MINERALES PARA FERTILIZANTES EN MEXICO

Zoltan de Cserna*

RESUMEN

Los minerales mas importantes para la producción de fertilizantes son los fosfatos, yeso, azufre, sales de potasio y los nitratos. La ocurrencia natural de estas substancias está perfectamente definida por procesos geológicos. Los fosfatos, se presentan en regiones que en antaño eran zonas de transición de un ambiente cratonal a geosinclinal como resultado de surgencias, en grutas y cavernas habitadas por murciélagos, o bien en asociación con yacimientos de hierro de segregación magmática. El azufre se localiza en los casquetes de domos salinos, en la zona de contacto de algunas masas diapíricas de yeso o anhidrita con calizas plegadas, y en algunos volcanes. El yeso y anhidrita acumularon en cuencas de evaporación, ya sea en terrenos netamente continentales de agua dulce o costeros con la entrada periódica del agua del mar, en contraste con las sales de potasio que invariablemente precipitaron de salmueras marinas. Los nitratos eminentemente se forman en regiones desérticas, principalmente como resultado de eflorescencia.

Yacimientos de fosfato originados en la zona de transición de una región cratonal a una de geosinclinal se conoce del Jurásico Superior de la parte meridional del Estado de Coahuila, septentrional de Zacatecas y de áreas circundantes que representan una reserva de más de 70 millones de toneladas con una ley promedio de 18 por ciento de P_2O_5 . Como regiones geológicamente favorables para el descubrimiento de yacimientos de fosfato de este tipo se consideran el Triásico Superior de Sonora, y el Terciario-Cuaternario de la parte occidental de la Baja California, la parte oriental de la Planicie Costera del Golfo de México y la parte septentrional de la Península de Yucatán, — regiones que acusan semejanzas geológicas con la Península de Florida y con la parte meridional de la Planicie Costera del Atlántico.

La producción de azufre en México, sin considerar los campos petroleros, se obtiene de los casquetes de domos salinos localizados en la parte occidental de la Cuenca Salina del Istmo de Tehuantepec que acusan una reserva de mas de 60 millones de toneladas y de la zona de contacto de una masa diapírica de anhidrita con calizas plegadas cretácicas de San Luis Potosí. Se consideran las cuencas de evaporación jurásicas y cretácicas de Chihuahua-Coahuila, de Sabinas, de San Luis Potosí, de Guerrero, y de la parte oriental de la del Istmo, como geológicamente favorables para descubrir nuevos yacimientos.

No obstante que el yeso se produce en México de centenares de canteras para la industria de la construcción, no se tienen datos en cuanto a la utilización de este mineral para la agricultura. Las cuencas de evaporación jurásicas, cretácicas y terciarias de

**Investigador Titular de Tiempo Completo, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.*

El autor agradece el apoyo financiero para el desarrollo del presente estudio, brindado por el Banco Interamericano de Desarrollo. El Dr. Gabriel Dengo gentilmente invitó al autor para la elaboración de este estudio, mientras que el Ing. Guillermo P. Salas, puso a la disposición del autor informes inéditos en su poder.

Chihuahua-Coahuila, de Sabinas, de San Luis Potosí, de Guerrero, y de Puebla son yacimientos potenciales para el suministro de este mineral no sólo para la agricultura, sino para la producción de azufre en el futuro.

Sales de potasio aún no se producen en México para la agricultura. Indicaciones de la presencia de este mineral en el norte de Chihuahua y en el Istmo de Tehuantepec junto con las condiciones geológicas que se encuentran en esas regiones favorecen la consideración, tanto de la Cuenca de Chihuahua-Coahuila como la de Sabinas y del Istmo, como potenciales para el descubrimiento de yacimientos.

A pesar de que la superficie de México abarca grandes extensiones desérticas y semidesérticas, la importancia de minerales de nitratos para la agricultura es muy insignificante en vista de la gran riqueza petrolera del país junto con el amplio desarrollo de la industria química en este renglón.

INTRODUCCION

El estudio de minerales para fertilizantes, cuyos resultados se presentan a continuación, fue llevado a cabo a raíz de un convenio celebrado entre el Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial y el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Como modelo se tomó el reciente trabajo de Harrington, Ward y McKelvey (1966), que presenta un intento preliminar para señalar los minerales para fertilizantes en Sud América.

El primer estudio en México, en cierta forma semejante a lo antes mencionado pero de alcance mucho más reducido, es de Salas (1965) que presentó aspectos sobresalientes de los recursos no renovables para la agricultura mexicana. Se puede considerar como complemento de ese estudio, muy especialmente en lo que se refiere al azufre, el estudio de Salas (1967) que preparó en ocasión de la Séptima Sesión del Congreso Mundial del Petróleo.

Los resultados aquí presentados señalan claramente cómo y cuánto la Geología puede ayudar a desarrollar nuevas áreas al descubrir yacimientos aún no conocidos. Por otra parte, se señalan también minerales que en el futuro pueden ser considerados como yacimientos potenciales para la recuperación de algún otro mineral para la cual hasta ahora no han sido utilizados.

MINERALES PARA FERTILIZANTES Y SU HABITAT GEOLOGICA

Para el propósito del presente estudio, se han considerado solamente minerales, o sea, sustancias que se presentan en la naturaleza, junto con su tratamiento químico. Fertilizantes sintéticos competen más bien a la rama de la Ingeniería Química que a la Geología. Los minerales para fertilizantes con este criterio son los fosfatos, el azufre, el yeso, las sales de potasio y finalmente los nitratos. A continuación se presenta una descripción breve de las condiciones geológicas en las que estos minerales comúnmente se encuentran.

FOSFATOS, AZUFRE Y YESO.—Los fosfatos se presentan generalmente mezclados con carbonato de calcio y material detrítico como limo o arcilla.

Para poder suministrar esta sustancia de manera rápidamente asimilable a las plantas, la roca fosfática requiere un tratamiento por ácido sulfúrico. Por otra parte, el suministro de fertilizantes de fosfato es necesario principal-

mente a suelos que se han desarrollado en climas tropicales y, por consiguiente, éstos se encuentran generalmente bastante lixiviados. Para poder obtener el rendimiento óptimo de los suelos con la aplicación de fosfatos, en la mayoría de los casos el suministro de yeso también está indicado por los edafólogos. Por consiguiente, tanto a los fosfatos como al azufre y al yeso conviene tratarlos conjuntamente.

Existen tres tipos principales, y al mismo tiempo económicos, de ocurrencia natural de fosfato que son: (1) fosforitas marinas, (2) apatitas de segregación magmática y (3) guanos fósiles reconcentrados.

Las fosforitas marinas se presentan en sedimentos que se han acumulado sobre la plataforma continental en secuencias sedimentarias como resultado de surgencias (Sverdrup, Johnson y Fleming, 1946; Fleming, 1957). Las rocas que contienen las fosforitas son lutitas y limolitas con variable contenido de carbonato de calcio. Como ejemplos clásicos que se han acumulado sobre la plataforma continental en geosinclinales, se puede citar la Formación Phosphoria en los Estados de Idaho, Montana, Nevada, Utah y Wyoming del Permo-Carbonífero de los Estados Unidos de América (McKelvey *et al.*, 1959). En el Jurásico Superior de la parte centroseptentrional de México, la Formación La Caja contiene fosforitas de origen semejante (Figura 1; Rogers *et al.*, 1956, 1961). Yacimientos terciarios de fosforita marina, que se acumularon sobre una plataforma, se conocen en buena parte de la mitad meridional de la Planicie Costera del Atlántico de los Estados Unidos de América, desde Carolina del Norte hasta Florida (Brown, 1958). En México, la acumulación de fosforitas en la plataforma continental, por cierto de tamaño reducido, de la parte centro-occidental de la Península de Baja California, se conoce desde hace tiempo (Figura 1; Dietz *et al.*, 1942; d'Anglejan, 1967).

