

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**"ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO<sub>2</sub> ,  
SIERRA DE LA GAVIA-CUENCA DE SABINAS,  
COAHUILA, MÉXICO".**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO GEÓLOGO**

PRESENTA

**JORGE BELTRÁN VILCHIS**

DIRECTOR: DR. JOSÉ RICARDO PADILLA Y SÁNCHEZ

MÉXICO, D.F. 2013



*EL INGENIO DE INGENIARSE LAS PARA HACER QUE HACE ,Y NO HACER NADA, LE DA VALOR NO A LO QUE HACE, SI NO A LA INGENUA SENSACION DE NO SABER NADA Y QUE POR AZARES DEL DESTINO LE LLAMEN INGENIERO.*

*México país de Ensueño, 2013.*



RESUMEN

CAPÍTULO 1. INTRODUCCION	13
CAPÍTULO 2. OBJETIVO	17
CAPÍTULO 3. GENERALIDADES	21
■ UBICACION Y VIAS DE ACCESO	
■ FISIOGRAFIA	
CAPÍTULO 4. MARCO GEOLÓGICO	27
■ ESTRATIGRAFÍA	
■ GEOLOGÍA REGIONAL	
■ GEOLOGÍA LOCAL	
CAPÍTULO 5. MARCO TECTÓNICO	47
■ GEOLOGÍA ESTRUCTURAL DE LA SIERRA LA GAVIA	
CAPÍTULO 6. ALMACENAMIENTO GEOLOGICO DE CO <sub>2</sub>	51
<small>CCS: CARBON CAPTURE AND STORAGE 2</small>	
■ MARCO CONCEPTUAL	
■ EJEMPLOS EN EL MUNDO	
CAPÍTULO 7. MODELO GEOLÓGICO 3D	65
■ MAPAS Y SECCIONES UTILIZADAS	
■ MODELO 3D	
■ ANÁLISIS DE RESULTADOS	
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83

BIBLIOGRAFÍA



**E**l almacenamiento geológico de  $\text{CO}_2$  es un tema actual en las agendas de gobierno a nivel internacional, de ahí la importancia de abordar el tema de ante la inminente necesidad de mitigar el impacto ambiental que esta sufriendo nuestro planeta.

La “Sierra de la Gavia” situada en la porción central del estado de Coahuila, México, brinda una oportunidad geológicamente hablando, para el almacenamiento del  $\text{CO}_2$ , gas de efecto invernadero. Dichas características se detallan analítica y gráficamente en un Modelo Geológico 3D, el cual es el resultado de la integración de la información con la que se cuenta: secciones geológicas, datos estructurales, procedimientos para elegir a sitios factibles para el almacenamiento del  $\text{CO}_2$ , etc. el modelo geológico 3D de la Sierra de la Gavia tiene la función de brindar una aproximación detallada del comportamiento del subsuelo de dicha zona, ello con el fin de caracterizarla y entender los parámetros que influyen en un volumen posible de  $\text{CO}_2$  que pueda almacenarse.

Las tecnologías verdes como actualmente se conocen, tienen por fin, el brindar un bienestar, mediante la prevención y remediación del medio ambiente, ello de manera eficaz y sin afectar a otras áreas de la industria actual, todo esto esta presente en el tema de Almacenamiento Geológico de  $\text{CO}_2$  (Carbon Capture and Storage).





Geological storage of CO<sub>2</sub> or better known as Capture Carbon and Storage is a current issue on the agendas of international governance, hence the importance of addressing the issue of how important the imminent need to mitigate the environmental impact that our planet is suffering.

The “Sierra de la Gavia” located in the central portion of the state of Coahuila, Mexico, provides an opportunity geologically speaking, for the storage of CO<sub>2</sub>, a greenhouse gas. These characteristics are analytically and graphically detailed in 3D Geological Model, which is the result of the integration of the information that counts: Geological Sections, Structural data, procedures for electing feasible sites for CO<sub>2</sub> storage, etc.. 3D Geological Model of the Sierra de la Gavia has the function to provide detailed approximation of the behavior of the subsurface in that area, so in order to characterize and understand the parameters that influence the volume of CO<sub>2</sub> that can be stored.

The green technologies as currently known, aim, to provide welfare through the prevention and remediation of the environment, this effectively and without affecting other areas of the actual industry, all this is present in the theme of Geological Storage of CO<sub>2</sub> (Carbon Capture and Storage).





CAPÍTULO 1.  
**INTRODUCCIÓN**



**E**ste trabajo pretende abarcar de manera general las perspectivas de una zona específica en México para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>, así como un panorama general a nivel mundial de nuestro país frente a la capacidad que tiene como potencial almacenador de CO<sub>2</sub>.

El 76% de la energía eléctrica proviene de combustibles fósiles, dando como resultado que se emita a la atmósfera más de 100 millones de toneladas anuales de CO<sub>2</sub>. La Agencia Internacional de Energía (IEA) plantea una serie de estrategias que deberán tomarse en cuenta dentro de los próximos 40 años buscando con ello contrarrestar el crecimiento de emisiones de CO<sub>2</sub>, las cuales amenazan con duplicarse en el periodo ya mencionado.

Las tecnologías para almacenamiento de gases en el subsuelo son ya bien conocidas a nivel mundial. Pero no fue sino hasta la década de los noventas que comenzó a usarse como medida de secuestro de carbono. En la actualidad existen proyectos de este tipo en todo el mundo aunque la mayoría de ellos son a nivel demostrativo y algunos operando con cantidades significativas de CO<sub>2</sub> (millones de Mt/año).

El secuestro de carbono se define como la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> que de otra forma sería emitido a la atmósfera ó permanecería en ella.

El proceso de secuestro de carbono comienza con la fase de captura, para que la siguiente fase sea el transporte, y finalmente viene la fase del almacenamiento, esta última fase es la que atañe realmente a este trabajo, ya que no se ahondara demasiado en las 2 primeras fases, ya que se pretende proporcionar las bases tanto como geológicas, estructurales, tectónicas, para que la “Sierra la Gavia” sea caracterizada conforme al volumen de CO<sub>2</sub> que se determine pudiese almacenarse en ella.





CAPÍTULO 2.  
**OBJETIVO**





**P**roporcionar un modelo 3D, el cual sea resultado de una compilación de información tal como:

- Secciones geológicas
- Estratigrafía
- Marco Tectónico
- Datos Estructurales

Dicho modelo 3D se realizara con la ayuda del software “MOVE”, el cual está diseñado para un mejor entendimiento de los rasgos estructurales que deseen analizarse, los cuales para nuestro caso resultan de suma importancia, ya que con ello se podrá dar una conclusión que lleve a recomendaciones las cuales servirán a la clasificación del proyecto para almacenamiento de CO<sub>2</sub>.





