedimentos clásticos en las cuencas (formaciones La Joya, La Gloria, La Casita, Las Uvas), hasta sustituir el calcio de las anhidritas de la formación Acatita, por los metales en solución, debido a la baja solubilidad de los niveles evaporíticos.

### Agradecimientos.

Agradecemos el apoyo parcial financiero a partir del proyecto UNAM-PAPIIT- IN101113-3, a los técnicos que apoyaron en la preparación de las muestras y a los revisores de este trabajo.

### Bibliografía.

Ohle, E.L., 1959, Some considerations on determining the origin of ore deposits of Mississippi Valley-type: *Economic Geology*, 54, 769-789.

Kisvaransayi, G., Grant, S.K., Pratt, W.P., Koenig, J.W. (eds.), 1983, International Conference on Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Deposits, Proceedings Volume: Rolla, Missouri, EUA, University of Missouri-Rolla, 603 p.

Sangster, D.F., 1983, Mississippi Valley-Type deposits: a geological mélange, en Kisvaransayi, G., Grant, S. K., Pratt,

W.P., Koenig, J.W. (eds.), International Conference on Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Deposits, Proceedings Volume: Rolla, Missouri, EUA, University of Missouri-Rolla, 7-19.

Sverjensky, D.A., 1986, Genesis of Mississippi Valley-type lead-zinc deposits: *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 14, 177-199.

González-Sánchez, F., Puente-Solís, R., González-Partida, E., Camprubí, A., Estratigrafía del Noreste de México y su relación con los yacimientos estratoligados de fluorita, barita, celestina y Zn-Pb. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 59 (1), 32-45. 2007.

Bodnar R. J. (2003a): Introduction to fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds.. *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, short Course Series Vol. 32, 1-8.

Potter, R. W. (1977): Pressure corrections for fluid inclusions homogenization temperatures based on the volumetric properties of the system NaCl- H<sub>2</sub>O: *United States Geological Survey Journal of research*, v. 5, p. 603-607.

Potter, R. W. II and Brown, D. L. (1975): The volumetric properties of aqueous sodium chloride solutions from 0°C to 500°C at pressures up to 2000 bars based on a regression of the available literature data: *United States Geological Survey Open File Report*, 75-636, 31 p.

Potter, R. W. II and Brown, D. L. (1977): The volumetric properties of aqueous sodium chloride solutions from 0°C to 500°C at pressures up to 2000 bars based on a regression of available data in the literature: *Preliminary steam tables for*



NaCl solutions: United States Geological Survey Bulletin 1421-C, p C1-C36.

Wilson, J.L., Ward, W.C., Finneran, J. (eds.), 1984, A field guide to Upper Jurassic and Lower Cretaceous carbonate platform and basin systems, Monterrey-Salttillo area, northeast Mexico: Gulf Coast Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 76 p.

Anderson, T.H., Schmidt, V.A., 1983, The evolution of Middle America and the Gulf of Mexico-Caribbean region during Mesozoic time: Geological Society of America Bulletin, 94, 941-966.

Imlay, R.W., 1936, Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico, Part IV, Geology of the western part of the Sierra de Parras: Geological Society of America Bulletin, 47, 1091-1152.

Charleston, S., 1981, A summary of the structural geology and tectonics of the state of Coahuila, Mexico, en Smith, C.I. (ed.), Lower Cretaceous stratigraphy and structure northern Mexico: West Texas Geological Society Publication, 81-74, 28-36.

Johnson, C.A., 1989, Structural Analysis of the fold and thrust belt in the vicinity of Monterrey, northeastern Mexico: Houston, Texas, EUA, Exxon Productions Research Company Report (inédito), 40 p.

Johnson, C.R., Ward, W.C., Goldhammer, R.K., 1991, Mechanisms

for high-frequency cyclicity in the Upper Jurassic limestones of northeastern Mexico: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 75, 603p.

Humphrey, W.E., 1956, Tectonic framework of northeast Mexico: Gulf Coast Association of Geologists, Society Transactions, 6, 25-35.

Kesler, S.E. Jones, L.M., 1981, Sulfur and strontium isotopic geochemistry of celestite, barite and gypsum from the Mesozoic basins of North-eastern Mexico: Chemical Geology, 31, 211-224.

Hanor JS (1968) Frequency distribution of compositions in the barite- celestite series. Am Mineral 53:1215–1222

Hanor JS (1980) Dissolved methane in sedimentary brines: Potential effect on the PVT properties of fluid inclusions. Econ Geol 75:603–609

Hanor JS (1994) Origin of saline fluids in sedimentary basins. In: Parnell J (ed) Geofluids: origin and migration of fluids in sedimentary basins. Geol Soc London, Spec Publ 78:151–174.

González-Partida E., Carrillo-Chávez A. & Martínez-Ibarra R. Fluid inclusions from anhydrite related to the Chicxulub crater impact breccias, Yucatan, México. *Int. Geology Review*, 42, 279-288, 2000.

Kesler, S.E., 1977. Geochemistry of manto fluorite deposits, northern Coahuila, Mexico. *Economic Geology*, vol. 72, pp. 204-218.