Por razones prácticas, la columna estratigráfica que se haya acumulado en un ambiente paleogeográfico correspondiente a una plataforma entre un cratón y un mar muy grande abierto, puede considerarse como roca madre potencial para encontrar fosforitas marinas de concentraciones variables (McKelvey, 1966).

La apatita, que es el mineral más importante en la recuperación de fósforo para la producción de fertilizantes, se presenta muy a menudo en yacimientos de hierro, considerados generalmente como de segregación magmática. Estos yacimientos a menudo contienen apatita. Alemania obtiene casi la mitad del suministro de fosfato para fertilizantes de la recuperación de fosfato al tratar las escorias o grasas de fundición de hierro que, generalmente, se denominan como "escoria Thomas". En México el yacimiento de hierro más grande y que se encuentra en explotación regular desde hace más tiempo es el Cerro Mercado, en las afueras de la Ciudad de Durango (Figura 1). En este yacimiento la apatita se presenta en combinación con la martita, que es la mena de hierro de este yacimiento (Salazar-Salinas *et al.*, 1923). Es lamentable que, al explotar este yacimiento por hierro, se ha desperdiciado hasta la fecha todo el fosfato que se pudiera recuperar.

Fosforita reconcentrada proveniente de guanos fósiles o subfósiles, se presentan típicamente en las islas del Pacífico y Atlántico meridionales. Además, se encuentran también como acumulaciones de cavernas. Las grutas y cavernas,

Fig. 1.—Mapa de México que muestra las regiones con la presencia de fosforita, probada y posible.

en sí, implican la existencia de rasgos cársticos que, a su vez, se limitan a regiones donde abundan calizas. Por consiguiente, áreas de serranías de caliza pueden considerarse como regiones potenciales para encontrar grutas y cavernas que han sido habitadas, principalmente por murciélagos, en el pasado geológico no remoto. El sistema de cavernas, generalmente, implica la presencia de dos o tres niveles sobrepuestos por donde las aguas han circulado. El fosfato de guano es disuelto y redepositado en grutas y oquedades debajo del nivel que fue habitado por los murciélagos y se presenta en formas irregulares, muy a menudo como estalagmitas y estalactitas del mineral llamado porcelanita, de alto contenido de P_2O_5 . Este tipo de yacimientos se conocen en muchos sitios de la parte oriental de México y han suministrado material de alta ley para la elaboración de fertilizantes de fosfatos, o bien de alimentos para la avicultura (Figura 1; Pérez y Wiggan, 1953).

El azufre como mineral se conoce principalmente de los casquetes de domos salinos, de la zona de contacto de anhidrita y caliza en regiones plegadas, o bien de volcanes. Además, se recupera también de los campos de hidrocarburos con alto contenido de gas amargo o agrio (*sour gas*). Los domos salinos se limitan a regiones que en el pasado geológico han sido ocupadas por cuencas cerradas de gran extensión, en las cuales, mediante la evaporación, se precipitaron de las salmueras, el yeso, sal común y las sales de potasio. Estas regiones quedaron posteriormente cubiertas por una secuencia gruesa de rocas detríticas que, por el peso de éstas, han dado origen a la ascensión de la sal formando estructuras diapíricas de las cuales las más comunes son los domos. Estos domos generalmente tienen un casquete compuesto de caliza y azufre. La explotación del azufre de este tipo, se hace mediante el procedimiento Frasch. En regiones donde la cuenca de evaporación de antaño ha sido cubierta por una potente secuencia de calizas, que posteriormente ha sido deformada por esfuerzos tangenciales y se presenta en la actualidad como una serie de anticlinales y sinclinales de calizas con núcleos de anhidrita, en éstas la zona de contacto entre el núcleo y los flancos contiene, muy a menudo, cantidades económicas de azufre.

En México, la región donde hasta la fecha se ha localizado la presencia de domos salinos con casquetes con azufre, se localiza en la parte septentrional del Istmo de Tehuantepec (Figura 2). Esta región constituye en la actualidad un importante centro azufrero del mundo (Márquez *et al.*, 1964).

El azufre relacionado con estructuras plegadas cuyos núcleos están formados por yeso o anhidrita, se presenta en varios sitios de la Sierra Madre Oriental de México. El sitio que se conoce desde hace más tiempo es el de Huascalám, San Luis Potosí (González-Reyna, 1951) y en la Sierra de Banderas en Coahuila (Figura 2; Böse, 1906). Como las estructuras plegadas, que constituyen la Sierra Madre Oriental de México, en varios sitios revelan la presencia de basamento extraordinariamente móvil que permitió el desarrollo de *décollement*, se deduce así también la presencia de anhidritas abajo (de Cserna, 1956, 1961). En las cercanías de Monterrey, tanto al surponiente como al norponiente (Wall *et al.*, 1961), la presencia de yeso debajo de la secuencia jurásica tardía (Cuenca de Sabinas), o bien en los Estados de Chihuahua y Coahuila (Cuenca de Chihuahua-Coahuila), en San Luis Potosí (Cuenca de

FIG. 2.—Mapa de México que muestra las regiones con la presencia de azufre, probada y posible.

San Luis Potosí) y en Guerrero (Cuenca de Guerrero), debajo de las calizas del Cretácico (Kellum *et al.*, 1936), pueden considerarse como sitios potenciales para encontrar yacimientos de azufre de este tipo (Figura 2).

Azufre también se presenta en la naturaleza en forma de sublimatos o azufre nativo en los volcanes recientes. En Sicilia, por ejemplo, se conoce bastante bien, desde hace mucho tiempo, la explotación comercial de azufre de este tipo. En Chile, semejantes procedimientos fueron empleados para la recuperación de azufre volcánico en varios sitios de Los Andes. En México, aunque algunos volcanes plio-pleistocénicos contienen sublimatos de este tipo, sus reservas son bastante escasas que no ameritan su explotación en lo absoluto.

Se tienen noticias que recientemente se ha logrado producir azufre a partir de la anhidrita económicamente en Inglaterra, cual hecho puede influir sobre la economía de los depósitos de las grandes cuencas de evaporación que se tienen en México (Figuras 2 y 3).

El yeso se origina, como se había mencionado arriba, mediante la evaporación de agua, generalmente del mar, en cuencas cerradas. El peso de la columna estratigráfica que cubrió posteriormente al yeso, hace la expulsión del agua de composición y la convierte en anhidrita. Tanto el yeso como la anhidrita son indistintamente utilizables para fines de la agricultura. Para su explotación dentro de límites económicos, se pueden considerar solamente aquellos yacimientos que afloran en la superficie. Yacimientos de yeso con estas características se presentan en México en varios sitios de la Sierra Madre Oriental, en regiones limítrofes con la Meseta Central o bien, con la cuenca hidrográfica de los ríos Amacuzac y Balsas (Figura 3).