CAPÍTULO 3.  
**GENERALIDADES**



## UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

La “Sierra la Gavia” se encuentra en la parte sur de la Cuenca de Sabinas, la cual a su vez está situada en el Noreste de México, abarcando del noroeste de Coahuila y hacia la parte occidental de Nuevo León, con una superficie aproximada de 37,000 km<sup>2</sup>. La Cuenca de Sabinas es una cuenca sedimentaria mesozoica, con un espesor de más de 5000 m. de rocas sedimentarias depositadas en ambiente marino, teniendo una columna estratigráfica comprendida desde el Triásico al Cretácico Superior, la cual está deformada debido a esfuerzos compresionales en el Cretácico Superior, su génesis está relacionada con la apertura del protogolfo de México en el Jurásico medio y su deformación principal se debió al levantamiento tectónico Laramídico en el Paleógeno.

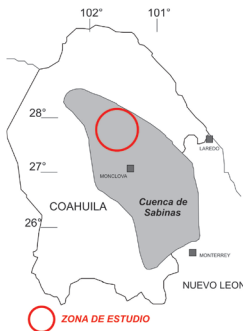


Fig. 1 Ubicación Geográfica de la “Sierra la Gavia”. Imagen georeferenciada en Google Earth.

## VÍAS DE ACCESO

El estado de Coahuila se ubica en la porción Centro-Norte de la República Mexicana y colinda al norte con los Estados Unidos de Norteamérica, al oriente con el estado de Nuevo León, por el Sureste con el estado de San Luis Potosí, y al poniente con el estado de Chihuahua. La Sierra la Gavia se halla al centro-este del estado de Coahuila, casi en colindancia con el estado de Nuevo León; la parte oriental de la sierra esta aproximadamente a 80.5 km. en línea recta de la ciudad de Monterrey, Nuevo León.

La manera más sencilla de tener acceso a la Sierra la Gavia es por medio de la carretera Federal No. 57, ya que esta la corta en su parte poniente, cerca del ejido San Lázaro.



Fig. 2 Mapa carretero de los alrededores a la "Sierra de la Gavia". Tomada de Google Maps 2013.

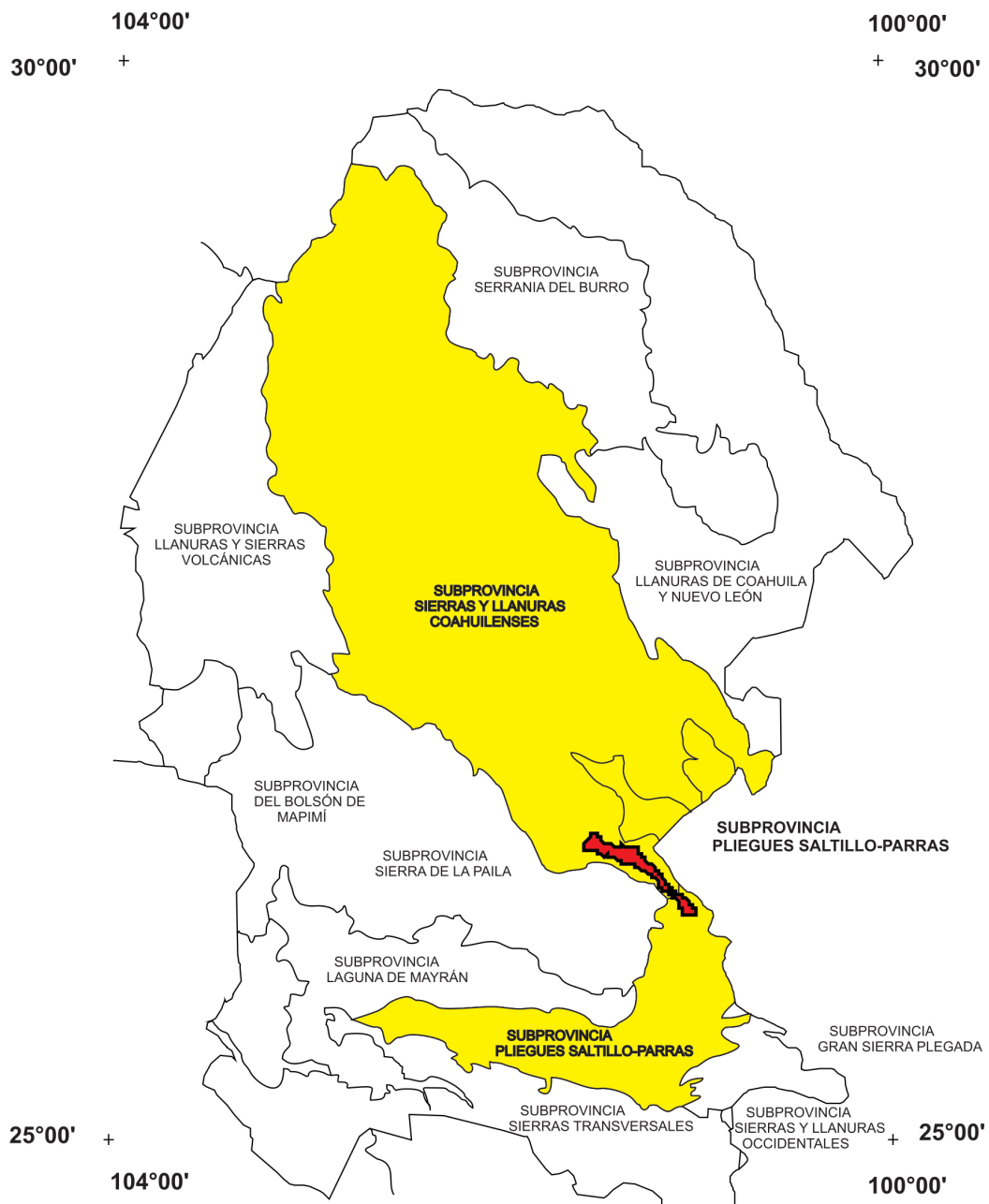


Fig. 3 Mapa Fisiográfico de Coahuila. Digitizado del anuario estadístico de Coahuila.

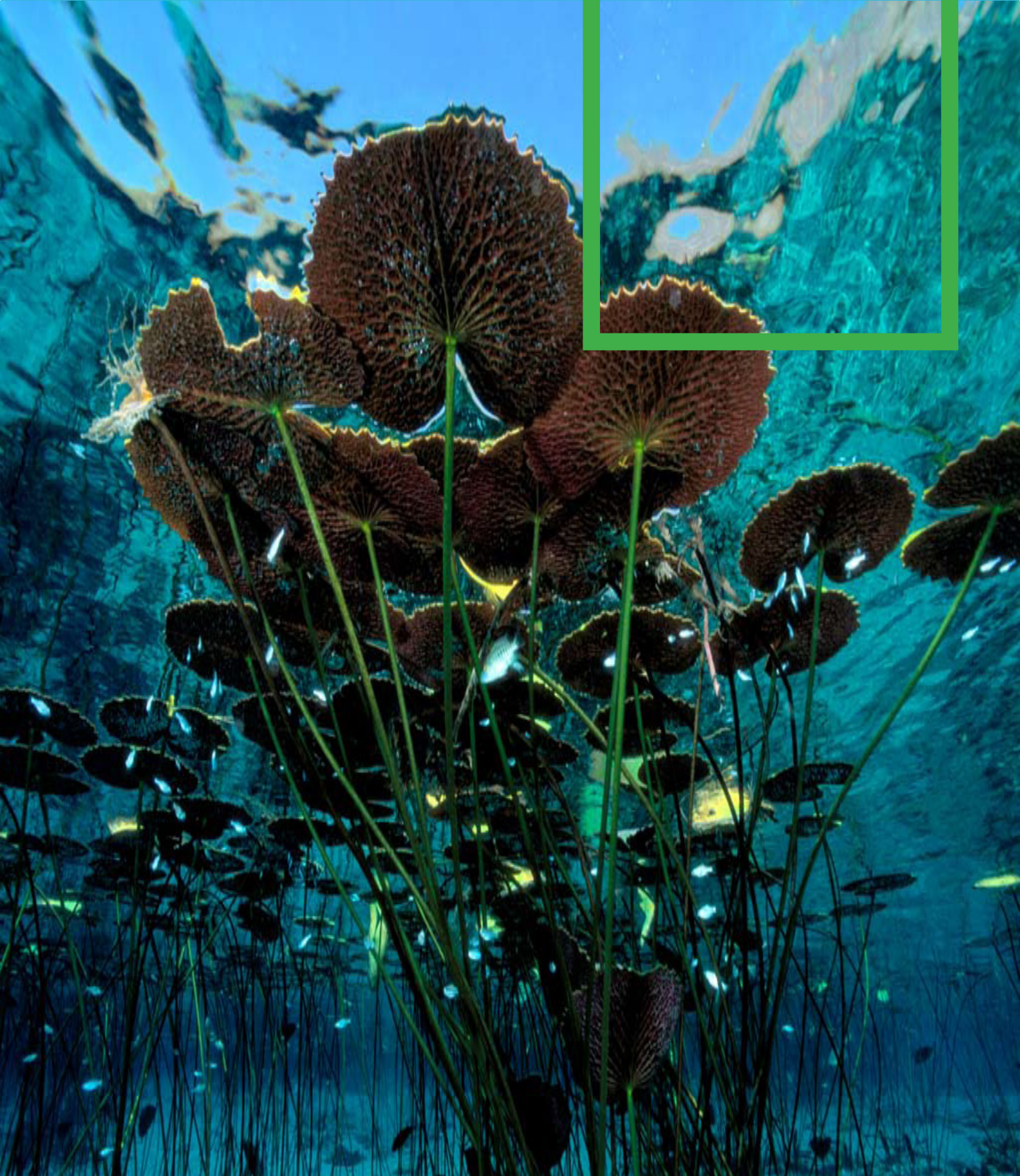
La “Sierra la Gavia” se encuentra dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental (SMO), la cual cruza de Noreste del estado de Coahuila para extenderse hacia el sureste del Estado, hasta conectar con la Sierra Madre Occidental al Norte de Cuencamé, Dgo. La SMO consiste en un conjunto de sierras menores, orientadas con el mismo rumbo de la gran sierra y que están constituidas básicamente por calizas y en menor proporción por areniscas y lutitas.

Las altitudes máximas de esta provincia oscilan entre los 2000 y 3000 msnm. Estando localizada su parte de mayor altitud entre Saltillo, Coah. y Ciudad Victoria, Tamps.





CAPÍTULO 4.  
MARCO GEOLÓGICO





**E**ste capítulo se abordara con mayor interés a la información que favorece desde el punto de vista a la “Sierra la Gavia” como un lugar con potencial para el Almacenamiento Geológico de CO<sub>2</sub>, dichas características se mencionarán en el capítulo siguiente (Cap. VI – Almacenamiento Geológico de CO<sub>2</sub>). Cabe decir de antemano que las características para que dicho sitio sea considerado como factible, se asemejan en buena medida a las que favorecen a que una cuenca sea almacenadora de hidrocarburos, en este caso, la Cuenca de Sabinas, de la cual a continuación se describirá en cuanto a su geología Regional y Local (Sierra la Gavia).

## ESTRATIGRAFÍA

La secuencia estratigráfica del Golfo de Sabinas comprende rocas del Jurásico Tardío y Cretácico cuyos ambientes estuvieron gobernados por elementos positivos como son: La Isla de Coahuila, Monclova, La Mula, Picachos, San Carlos y la Península de Tamaulipas. Particularmente en el Cretácico Inferior (Necomiano) donde los cambios de facies son muy notables.

El espesor de la comuna geológica expuesta en las estructuras del Golfo de Sabinas es de más de 5000 m y está representada en forma generalizada por rocas carbonatadas, evaporíticas, clásticas, dolomías y en ocasiones arrecifales.

Dentro de estas rocas existen aquellas que por sus características litológicas podrían considerarse como generadora de hidrocarburos, probables rocas madre o constituir rocas sello.

A partir de datos indirectos se infiere que en la Cuenca de Sabinas se depositaron capas rojas de grandes espesores del Jurasico Temprano (Grupo Huizachal). La acumulación de estas secuencias clásicas de rift probablemente ocurrió en gra-

bens y semigrabens. También se produjo probablemente el emplazamiento de rocas volcánicas calcoalcalinas en las etapas iniciales e intermedias del desarrollo del rift, intercaladas con los conglomerados continentales (Garrison y McMillan, 1999). Posteriormente, ocurrió el depósito de evaporitas que precipitaron durante la primera trasgresión marina (Padilla y Sánchez, 1982, 1986).