POTASIO.—Existe cierta interrelación entre el yeso y las sales de potasio en cuanto a su ocurrencia en la naturaleza. Aunque el yeso se precipita de salmueras originadas tanto de agua del mar como de aguas dulces, las sales de potasio se precipitan solamente de salmueras de origen marino. Si la cantidad de influjo del agua del mar a la salmuera es tal, que el *ph* se mantiene a un determinado nivel, se precipitan potentes secuencias de yeso. En cambio, si la entrada del agua del mar es menor que la velocidad de la precipitación, entonces comienza a cambiarse el *ph*, permitiendo la precipitación de sales de potasio. El horizonte que representa la precipitación de sales de potasio en una secuencia salina generalmente es delgado. Cambios de la entrada del agua del mar a la cuenca de evaporación puede resultar en varios ciclos de precipitación de sales de potasio. Si todo quedara después cubierto por otras rocas para proteger la secuencia de evaporitas de la erosión, y al mismo tiempo no quedara afectado por deformación, sería un caso ideal. Sin embargo, ese caso constituye una excepción como el de los yacimientos de potasio de Carlsbad en el Estado de Nuevo México, en los Estados Unidos de América. La regla general es que las regiones salinas, después de que hayan sido cubiertas por una secuencia potente de otras rocas, quedan afectadas por deformación. Esto, a su vez, resulta flujo plástico en la secuencia salina originando una deformación extraordinariamente compleja que resulta en la disrupción de los horizontes de sales potásicas delgadas en cuerpos lenticulares que hace su explotación muy costosa y a veces completamente antieconómica.

FIG. 3.—Mapa de México que muestra la ubicación de las principales cuencas yesíferas.

En México hay dos sitios potencialmente favorables para la explotación por sales de potasio (Figura 4); la primera se encuentra en la región nororiental del Estado de Chihuahua (Cuchillo Parado) y la segunda, en la Cuenca Salina del Istmo (Tancamichapan) que comprende la mitad septentrional del Istmo de Tehuantepec y la región que se extiende al oriente de éste.

NITRATOS.—Pequeños yacimientos de minerales de nitrato se presentan en muchos sitios de las regiones áridas y semiáridas de la parte centroseptentrional de México y en la Baja California. Generalmente, se pueden clasificar estos yacimientos como superficiales de eflorescencia, localizados generalmente en los barriales que constituyen las partes centrales y al mismo tiempo más bajas de los bolsones. El mineral más común de estos yacimientos es el nitrato de sodio.

Debido al tamaño reducido de estos yacimientos, y por la relativa abundancia que se tiene en México de gas natural así como de derivados de carbón al producir coke, los yacimientos de nitratos naturales no se han explotado y, en lugar de ellos, se utilizan nitratos elaborados por plantas químicas.

BOSQUEJO GEOLOGICO DE MEXICO EN RELACION CON LA OCURRENCIA NATURAL DE MINERALES PARA FERTILIZANTES

FOSFATOS.—La superficie de México está constituida principalmente por rocas cenozoicas, tanto volcánicas como continentales y marinas. En menor grado afloran calizas y lutitas de edad principalmente cretácica. Las rocas metamórficas precámbricas constituyen una parte pequeña de la superficie del territorio nacional (véase la Carta Geológica de la República Mexicana). Esta relación de los afloramientos refleja una evolución geológica que resultó en un cuadro que se describe brevemente a continuación.

La presencia de rocas precámbricas metamórficas se conoce desde la frontera estadounidense hasta la costa pacífica del Estado de Oaxaca por medio de datos estratigráficos o bien geoquímicos. Estas rocas se extienden desde Oaxaca hasta la frontera de Guatemala y el autor las consideró recientemente también como precámbricas (de Cserna, 1969). Esta distribución de las rocas precámbricas indica, que al comienzo del Paleozoico existía en México una extensión del cratón precámbrico norteamericano hacia el sur, localizada en la parte central del país, que continuó en el sur hacia el suroriente. ¿Hasta qué grado cubrieron los mares paleozoicos a esta tierra precámbrica o península precámbrica? los datos geológicos disponibles hasta la fecha, no lo revelan. Los datos geoquímicos indican que las rocas metamórficas en la parte noroccidental de México son considerablemente más antiguas que las del resto del país (de Cserna, En prensa). El terreno precámbrico consiste principalmente en granulitas, o sea gneis, y amfibolitas con rocas plutónicas asociadas, así como metarriolitas y micaesquistos.

Los pocos datos que se tienen referente a la geología y petrología del terreno precámbrico en México no han probado la existencia de un yacimiento de hierro con apatita, o simplemente un yacimiento de apatita, que pudiera ser un potencial proveedor para la elaboración de fertilizantes de fosfatos

FIG. 4.—Mapa de México que muestra las regiones con la presencia de sales de potasio, probada y posible.

como en el caso de Kiruna, Suecia. Las características inherentes de estos terrenos metamórficos no sugieren probabilidad alguna para encontrar minerales para producir fertilizantes de fosfato.

Desde el comienzo de la Era Paleozoica, los mares rodeaban esta península precámbrica tanto en el oriente como en el poniente. Afloramientos aislados, correspondientes a una acumulación en la plataforma o bien en la parte cercana del cratón al miogeosinclinal, en el oriente los conocemos desde la frontera estadounidense hasta Oaxaca. Estos afloramientos acusan una edad paleozoica temprana, comprendida entre el Ordovícico y Devónico (Bridges, 1966; Carrillo-Bravo, 1961; Pantoja-Alor y Robinson, 1967). Los demás afloramientos de rocas paleozoicas en el oriente de México, consisten en lutitas y clásticos moderadamente gruesos, correspondientes a una acumulación exogeosinclinal durante el Paleozoico tardío y estos constituyen una cuña clástica o bien facies *Flysch* (Heim, 1941; King *et al.*, 1944; de Cserna, 1960). En vista de que los afloramientos del Paleozoico inferior, que probablemente acumuló en un ambiente propicio para la génesis de fosfatos, tienen un área sumamente reducida y, como son prácticamente restos de erosión, sus espesores también son muy escasos. Bajo esas circunstancias, no ofrecen expectativas buenas para la exploración de yacimientos de fosfato.

La sedimentación paleozoica temprana y tardía en el lado occidental de la península precámbrica se conoce solamente del extremo noroeste de México, del Estado de Sonora. Los sedimentos correspondientes al Paleozoico inferior consisten principalmente en calizas, mientras que los del superior, más exactamente los del Pérmico, se presentan en una facies arrecifal (Cooper *et al.*, 1954, 1965). Ni el Paleozoico inferior ni el superior de esta región ofrecen posibilidades halagadoras para encontrar fosforitas.

Las acumulaciones sedimentarias paleozoicas en el geosinclinal que bordeaba la península precámbrica tanto en el oriente como en el occidente, fueron deformadas severamente al final del Pérmico y principios del Triásico. Este período de orogénesis fue seguido por extenso fallamiento en bloques, acompañado por la acumulación de sedimentos continentales clásticos y rocas volcánicas asociadas. La presencia de evaporitas en estos sedimentos hasta la fecha no ha sido comprobada por datos geológicos, no obstante que el cuadro sedimentario de esa época ha sido propicio para tales acumulaciones.