En el transcurso del Calloviano al Oxfordiano Inferior, se depositaron secuencias de transgresión compuestas por conglomerados, evaporitas salinas intercaladas con rocas terrígenas de grano fino, evaporitas anhidríticas y carbonatos. Su espesor en conjunto sobrepasa los 2500 m. En el centro de la cuenca precipitaron principal-

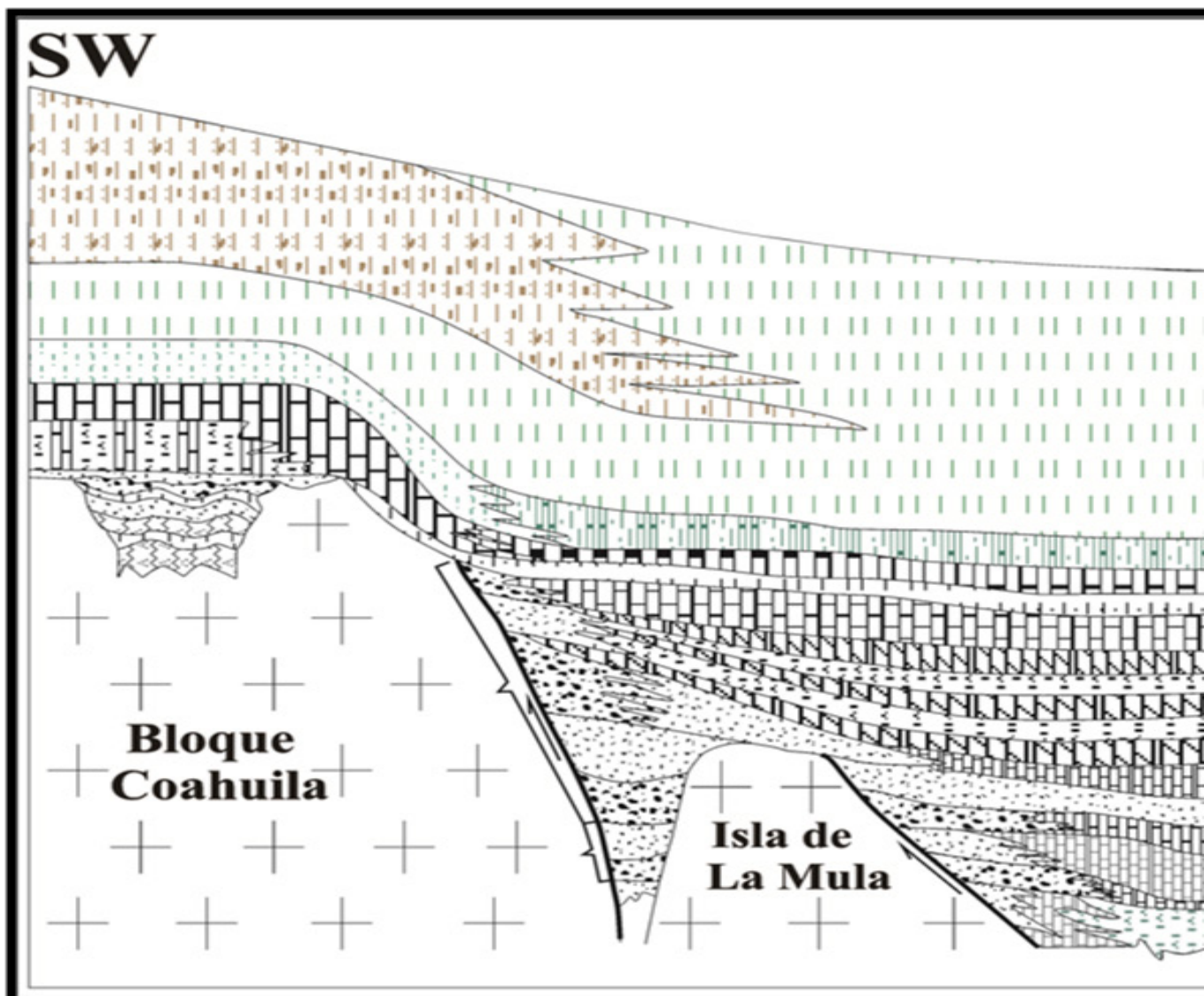
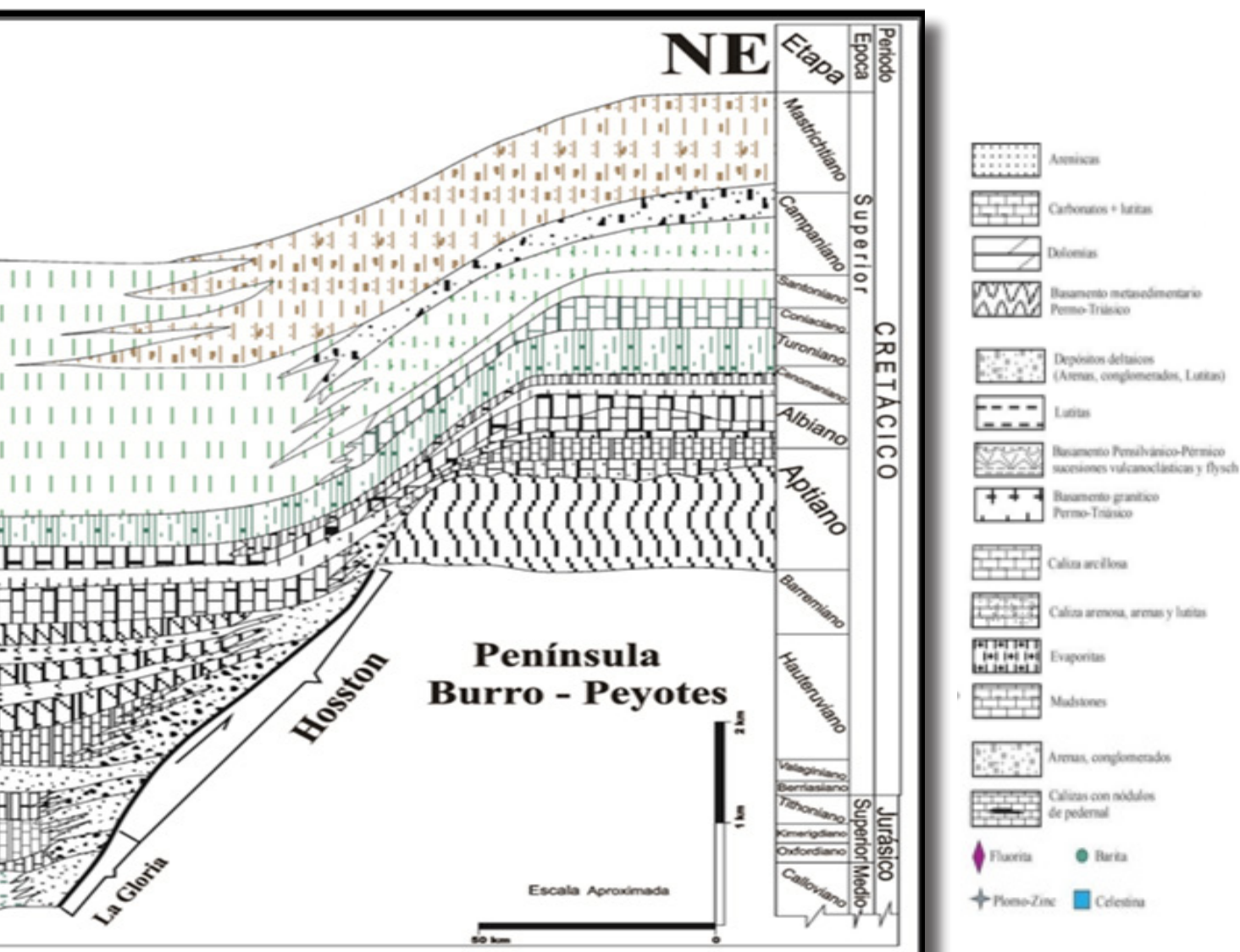


Fig. 4 Sección transversal, que muestra la configuración interna restituida (anterior a la orogenia Larámide), de la cuenca mesozoica del Noreste de México. Digitizada de González - Sánchez, 2007.

mente evaporitas (anhidritas, yeso, sal), correspondientes a la Formación Minas Viejas, con un espesor original de 1000 m (Goldhammer, 1999).

Hacia el Arco de Tamaulipas, la sal tiende a desaparecer y es reemplazada por anhidrita y carbonatos interdigitados hacia la base de la Formación Olvido y por carbonatos de alta energía hacia su cima, con un espesor de 500 m en total.

En las áreas adyacentes a los bloques emergidos de basamento, en cambio, se desarrollan rocas de facies marinas someras compuestas por areniscas cuarzofeldespáticas y conglomerados de la Formación La Gloria (Padilla y Sánchez 1986). Esta formación presenta espesores entre 50 y 100 m, sobrepasa los 600m en las proximidades de los bloques de basamento. Hacia el centro de la cuenca, la Formación La Gloria cambia transicionalmente hacia arriba a carbonatos de plataforma de la Formación Zuloaga (Oivanki, 1974).



Durante el Oxfordiano Superior, las facies de arenas de playa de la Formación La Gloria continúan depositándose de forma simultánea, con los carbonatos y evaporitas de la Formación Olvido (Padilla y Sanchez 1986; Goldhammer, 1999).

Desde el Kimmeridgiano Inferior al Tithoniano, conforme aumenta la subsidencia de la cuenca, las formaciones La Gloria y Olvido son cubiertas por lutitas negras de la Formación La Casita (según Eguiluz de Antuñano, 2001) ó Grupo La Casita (según Humphrey, 1956). El Grupo la Casita está integrada por tres miembros, el inferior con lutitas carbonosas, que cambian a facies de arenas costeras hacia los márgenes de la cuenca, el miembro intermedio contiene areniscas, interestratificadas con carbonatos, cuyo tamaño de grano aumenta hacia las orillas de la formación, y el miembro superior formado por lutitas calcáreas negras y limolitas. Los espesores de esta formación en su totalidad varían desde 60 hasta 800m, y su edad abarca desde el Kimmeridgiano hasta la base del Berrisiano.

En el Cretácico Inferior se acumularon sedimentos clásticos marinos someros y marginales gruesos, areniscas y lutitas de la Formación Barril Viejo, con espesores de 250 m. a 350 m. y una edad correspondiente al Hauteriviano Inferior. Hacia el Sureste, esta información cambia lateralmente a facies de carbonatos de plataforma marina de alta energía, correspondientes a la Formación Menchaca del Berrisiano (Imlay, 1940), con espesores entre 250 y 300 m. Mas hacia el Sureste, el cambio lateral de facies prosigue hacia facies de plataforma abierta y facies de cuenca, representadas por lutitas y carbonatos interestratificados de la Formación Taraises (Imlay, 1936; Goldhammer, 1999), con una edad asignada del Berriasano al Hauteriviano Inferior y espesores que varían entre 135 y 500 m (Goldhammer, 1999).

En las inmediaciones de la Península Burro-Peyotes se depositaron sedimentos terrigenos de la Formación Hosston, en facies fluviales (areniscas y conglomerados) con un rango de edad que abarca desde el Berriasano hasta el Barremiano Superior. En los alrededores del Bloque de Coahuila y la Isla de La Mula, en cambio, se depositaron conglomerados y areniscas en ambientes terrestres a transicionales y marinos someros de la Formación San Marcos, con espesores de 1000 m (Chávez-Cabello, 2005), cuya acumulación es sincrónica a la Formación Hosston (Eguiluz de Antuñano, 2001).

## FORMACIÓN INDIDURA

Redefinida por Kelly (1936), en la localidad de Delicias, Coahuila, quien la describió por los afloramientos localizados en el flanco oriental del Cerro la Indidura.

Se observan tres miembros diferentes de la Formación en las dos Sierras al SE de Torreón. Sobre el flanco Norte y Sur de la Sierra de Mayran se tienen areniscas de grano fino, de color gris oscuro a pardo, la cual intemperiza a blanco y amarillo claro. En la parte Sur del sinclinorio la Peña, se observan dos, el miembro Inferior aflora en la parte Sur del Cañón sin Nombre, se encuentra constituido por lutitas calcáreas resquebrajadas y calizas nodulares color gris que intemperizan a color amarillo;

En esta unidad no se recolectaron fósiles.

El miembro superior se observó sobre el flanco Norte del Cañon constituido por lutitas laminares de color oscuro, las que intemperizan a café rojizo, estas se encuentran interstratificadas con lutita que contiene fosiles (*Inoceramus labiatus*).

## FORMACIÓN AURORA

Esta unidad fue definida por Burrows (1910), para una secuencia predominantemente calcárea, cuya localidad tipo se encuentra en la Sierra del Cuchillo Parado, situada al Noreste del estado de Chihuahua. En general esta unidad se encuentra distribuida en todo el Noreste de Mexico.

Litologicamente está constituida por calizas de color gris claro, en estratos gruesos a masivos, tipo mudstone con nódulos de pedernal; es fosilífera y presenta estilolitas paralelas ala estratificación. Su espesor no es muy variable oscilando entre 400 a 600 m. por su posición estratigráfica y por su contenido faunístico se considera esta Formacion del Albiano (De Cserna, 1956).

Se correlaciona con la Formacion Acatita, parte inferior de la Formacion Gleen Rose y la parte media de la Formacion 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 *miliolidas*), bordeando la ya sumergida Isla de Coahuila.

## FORMACIÓN CUESTA DEL CURA

Imlay (1936) describió por primera vez la caliza Cuesta del Cura, lo que se compone de calizas delgadas ondulantes con bandas de pedernal negro, que aflora en casi toda la Sierra de Torreon-Monterrey, aunque con espesores de no más de 300m.

Consiste principalmente de capas medianas a delgadas y onduladas de caliza gris oscura a negra, compacta, un poco arcillosa. Contiene además, nódulos, lenticulos y bandas de pedernal negro y amonitas junto con microfauna que corresponde a una edad del Albiano-Cenomaniano.

La Formacion Cuesta del Cura es correlacionable con las siguientes Formaciones: con la caliza Sierra Madre en Tabasco y el Istmo de Tehuantepec, Tamaulipas Superior y caliza el Abra de la Provincia Tampico-Misantla. Tambien se correlaciona con la parte inferior con la Formacion Kiamichi y el Grupo Washita indiferenciado del Noreste de Mexico y Oriente de Texas.