Para el final de Triásico, la columna estratigráfica en el extremo noroccidente de México acusa una invasión marina leve en la cual se han acumulado sedimentos clásticos con mantos de carbón así como yeso en algunos sitios cercanos (Wilson y Rocha, 1946; Pesquera y Carbonell, 1960; Alencáster, 1961). Estos sedimentos del Triásico Superior cambian hacia el poniente en una secuencia clástica más potente (White y Guiza, 1949; Alencáster, 1961). Esta relación muestra ciertas semejanzas a las secuencias de la Formación Phosphoria en la parte occidental de los Estados Unidos de América y, en cierta forma también, con la secuencia jurásica tardía en la parte centroseptentrional de México (Figura 5). Por estas circunstancias, esta región, a juicio del autor, debe investigarse para determinar sus potencialidades en cuanto a la presencia de fosforitas marinas, así como vanadio y uranio asociados.

En el extremo oriente de México, o sea en la Sierra Madre Oriental y

Planicie Costera del Golfo, los afloramientos o bien capas que han sido penetrados por sondeos en busca de petróleo, han revelado la presencia de una gruesa secuencia lutítica, algo carbonosa, del Jurásico Inferior (Petróleos Mexicanos, comunicación verbal). Estos estratos, semejantemente con los del extremo noroccidente de México, deben ser investigados por yacimientos de fosforita.

La invasión marina alcanzó la parte centromeridional de México, más concretamente la parte septentrional del Estado de Oaxaca y la parte suroccidental del Estado de Puebla, solamente a mediados del Jurásico. Durante esta época se han acumulado en estas regiones yacimientos de carbón de importancia económica marginal. Desafortunadamente, los datos geológicos disponibles, hasta la fecha, no han revelado la posible continuación lateral de las capas del Jurásico Medio y su transición a una secuencia marina más potente. Por lo tanto, no es posible pronosticar, por ahora, la zona de transición de una región palúdica donde se acumuló el carbón, a una región nerítica donde hubiera podido acumularse fosforita. De todas maneras, esta zona de transición, si existe, debe encontrarse en el subsuelo sepultada por sedimentos más recientes, cual hecho excluye la potencialidad económica de estas capas en cuanto a un yacimiento de fosforita.

La invasión marina, que severamente afectó a México, tuvo lugar durante el Jurásico Tardío. Primero, se formaron cuencas semicerradas donde, mediante la evaporación, una secuencia de yeso y sales se precipitó. Estas cuencas se localizaron al norte y al sur de Monterrey (*i. e.* Cuenca de Sabinas) y en la parte septentrional del Istmo de Tehuantepec (*i. e.* Cuenca Salina del Istmo), extendiéndose hacia el oriente, hacia Tabasco (Figura 2). Esta invasión marina ha sido progresiva durante el resto del Jurásico Tardío de tal manera que el mar ocupó una cuenca alargada, una especie de autogeosinclinal (Kay, 1951), en que se han acumulado potentes secuencias de calizas y clásticos finos calcáreos en la zona nerítica y clásticos más gruesos sin aportación calcárea en la zona litoral, dejando al descubierto los elementos paleogeográficos positivos bien conocidos como es la Península de Coahuila y la de Tamaulipas.

En la zona de transición de la facies litoral a la nerítica, importantes acumulaciones de fosforita tuvieron lugar y se localizan en el extremo sur del Estado de Coahuila, en la región limítrofe con los Estados de Zacatecas y Nuevo León (Figura 1). Estas fosforitas, que están interestratificadas en la Formación La Caja (Kimeridgiano-Portlandiano), se conocen desde principios de este siglo (Burckhardt, 1906) y fueron objeto de investigaciones geológicas y económicas exhaustivas (Rogers *et al.*, 1956, 1961), hasta donde las condiciones de trabajo, principalmente la cartografía geológica de la región, que fue bastante limitada por la falta de mapas base y fotografías aéreas adecuadas, permitieron. Las reservas que acusan estas fosforitas se presentan en la tabla a continuación (Tabla 1).

Los mares cretácicos que cubrieron a México eran someros y, aunque haya habido acumulaciones locales de sedimentos clásticos durante el Cretácico Temprano, la sedimentación ha sido eminentemente calcárea. Excepción a esta generalización constituye el extremo occidente de México, o sea la región de la Península de Baja California, que ha sido la zona de transición

de una región miogeosinclinal de sedimentación calcárea a una región eugeo-sinclinal de sedimentación eminentemente clástica, propicia para la acumulación de fosforitas. En virtud de que la región de Baja California y áreas adyacentes sufrieron deformación intensa que resultó en metamorfismo regional y anatexis, la exploración de fosforitas marinas en las rocas sedimentarias del Cretácico Inferior, quedó imposibilitada por la naturaleza. Por otra parte, la cuña clástica o bien facies *Flysch*, que acumuló durante el Cretácico Tardío y Paleoceno en todo el país, acusa un ambiente de sedimentación no propicio para la formación de fosforitas marinas.

TABLA 1.—Reservas de fosforita de México (según Rogers *et al.*, 1961).

Area	Toneladas métricas	P ₂ O ₅ (%)
Sierra de San Angel	6,135,000 ¹	18.9
Sierra de Lorenzeña	8,155,000 ¹	15.6
Sierra de Gómez Farías	13,940,000 ¹	20.6
Anticlinal San Javier, Sierra de la Carbonera	3,955,000 ¹	19.1
Anticlinal Carbonera, Sierra de la Carbonera	7,755,000 ¹	19.9
Anticlinal Canelito, Sierra de la Carbonera	3,660,000 ¹	19.2
Sierra de Sombreretillo	9,625,000 ¹	16.3
Sierra de Rocamonte	10,640,000 ¹	20.4
Sierra de Santa Rosa (Distrito de Concepción del Oro) . .	13,505,000 ²	16.2
Total:	77,370,000	18.4%

Area	Toneladas métricas	P ₂ O ₅ (%)
Sierra del Astillero	18,145,000	14.0
Sierra de San Francisco	14,000,000	13.5
Sierra de Garambullo	25,280,000	12.0
Sierra de San Julián	3,585,000	14.2
Sierra de Colorada	11,910,000	14.8
Sierra de Potrerillos	3,485,000	12.8
Total:	76,405,000	13.3%

1. Reservas inferidas; 2. Reservas indicadas

Durante el Terciario, la actividad volcánica ha sido lo más extensa en el territorio de México, y la sedimentación marina quedó limitada prácticamente a la actual Planicie Costera del Golfo de México y a la Península de Yucatán. A raíz de la formación progresiva del Golfo de California, la sedimentación marina en esa región durante el Terciario ha sido limitada a áreas muy

reducidas. No obstante que este cuadro de sedimentación ha sido propicio para la acumulación de fosforitas durante ese tiempo en la parte meridional de la Planicie Costera del Atlántico de los Estados Unidos de América así como en la Península de Florida, en México se tienen datos de la existencia de fosforitas solamente de la parte central de la costa occidental de Baja California y, hasta la fecha, no se han descubierto yacimientos semejantes ni en la Costa del Golfo de México y tampoco en la parte septentrional de la Península de Yucatán, — ambas regiones que el autor considera como áreas con grandes perspectivas para encontrar fosforitas (Figura 1).

AZUFRE.—La presencia de cuencas extensas de evaporación se conoce de los datos estratigráficos regionales de México desde el Jurásico Tardío, no obstante que sí existen algunos horizontes yesíferos en el Triásico Superior de Sonora.

Las evaporitas del Jurásico Superior se localizan en el norte de la República con el nombre de Cuenca de Sabinas (Figura 2 y 3), localizada en la región limítrofe de los Estados de Coahuila y Nuevo León. La base del Jurásico Superior en esa región, compuesta de anhidrita, a raíz del plegamiento de la sección sedimentaria mesozoica durante la Orogenia Hidalgoana (Eoceno temprano y medio) adquirió formas diapíricas que se presentan principalmente en el núcleo de varios importantes pliegues (Wall *et. al.*, 1961). La extensión de la Cuenca de Sabinas jurásica tardía también se identifica en la región inmediatamente al sur y suroeste de la Ciudad de Monterrey donde presenta semejantes características que más al norte. Hasta la fecha, ni al norte y tampoco al sur de Monterrey han encontrado azufre asociado con estas estructuras diapíricas, de evaporitas jurásicas.

La parte septentrional del Istmo de Tehuantepec está repleta de domos salinos en los cuales tanto la anhidrita como la sal datan del Jurásico (Figura 2) y penetran no sólo los sedimentos cenozoicos sino también los del Jurásico Superior (*i. e.* Caliza Chinameca). La presencia de calizas cretácicas no ha sido determinada en esta región. Los casquetes de estos domos contienen una riqueza extraordinaria de azufre que acusa una reserva de más de 60 millones de toneladas (Consejo de Recursos Naturales No Renovables, comunicación personal) y que permitió lograr a México un lugar muy importante en la producción mundial de este mineral. Las evaporitas se acumularon en la llamada "Cuenca Salina del Istmo", que se extiende desde el Istmo de Tehuantepec hacia el oriente, donde las estructuras dómicas son más profundas que en el poniente y acusan una gran potencialidad en cuanto a hidrocarburos, pero todavía se desconoce su importancia en cuanto al azufre.

Las cuencas de evaporación cretácicas se localizan en las partes septentrional, central y meridional de la República (Figura 3); existían durante el principio y mediados del Cretácico y sus depósitos hoy forman estructuras diapíricas en el núcleo de los pliegues de la Sierra Madre Oriental de México. La localidad más bien conocida con presencia de azufre está en Huascamán, cerca de Cerritos en el Estado de San Luis Potosí (Figura 2), donde se explota este mineral desde hace mucho tiempo, mucho antes de que se comenzara la explotación de tipo Frasch en el Istmo de Tehuantepec. Con trabajos detallados geológicos regionales, a juicio del autor, se podrán localizar yaci-

mientos importantes de azufre, en la zona de contacto de la anhidrita con las calizas cretácicas.

En el norte de la República, en Coahuila y áreas adyacentes de Chihuahua, existe una región amplísima donde se conoce la presencia de anhidrita cretácica que acumuló en una cuenca cerrada que se formó a mediados del Cretácico encima de la antigua "Península de Coahuila" (Figura 2). La presencia de azufre, hasta la fecha, ha sido reportada solamente de la Sierra de Banderas en Coahuila (Böse, 1906). En esta región, igual que en la de San Luis Potosí, estudio regional geológico y geofísico, sin duda, en opinión del autor, resultará en el descubrimiento de nuevos yacimientos de azufre.

En el Estado de Guerrero, desde las afueras de Tehuixtla, Morelos e Iguala, Guerrero hasta casi Chilpancingo, se conoce la existencia de anhidrita debajo de las calizas del Cretácico Inferior (Cuenca de Guerrero), que muy a menudo forman cuerpos diapíricos en las estructuras plegadas (Figura 2). Hasta la fecha no se ha reportado la presencia de azufre en esta región que constituyó otra de las grandes cuencas de evaporación durante mediados del Cretácico.

La acumulación de evaporitas durante el Cenozoico ha sido confinada a cuencas cerradas en la mayor parte de la superficie de México, de ambiente netamente continental. El fallamiento en bloques, o sea la tafrogenia, que siguió la Orogenia Hidalgoana, ha impedido en muchos lugares el desagüe natural y como resultado, dió origen a cuencas cerradas. Así, en el norte de México, varios de los grandes bolsones en su relleno clástico tienen horizontes de evaporitas así como calizas de agua dulce. Semejantes condiciones han prevalecido en las partes central y meridional del país. La acumulación de evaporitas en ambiente continental es bastante limitada en cuanto a los espesores, y por consiguiente, escasamente representan cuerpos sedimentarios propicios para la formación de domos, aún cuando estén cubiertos por una secuencia de sedimentos clásticos.

Bajo las circunstancias arriba esbozadas, las cuencas mesozoicas de evaporación de México, ofrecen el siguiente cuadro para la existencia y posibilidades de encontrar azufre y yeso (Tabla 2).

TABLA 2.—Cuenas de evaporación mesozoicas de México en relación con sus potenciales de azufre

EDAD	LUGAR	AZUFRE DESCUBIERTO	YESO
CRETACICA	Chihuahua	todavía no	sí
	Coahuila	sí	sí
	San Luis Potosí	sí	sí
	Guerrero	todavía no	sí
JURASICA	Sabinas-Monterrey	sí	sí
	Istmo de Tehuantepec	todavía no	sí

YESO.—Se puede añadir poco a las relaciones que han sido esbozadas bajo la descripción de las cuencas de evaporación y la presencia de azufre en el sitio de estas (Figuras 2 y 3). Actualmente, se explotan en gran escala el yeso o más bien la anhidrita en San Luis Potosí, en el extremo norte de Guerrero, cerca de Tehuixtla y Apipilulco (Santillán, 1929) y en las cercanías de Matamoros de Izúcar, Puebla (Fries, 1960). Aparte de estas operaciones principales, en centenares de lugares se encuentran canteras en los afloramientos de yeso o anhidrita. La producción de yeso de todos estos lugares mencionados, ha sido casi exclusivamente para fines de la industria de construcción y no se tienen datos referentes al consumo de yeso o bien la aplicación de esto conjuntamente con los fertilizantes para la agricultura.

POTASIO. En el extremo norte de México, cerca de la frontera con los Estados Unidos, en las afueras de Cuchillo Parado en el Estado de Chihuahua, uno de los pozos de exploración, perforado por Petróleos Mexicanos, penetró una secuencia de sedimentos clásticos con intercalaciones de anhidrita y sal, cuya edad no se pudo establecer con métodos directos (*i. e.* paleontológicamente). Los núcleos de sal recuperados de este pozo fueron analizados químicamente y acusaron huellas de potasio (Salas, 1965, p. 69-70). Dada la proximidad relativa de esa localidad a la de Carlsbad, Nuevo México, Salas (*op. cit.*) ha considerado la posibilidad de que la secuencia penetrada con horizontes de sal y con huellas de potasio, puede representar la continuación suroriental de los depósitos que han acumulado en la Cuenca de Delaware durante el Pérmico. El autor se mostró escéptico referente a esta interpretación desde hace unos diez años. Este escepticismo ha sido recientemente corroborado por el descubrimiento de una secuencia paleozoica en la región de Plomosas, Chihuahua (Bridges, 1965), que no apoya esa interpretación paleogeográfica. Bajo estas circunstanciales las sales en la secuencia clástica en el pozo de Cuchillo Parado, en la opinión del autor, más bien tienen relación con el cuadro sedimentario cretácico o quizá jurásico, a la que ya se ha hecho referencia bajo la descripción de azufre en las páginas anteriores. Es posible, sin embargo, que no obstante que hasta ahora se ha observado solamente anhidrita en Coahuila y partes adyacentes de Chihuahua, es bien posible que debajo de la anhidrita se encuentre una secuencia salina también que puede contener sales potásicas. Esto simplemente puede ser el resultado de la configuración de la cuenca de evaporación de ese tiempo y de la circulación de las aguas en ella. Muchos trabajos geológicos y geofísicos, junto con un amplio programa de perforación, podrán determinar la existencia o la ausencia de una potente secuencia de sales potásicas en esta región.