## FORMACIÓN LA PEÑA (APTIANO SUPERIOR)

Definida por Imlay (1936), como una secuencia constituida por dos miembros: el inferior calcáreo y el superior arcillo-calcáreo. Su localidad tipo se encuentra en el flanco Norte de la Sierra de Taraises, aproximadamente a 40 km al Suroeste de Parras, Coahuila.

Consiste en dos unidades, la parte inferior está formada por capas delgadas a medias de caliza color gris claro con nódulos de pedernal y escasas interestratificaciones de material arcilloso. En la parte superior son más abundantes las capas de caliza las cuales se adelgazan y toman un aspecto lajoso, presentando transiciones a limonita calcárea; esta unidad adopta tonos ligeramente rojizos por el intemperismo. La Formación La Peña descansa concordantemente sobre la Formación Cupido y subyace también concordantemente con las calizas de la Formación Aurora.

Por su contenido faunístico y posición estratigráfica, se le ha asignado una edad del Aptiano Superior. Es correlacionable con la Formación Cuchillo, con la Formación Optates y con la Formación Uvas. Estas secuencias arcillosas indican la máxima transgresión marina iniciada durante el Jurásico Superior y cubre totalmente los elementos positivos (Paleo Isla de Coahuila) y la Paleo Península de Tamaulipas).

Se depositó en un medio de plataforma homogénea con sedimentación pelágica y terrígena en aguas no muy profundas (Humphrey y Diaz, 1956).

## FORMACIÓN TARAISES (BERRISIANO-HAUTERIVIANO INFERIOR)

El nombre de Formación Taraises fue denominado por Imlay (1936) para una secuencia de calizas fosilíferas y calizas arcillosas que afloran en el Cañón de Taraises, situado en la porción occidental de La Sierra de Parras, Coahuila. También esta formación se encuentra aflorando en la Sierra de Lampazos.

Está constituida por calizas arcillosas de estratos medios que se encuentran interestratificados con lutitas calcáreas de color gris oscuro a pardo, mientras que otras calizas son de color gris claro que intemperizan en color gris oscuro y presentan concreciones en el área. De acuerdo a su fauna se ha determinado una edad del Berriasiano al Hauteriviano inferior y se correlaciona con la Formación Menchaca, con la arcosa San Marcos y con el Grupo Durango en Texas. Los sedimentos de esta formación fueron depositados en un ambiente de aguas someras, claras y que en algunos estas aguas estuvieron estancadas, dando lugar a un ambiente reductor que se manifiesta por la presencia de nódulos de pirita (Uribe y A. Cuevas, 1979).



## FORMACIÓN CUPIDO (BARREMIANO SUPERIOR)

Fue descrita por Imlay (1937) y por Humphrey (1956), como una unidad de calizas de estratificación gruesa, media y delgada, de color gris oscura a negra, presentando fractura subconcoidal; debido al interemperismo toma un color gris azulado. Sus capas son más gruesas hacia lka cima donde alcanza espesores de 2 a 3 m, las cuales contienen líneas estilolíticas, se encuentra en Sierra de Parras, encajonada por la Formacion La Peña y Taraises abajo.

La localidad tipo fue designada en la pared Norte del Cañón del Mimbres, alrededor de 60 km al Sureste de Parras, Coahuila.

Presenta tres facies bien determinadas: la facies de plataforma, la facies arrecifal y la facies pelágica (Zwanzinger, 1979), presentando un dominio costero hasta el dominio de cuenca (Zwanzinger, 1979). El espesor es variable y está en función de su ambiente de depósito, aumentando conforme aumenta la distancia de las costas de la Isla de Coahuila hacia el Golfo de Sabinas (Humphrey y Diaz, 1956).

Por su posición estratigráfica y el contenido faunístico presenta una edad del Hauteriviano Tardío–Aptiano Temprano. La sedimentación de la Formación Cupido durante el Hauteriviano al Aptiano Inferior, forma un complejo sedimentario llamado Comple Cupido (Zwanzinger, 1979), que marca un cambio notable de sedimentación predominantemente clástica a sedimentos calcáreos.

## FORMACIÓN LA MULA (BARREMIANO)

Definida por Imlay (1940), quien designo al Potrero de La Mula 30 km, al N-W de Ocampo, Coahuila, como localidad tipo. La característica distintiva para esta unidad es la presencia de lutitas en la parte inferior, cubierta por sedimentos calcáreos (mudstones), de la parte superior; el espesor total es de 674 m, en el Potrero de Padilla. Generalmente subyace a la Formación Cupido aunque lateralmente puede ser equivalente a facies profundas de esta Formación.

Hacia las partes más someras la formación gradúa a sedimentos terrígenos de la Formación Patula y también a las evaporitas de la Formacion La Virgen. Se considera se forma en porciones internas de la plataforma marina, que en un tiempo estuvo influenciada por sedimentos terrígenos finos.

## FORMACIÓN SAN MARCOS Ó ARCOSA PATULA (NEOCOMIANO-BERRIASIMO TARDIO-VALANGINIANO TARDIO)

Fue descrita por Kane (en Imlay 1940), en el potrero de San Marcos donde tiene un espesor total de 744 m, la cual consiste en la base de 80 m de espesor de conglomerados arcóscicos color rojo; el miembro tiene 510 m de arcosas y subarcosas con granos angulosos, pobremente clasificados, de estratificación gruesa y contiene algunas intercalaciones de guijarros; el miembro superior consiste de 154 m de arcosa conglomerática con estratificación media.

Humphrey y Díaz (1956), reportan un espesor de más de 1000 m para la arcosa San Marcos en el Pozo Ohio-Mex-San Marcos No 2, perforado sobre la plataforma de Coahuila. El medio ambiente de depósito se le considera de abanicos y planicies aluviales marginales.