En los domos salinos de la parte septentrional del Istmo de Tehuantepec, desde hace muchos años conocen la existencia de sales de potasio, que se presentan en lentes severamente deformados plásticamente, a raíz de la tectónica salina (Figura 4). Recientemente, el Gobierno Federal de México, a través del Consejo de Recursos Naturales No Renovables, ha iniciado un programa tendiente a la evaluación y exploración de sales de potasio en la llamada "Isla de Tancamichapan", con resultados alentadores, aunque hasta ahora no positivos.

NITRATOS.—Debido al hecho de que los fertilizantes de nitratos que se producen en México, son de origen sintético, su discusión está fuera del alcance del presente estudio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

FOSFATOS.—De acuerdo con lo señalado en la Figura 1 y con los estudios anteriormente hechos y citados, en la parte centroseptentrional de México existen fosforitas con una ley promedio de 18 por ciento de P_2O_5 , que representan unas reservas de más de 70 millones de toneladas (véase Tabla 1). Considerando las conclusiones presentadas por Salas (1965) así como las estadísticas más recientes (Consejo de Recursos Naturales No Renovables, 1967), en cuanto a la importación anual de más de 300,000 toneladas de roca fosfatada con un promedio de 30 y 32 por ciento de P_2O_5 , que representa a México alrededor de \$37,000,000.00 de pesos mexicanos anualmente por pago de divisas, los yacimientos de fosforita en la parte centroseptentrional de México podrán abastecer al país, aún con el ritmo creciente del consumo de fertilizantes, por lo menos durante 50 años, ahorrando anualmente en divisas alrededor de 3,000,000 de dólares. Para lograr esto, es necesario enlistar los servicios de químicos adecuadamente preparados y continuar las pruebas metalúrgicas para el beneficio de estos yacimientos con objeto de aumentar el contenido de pentóxido de fósforo, mediante procedimientos metalúrgicos adecuados.

En vista de que las condiciones paleogeográficas favorecen la consideración en cuanto a la posibilidad de que los estratos triásicos en el noroeste del país, en el Estado de Sonora (Figuras 1 y 5), contengan fosforitas, se recomienda de inmediato el estudio y muestreo cuidadoso de toda la secuencia expuesta tanto en la región Tónichi y San Marcial como en El Antimonio, todos en el Estado de Sonora.

Se recomienda también llevar a cabo exploraciones geológicas y el estudio cuidadoso de muestras, apoyado por pruebas con equipo de registro radiactivo en pozos de aguas y norias existentes en la Planicie Costera del Golfo de México, al sur de Tampico, así como en Tabasco, Campeche y Yucatán, ya que las condiciones geológicas en estas regiones tienen mucha semejanza a las de Florida y de Carolina del Norte de los Estados Unidos de América, donde existen grandes yacimientos de fosfatos en sedimentos de edad semejante.

Procedimientos semejantes de exploración se recomiendan en la parte centro-occidental y suroccidental de la Península de Baja California, donde los sedimentos terciarios pueden contener fosfatos semejantes a los que actualmente se están acumulando en la plataforma continental adyacente a estas regiones que se señalan también en la Figura 1.

AZUFRE.—La región azufrera principal de México, se encuentra en la parte occidental de la llamada Cuenca Salina del Istmo, que se muestra en la Figura 2. De esta región, se producen anualmente aproximadamente 1.8 millones de toneladas de azufre nativo que constituye el 5 o el 8 por ciento de las necesidades de azufre del mundo entero, de acuerdo con un estudio reciente que fue hecho por Salas (1967). De esta producción, el consumo nacional viene siendo lamen-

tablemente de solo unas 200,000 toneladas por año (Consejo de Recursos Naturales No Renovables, 1967). En esta región, los domos tienen casquetes bastante someros que no sobrepasan generalmente una profundidad mayor de 300 m, en contraste con la prolongación oriental de la misma Cuenca Salina de Istmo, en el Estado de Tabasco, donde las profundidades son mayores de 1,000 m y donde, hasta la fecha, no han encontrado azufre en los casquetes. Bajo estas circunstancias, parece evidente al autor, que se intensifique la perforación por azufre en la parte occidental de la Cuenca Salina del Istmo, con objeto de aumentar las reservas de azufre en esta región. Al mismo tiempo, se recomienda la perforación de pozos profundos en áreas donde métodos geofísicos han revelado estructuras en mayores profundidades, con objeto de encontrar y ubicar reservas de azufre.

En la parte occidental de la Cuenca de San Luis Potosí (Figura 2), en las afueras de Huascamán, se está explotando azufre nativo en el contacto de anhidrita y caliza del Cretácico Inferior. Sería conveniente, mediante la cartografía geológica detallada de esta cuenca determinar o delinear áreas correspondientes a núcleos de estructuras anticlinales, donde no necesariamente aflora anhidrita. Serán estos sitios donde deberán emprenderse perforaciones en busca de azufre en la base de las calizas cretácicas en contacto con masas algo diapíricas de anhidrita.

En la Cuenca de Chihuahua-Coahuila, que se sitúa en la parte centroseptentrional del país (Figura 2), se ha encontrado azufre solamente en el extremo sur de ésta, en la Sierra de Banderas. Se recomienda en esta cuenca los mismos procedimientos que se han mencionado anteriormente para la exploración adecuada de la Cuenca de San Luis Potosí.

Aparte de las tres cuencas antes mencionadas, existen dos cuencas vesíferas o salinas en México, donde, hasta la fecha, no han encontrado manifestaciones de azufre. Estas cuencas son la de Sabinas en el norte de la República y de Guerrero, en la parte centromeridional del país (Figura 2). En la Cuenca de Sabinas y también en la Cuenca de Guerrero, en varios sitios aflora la anhidrita diapírica. Convendría examinar detenidamente la zona de contacto de estas masas diapíricas con las calizas jurásicas o cretácicas presentes en estas regiones, con objeto de establecer la presencia o la ausencia de azufre. Además, emprender la perforación de estructuras del subsuelo con objeto de probar posibilidades con miras para la producción por el método Frasch.

Aunque México actualmente tiene bastante azufre para abastecer por varios años, no solo la demanda nacional, que asciende a unas 200,000 toneladas al año como se ha señalado arriba, sino también el mercado internacional, conviene pensar en el futuro, cuando estas reservas ya estarán agotadas. Actualmente, la recuperación o bien la producción de azufre en Inglaterra, partiendo de anhidrita o de yeso, debe ser para México un llamado de alerta en cuanto al pronto estudio y desarrollo adecuado de los yacimientos de yeso que existen en la República.

Yeso.—Las principales cuencas de evaporación se muestran en la Figura 3. Estas cuencas corresponden a la de Chihuahua-Coahuila, a la de Sabinas, a la de San Luis Potosí, a la del Istmo, a la de Guerrero y a la de Puebla. Conviene notar en esta figura, la manera como se muestra la parte oriental de la Cuenca

Salina en el Estado de Tabasco, cerca de la frontera con el Estado de Campeche. En esta región los límites exactos de esta cuenca aún no están debidamente establecidos. Además, en la parte meridional de la Península de Yucatán existen grandes extensiones de yeso en la secuencia terciaria que aún no han sido debidamente cartografiadas y estudiadas geológicamente. En la Península de Yucatán existen también espesores de anhidrita debajo del Cretácico que no se sabe si pertenecen al Cretácico Inferior o son de una edad aún más antigua, y que descansan sobre un basamento cristalino (Comunicación verbal, Petróleos Mexicanos). Todas estas cuencas pueden suministrar yeso para acondicionar debidamente a los suelos lixiviados en la República y así, también constituyen regiones potenciales para la recuperación futura de azufre por métodos más sofisticados que actualmente son antieconómicos en México, pero que sí los emplean ya en otras partes del mundo.

Se considera como suma importancia la pronta cartografía geológica de estas cuencas con objeto de poder ubicar con exactitud sus posibilidades.

POTASIO.—El conocimiento positivo de sales de potasio existe solamente de la región meridional de México, concretamente de la región de Coatzacoalcos (Figura 4), en la Isla de Tancamichapan, al sur de Coatzacoalcos (Consejo de Recursos Naturales No Renovables, comunicación verbal). En esta región el Gobierno Mexicano ha perforado en 1966, 11 pozos en los cuales la cima de la sal se encuentra entre 100 y 300 m de profundidad, indicando la naturaleza plegada o bien plásticamente deformada de la sal. El espesor del horizonte que contiene sales de potasio varía de 4 m a menos de 30 cm. El contenido de K_2O alcanza localmente el 31 por ciento, no obstante que el promedio oscila entre 15 y 20 por ciento. Se necesitan en esta área, así como en la región que comprende la parte occidental de la Cuenca Salina del Istmo y donde los domos salinos son más someros que hacia el oriente, un mayor número de pozos de exploración que deben extender dentro de los domos, práctica que hasta la fecha no ha sido seguida por razones antieconómicas, debido a que los pozos que se han perforado hasta ahora fueron hechos en busca de petróleo y no de la sal. Los pozos perforados por petróleo, no tenían ningún objeto de recuperar núcleos de la masa salina que constituye los domos y los perforados en busca de azufre, generalmente se quedaron discontinuados al alcanzar la base del casquete. El objetivo principal de las perforaciones en busca de potasio será primeramente obtener datos en cuanto a la configuración estructural de los horizontes que contienen las sales de potasio, en vista de que la deformación plástica, que afectó la masa salina, ha causado el horizonte con sales de potasio, no solo su intensa deformación, sino su fragmentación en cuerpos lenticulares cuya explotación por métodos convencionales de la minería, los harán totalmente antieconómicos.

La región de Cuchillo Parado en el extremo norte de la República (Figura 4), donde Salas (1965) ha reportado la presencia de huellas de potasio en núcleos que fueron recuperados por la perforación de varios pozos, en parte por Petróleos Mexicanos y en parte por Salas mismo, ameritan un estudio de esta región, con objeto de determinar, en primer lugar, la naturaleza de la secuencia salina presente en esta área. El área de Cuchillo Parado está dentro de la región que aparece en las Figuras 2 y 3 y la que se denomina como

Cuenca de Chihuahua-Coahuila, que ha sido una gran cuenca de evaporación. Ahora bien, si el área de Cuchillo Parado acusa huellas de potasio en los pozos, esto quiere decir que la secuencia de evaporitas que acumuló en esta cuenca, probablemente contiene, aparte de la anhidrita, sales de sodio, así como posiblemente de potasio. Por esta razón, se recomienda el estudio cuidadoso de los afloramientos de evaporitas en los núcleos de los anticlinales principales que existen en esta región y los cuales no han sido estudiados hasta la fecha con su debido detalle. Una vez encontrada la presencia de sal en afloramientos de las evaporitas, entonces habrá que programar la perforación de una serie de pozos profundos con objeto de recuperar núcleos debidamente tomados de la secuencia salina para su análisis químico.

No obstante que hasta la fecha no se ha reportado la presencia ni siquiera de huellas de potasio de la Cuenca de Sabinas (Figura 4), se supone que, aparte del yeso, o bien, anhidrita de esta cuenca, también se encuentra sal. Por lo tanto, se recomienda el estudio cuidadoso de los afloramientos de las masas diapíricas de evaporitas presentes en los núcleos de principales anticlinales de esta región para determinar, la presencia de la sal, aparte de la anhidrita. En caso de que se presentara la sal, se recomienda la perforación de unos pozos de exploración diseñados para la recuperación de núcleos con objeto de determinar en ellos la presencia o la ausencia de sales de potasio.

NITRATOS.—Debido a la gran riqueza que México tiene en el renglón de los hidrocarburos por un lado y por otro la existencia raquítica de nitratos minerales en algunas áreas desérticas del norte de la República, es antieconómico en todas formas considerar la exploración, o más bien, el abastecimiento de fertilizantes nitrogenados partiendo de minerales. Salas (1965) ha señalado que en México la producción de sulfato de amonio hace más de 5 años sobrepasó las 160,000 toneladas anuales y el nitrato de amonio las 125,000 toneladas. Bajo esas circunstancias, el abastecimiento de estos fertilizantes hay que visualizar mediante la industria química de tal grado que actualmente, México exporta fertilizantes nitrogenados en cantidades notables.

TRABAJOS CITADOS

- ALENCÁSTER, GLORIA, 1961, *Estratigrafía del Triásico Superior de la parte central del Estado de Sonora*: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Paleontología Mexicana 11, pt. 1, p. 1-30.
- D'ANGLEJAN, B. F., 1967, *Origin of marine phosphorites off Baja California, México*: Marine Geology, v. 5, p. 15-44.
- BÖSE, EMIL, 1906, *Excursions aux mines de soufre de la Sierra de Banderas*: Congr. Geol. Internal, 10a., México, libretto guía de la Excursión 19, 11 p.
- BRIDGES, L. W. 1966, *Geología del área de Plomosas, Chihuahua*: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Bol. 74, p. 1-134.