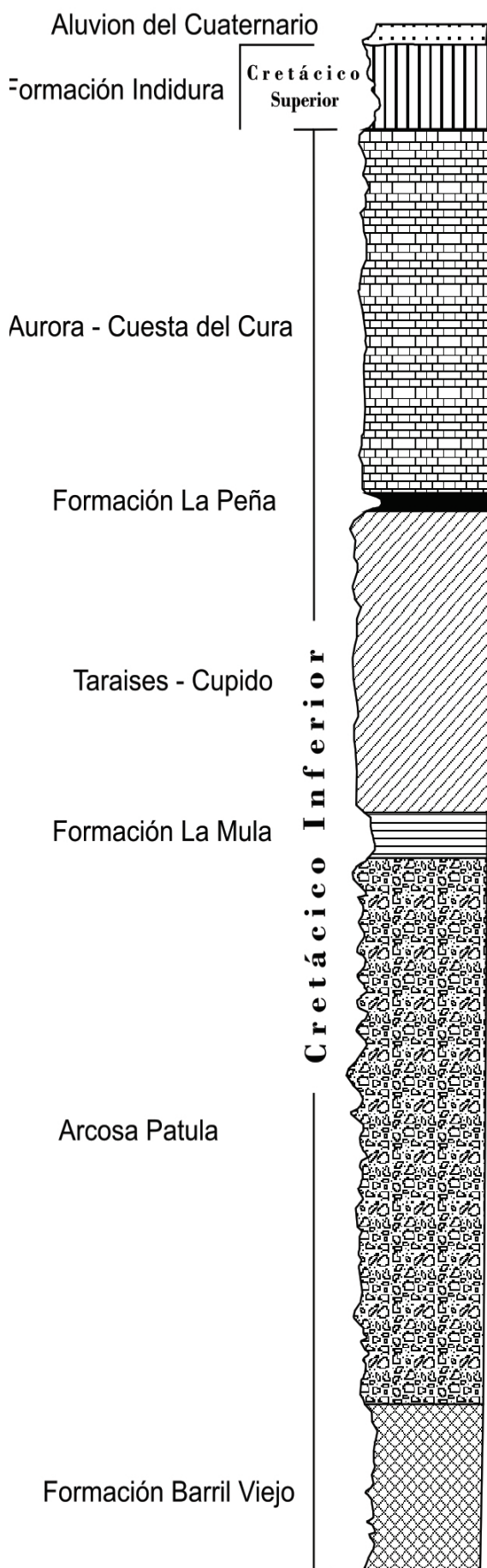
En el cañón de San Marcos su contacto superior con la Formación Cupido es transicional y su contacto inferior no se observa, mientras que en el Potrero de Menchaca esta unidad se encuentra limitada hacia su parte superior por la Formación Padilla y hacia la parte inferior por la Formación Menchaca, siendo sus contactos concordantes (Uribe y A. Cuevas, 1979).

## FORMACIÓN BARRIL VIEJO (VALANGINIANO TARDIO-HAUTERIVIANO TEMPRANO)

Kane denominó como lutitas Barril Viejo a una secuencia arcillosa que posteriormente fue introducida por Imlay, tomando como localidad tipo el Potrero de Barril Viejo, localizado aproximadamente a 35 km al Sureste de Cuatro Ciénegas, Coahuila (Uribe y A. Cuevas, 1979).

Consiste de margas nodulares y lutitas, intercaladas con wackestone y limonitas, como restos orgánicos (pelecípodos, gasterópodos, tubos de nelidos equinoides y corales solitarios y algunos amonitas), esta unidad presenta pendientes topográficas características cuyos estratos cubren a las capas dolomíticas de la Formación Sacramento. El espesor máximo de la Formación Barril Viejo es de 350 m, y aparece en la esquina N-W de Potrero de Oballos, de aquí se adelgaza hacia el SW y está ausente en el Potrero de San Marcos. Se considera el ambiente de depósito perteneciente a aguas marinas marginales.

## ESTRATIGRAFÍA DE LA “SIERRA DE LA GAVIA”



Las rocas que constituyen el marco geológico de La Sierra de la Gavia son de edad entre el Cretácico Temprano hasta el Cuaternario. Sus relaciones con otras unidades estratigráficas con la provincia plegada de Coahuila y probablemente su equivalente de la costa norte del golfo se representan en la Figura 5.

Fig. 5 Columna estratigráfica de la “Sierra de la Gavia”.  
Digitizada de Krutak, 1967.

A continuación se mostrará una una sección estratigráfica compuesta de las unidades de rocas expuestas en la Sierra de la Gavia. La **Tabla 1** muestra las unidades de roca presentes dentro y a lo largo de los flancos de la Sierra. Las mejores exposiciones de estratos de Coahuila-Comanche en la Sierra de la Gavia están a lo largo de La carretera México 57, que corta a través de la estructura en la zona de La Muralla. Existen Parcialmente expuestas secciones de la parte más baja de la formación Indidura a lo largo de la base hacia el exterior de la Sierra Norte y al este de la zona conocida como “La Muralla” (ver el mapa general).

**TABLA 1.**  
MODIFICADO DE KRUTAK, 1967

EDAD	UNIDADES DE ROCAS
CUATERNARIO	Depositos Aluviales
CRETÁCICO	Indidura Aurora - Cuesta del Cura La Peña Taraises - Cupido La Mula Arcosa Patula Barril Viejo

El Aluvión obstruye las salidas de la mayoría de los cañones sobre ambos flancos, y en general oculta el contacto Aurora-Cuesta del Cura-Indidura, así como el afloramiento de Indidura-Parras.

Dentro de las regiones axiales del pliegue, como La Muralla, abanicos de caliche están presentes. El aluvión que desemboca de las bocas del Cañón en los flancos noreste y suroeste se une a grandes pendientes que recubren los espesores de las lutitas de Parras. Escombros dentro de las zonas axiales cubren una gran parte de cada unidad presente en el núcleo, desde la Formación Barril Viejo hacia arriba hasta las Calizas Taraises y Cupido. Las Formaciones Taraises-Cupido y Aurora-Cuesta del Cura sirven de base a la cresta del pliegue, de la cual destaca en relieve en contraste con las formaciones menos resistentes.

Entre estas dos unidades esta la Formación La Peña que ayuda para formar una topografía suave. Las lutitas y areniscas de la Formación la Mula afloran justo debajo de las calizas masivas de las Formaciones Taraises-Cupido, las cuales sostienen el borde interior topográfico de la parte brechada del pliegue en el área de la Muralla.

Los afloramientos de La Formación la Mula son escasos, se presentan con mayor frecuencia en las crestas altas, donde el talud de las unidades superiores no tienen oportunidad de acumularse. Las capas de la arcosa Patula subyacen toda la parte central del Potrero de Patula. Estos estratos están en gran parte cubiertos de aluviones o abanicos de caliche, pero que forman más bien prominentes crestas en ciertas áreas, en particular al norte y al oeste del Cañón de San Antonio.

Otros afloramientos ocurren en el Cañón de San Antonio, Cañón de Guadalupe, y Cañón de la Gavia.

Las Rocas de la Formación Barril Viejo están delimitadas por un pequeño grupo de rocas más viejas cerca de La Muralla, donde yacen debajo, rodeando colinas en el núcleo del pliegue bajas.