- BROWN, P. M., 1958, *The relation of phosphorites to ground water in Beaufort County, North Carolina*: Econ. Geology, v. 53, p. 85-101.
- BURCKHARDT, CHARLES, 1906, *Sobre las rocas fosforíticas de las Sierras de Mazapil y Concepción del Oro, Zacatecas*: Inst. Geol. México, Parergones, v. 2, p. 63-67.
- 1930, *Étude synthétique sur le Mésozoïque mexicain*: Soc. Paléont. Suisse, Mém. 49-50, 280 p.
- CARRILLO-BRAVO, JOSÉ, 1961, *Geología del Anticlinorio Huizachal-Peregrina al noroeste de Ciudad Victoria, Tamaulipas*: Bol. Asoc. Mex. Geol. Petroleros, v. 13, p. 1-98.
- CONSEJO DE RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES, 1967, *Sumario estadístico de la minería mexicana*: Cons. Rec. Nat. No Renovables, México, D. F., 113 p.
- COOPER, G. A., ARELLANO, A. R. V., JOHNSON, J. H., OKULITCH, V. J., STOYANOV, ALEXANDER Y LOCHMAN, CHRISTINA., 1954, *Geología y paleontología de la región de Caborca, norponiente de Sonora*: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Bol. 58, pt. 1, 258 p.
- COOPER, G. A., DUNBAR, C. O., DUNCAN, HELEN, MILLER, A. K., Y KNIGHT, J. B., 1965 *Fauna pérmica de El Antimonio, oeste de Sonora, México*: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Bol. 58, pt. 3, 119 p.
- CSERNA, ZOLTAN DE, 1956, *Tectónica de la Sierra Madre Oriental de México, entre Torreón y Monterrey*: Congr. Geol. Internal., 20a., México, Monogr., 87 p.
- 1960, *Orogénesis in time and space in Mexico*: Geol. Rundschau, v. 50, p. 595-605.
- 1961, *Tectonic map of Mexico*: Geol. Soc. America, New York, scale 1:2,500,000.
- 1969, *Tectonic framework of southern Mexico and its bearing on the problem of continental drift*: Bol. Soc. Geol. Mexicana, v. 30, p. 159-168.
- (En prensa), *Precambrian rocks of Mexico*: en *The Precambrian*, K. Rankama, editor. v. 4. Wiley-Interscience, New York, p. 253-270.
- DIETZ, R. S., EMERY, K. O., Y SHEPARD, F. P., 1942, *Phosphorite deposits on the sea floor of southern California*: Bull. Geol. Soc. America, v. 53, p. 815-848.
- FLEMING, R. H., 1957, *General features of the ocean*: Geol. Soc. America, Mem. 67, p. 87-108.
- FRIES, CARL, JR. 1969, *Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México*: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Bol. 60, 236 p.
- GONZÁLEZ-REYNA, JENARO, 1951, *El yacimiento de azufre de San Rafael, Huascalá, San Luis Potosí*: Primera Conv. Interamer. Rec. Minerales, México, Mem., p. 91-99.
- HARRINGTON, J. F., WARD, D. E., Y MCKELVEY, V. E., 1966, *Sources of fertilizer minerals in South America. — a preliminary study*: U. S. Geol. Survey, Bull., 1240, 66 p.

- HEIM, ARNOLD, 1941; *The front ranges of the Sierra Madre Oriental, Mexico, from Ciudad Victoria to Tamazunchale*: *Eclog. Geol. Helvetiae*, v. 33, p. 313-352.
- KAY, MARSHALL, 1951, *North American geosynclines*: *Geol. Soc. America, Mem.* 48, 143 p.
- KELLUM, L. B., IMLAY, R. W., Y KANE, W. G., 1936, *Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico*: *Bull. Geol. Soc. America*, v. 47, p. 969-1008.
- KING, R. E., DUNBAR, C. O., CLOUD, F. E., JR., Y MILLER, A. J., 1944, *Geology and paleontology of the Permian area northwest of Las Delicias, southwestern Coahuila, Mexico*: *Geol. Soc. America, Spec. Paper* 52, 172 p.
- MARQUEZ-P., ARENAS, VIVEROS-J., MANUEL, Y SERNA-V., REYES, 1964, *Depósitos de sal y azufre en la Cuenca Salina del Istmo, Veracruz*: *Cons. Rec. Nat. No Renovables, Bol.* 64, 78 p.
- McKELVEY, V. E., 1966, *Successful new techniques in prospecting for phosphate deposits*: *Australian Mining*, v. 58, n. 3.
- McKELVEY, V. E., WILLIAMS, J. S., SHELDON, R. P., CRESSMAN, E. R. CHENEY, T. M., Y SWANSON, R. W., 1959, *The Phosphoria, Park City, and Shedhorn Formations in the western phosphate field*: *U. S. Geol. Survey, Prof. Paper* 313-a, p. 1-47.
- PANTOJA-ALOR, JERJES Y ROBINSON, R. A., 1967, *Paleozoic sedimentary rocks in Oaxaca, Mexico*: *Science*, v. 157, p. 1033-1035.
- PÉREZ-MARTÍNEZ, J. J. Y WIGGIN, R. W., 1953, *Los depósitos de fosforitas de Sabinas Hidalgo y Ayuncual, Estado de Nuevo León*: *Inst. Nat. Invest. Recursos Minerales (México)*, Bol. 32, 33 p.
- PESQUERA-V., RUBÉN Y CARBONELL-C., MANUEL, 1960, *Geología y exploración de los depósitos de carbón de la región de San Marcial, Estado de Sonora*: *Cons. Rec. Nat. No Renovables (México)*, Bol. 59, 41 p.
- ROGERS, C. L., CSERNA, ZOLTAN DE, TAVERA-A., EUGENIO Y ULLOA, SALVADOR., 1956, *Geología general y depósitos de fosfatos de Concepción del Oro, Zacatecas*: *Inst. Nat. Invest. Recursos Minerales (México)*, Bol. 38, 152 p.
- ROGERS, C. L., CSERNA, ZOLTAN DE, VAN VLOTEN, ROGELIO, TAVERA-A., EUGENIO, Y OJEDA-R., JESÚS, 1961, *Reconocimiento geológico y depósitos de fosfatos del norte de Zacatecas y áreas adyacentes en Coahuila, Nuevo León y San Luis Potosí*: *Cons. Rec. Nat. No Renovables (México)*, Bol. 56, 322 p.
- SALAS, G. P., 1965, *Recursos no renovables para la agricultura*: *Minería y Metalurgia (México)*, núm. 37, p. 61-77.
- 1967, *Petróleo y azufre del sureste de México*: *Congr. Mundial del Petróleo*, 7o., México, inédito.
- SALAZAR-SALINAS, LEOPOLDO, GONZÁLEZ, PEDRO, SANTILLÁN, MANUEL, ACEVEDO ANTONIO, Y MARTÍNEZ-QUINTERO, A. R., 1923, *El Cerro de Mercado*: *Inst. Geol. México, Bol.* 44, 94 p.

- SANTILLÁN, MANUEL, 1929, *Geología minera de las regiones norte y noroeste del Estado de Guerrero*: Inst. Geol. México, Bol. 48, 102 p.
- SVEDRUP, H. U., JOHNSON, M. W., y FLEMING, R. H., 1946, *The oceans*: Prentice-Hall, New York, 1086 p.
- WALL, J. R. MURRAY, G. E., y DÍAZ-G., T. E., 1961, *Geologic occurrence of intrusive gypsum and its effect on structural forms in Coahuila Marginal Folded Province of northeastern México*: Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists, v. 45, p. 1504-1522.
- WHITE, D. E., y GUTZA, REYNALDO, 1949, *Los yacimientos antimoniales de la región de El Antimonio, Estado de Sonora*: Inst. Nac. Invest. Recursos Minerales (México), Bol. 23, 48 p.
- WILSON, I. F., y ROCHA, V. S., 1946, *Los yacimientos de carbón de la región de Santa Clara, Municipio de San Javier, Estado de Sonora*: Com. Direct. Invest. Recursos Minerales (México), Bol. 9, 108 p.