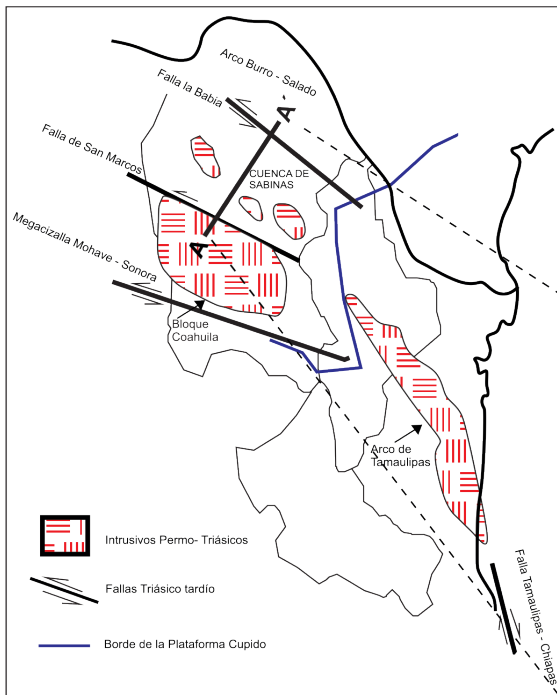
## GEOLOGÍA REGIONAL

Casi todas las áreas que actualmente producen hidrocarburos en México, se hallan en la planicie costera y en la Plataforma Continental del Golfo de México, sobre una franja que se extiende desde la frontera con Estados Unidos de América, hasta la margen occidental de la Península de Yucatán y del frente de la Sierra Madre Oriental, hasta la Plataforma Continental del Golfo de México; sin embargo, la Cuenca de Sabinas, Coahuila es la excepción.

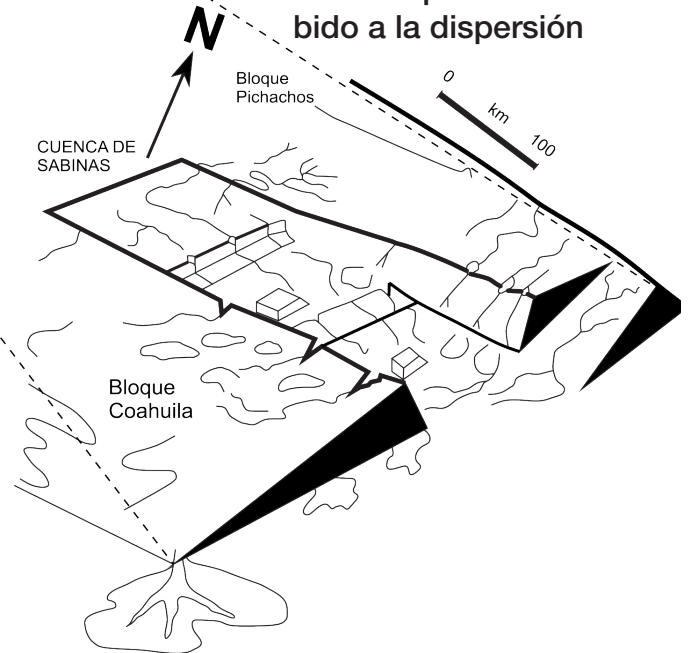
Las cuencas y plataformas de edad Jurásico Tardío y Cretácico se desarrollaron sobre un sistema de fosas (Grabens) y piares tectónicos (Horst), como producto de la separación entre América del Norte y África; este fallamiento se produjo durante el Triásico Tardío y dio origen a depresiones en las que ocurrió el depósito de las capas continentales de las formaciones Huizachal y Todos Santos. Al incrementar la separación de los continentes, ocurrieron en el Jurásico Medio las primeras transgresiones marinas en las fosas tectónicas preexistentes, dieron lugar a los depósitos de secuencias evaporíticas, donde predominó el depósito de sal.

Los elementos geológicos pre-callovianos dieron las bases para la división de zonas, provincias y áreas petroleras. Fuera de las áreas tradicionalmente petroleras, situadas en la planicie costera del Golfo de México, en la porción central del Estado de Coahuila y parte del Estado de Nuevo León, se ha puesto de manifiesto la presencia de hidrocarburos, tanto en secuencias del Cretácico como en el Jurásico Superior; esta área productora de hidrocarburos se encuentra dentro de la unidad geológica denominada Golfo de Sabinas, delimitada al oriente y poniente por los paleoelementos Península de Tamaulipas e Isla ó Península de Coahuila, respectivamente.

A continuación se tratarán ciertos puntos clave para entender la evolución geológica de la cuenca:



En el Triásico Tardío – Jurásico Temprano ocurre el rifting que marca el comienzo del rompimiento de la Pangea, la apertura del atlántico y la generación del Golfo de México, generándose las placas de Norte América, la placa de América del Sur y la placa de África. De esta manera, el Noreste de México durante el Mesozoico y Cenozoico está estrechamente relacionado al origen del Golfo de México. La deriva de Yucatán hacia el sur hasta el Jurásico Tardío y la separación de las placas debido a la dispersión



del piso oceánico, convirtieron el basamento del actual Noreste de México en altos y bajos estructurales, que corresponden con la Cuenca de Sabinas, el Bloque de Coahuila, el bloque de la Mula, la Península del Burro-Peyotes-Salado, el Arco ó Archipiélago de Tamaulipas y algunos otros elementos como el canal de Chihuahua y la Cuenca de Maverick.

Fig. 6 Mapa Paleotectónico del Noreste de México. Tomada de Villareal-Fuetes, 2008

Estos elementos frecuentemente están limitados por fallas laterales izquierdas y por fallas normales, estas últimas conformaron a estos horst y grabens que controlaron las Facies sedimentarias durante el Mesozoico. estos elementos frecuentemente están limitados por fallas laterales Izquierdas y por fallas normales, estas últimas conformaron a estos horst y grabens que controlaron las Facies sedimentarias durante el Mesozoico.



Las rocas en el bloque de Coahuila están compuestas en su parte basal de rocas ígneas y metamórficas de bajo grado, que conforman el basamento cristalino de edad Paleozoico Tardío - Mesozoico Temprano, que corresponden a un conjunto de arco; en la parte superior se tiene un paquete sedimentario marino de calizas de plataforma y evaporitas (Formación Acatita) que sobreyacen discordantemente el basamento y marcan el inicio de la transgresión marina del Aptiano Tardío sobre el bloque.

La evolución tectono-sedimentaria del Noreste de México y en específico, del área que ocupa el denominado Golfo de Sabinas, ha estado ligada de una manera muy estrecha a la apertura y desarrollo de Paleo-Golfo de México. Los cambios eustáticos que han regido durante la formación del Golfo de México se han manifestado en el Noreste de México como etapas periódicas de transgresiones y regresiones. De esta manera, se propició la depositación de secuencias sedimentarias compuestas principalmente de depósitos clásticos de ambientes costeros, depósitos evaporíticos de sabkha, y depósitos de carbonatos tanto de ambientes de plataforma somera y profunda como en complejos arrecifales.

Tales secuencias fueron depositadas ininterrumpidamente desde el Jurásico Medio hasta el Cretácico Superior, tiempo en el que la Orogenia Laramide detono el cambio en el régimen de depósito sedimentario para esta zona.

En el Jurásico Superior ocurrió una transgresión en el Noreste de México que dio lugar a la formación del Golfo de Sabinas y a la Isla de Coahuila; en las primeras etapas de la transgresión se desarrollaron en el Golfo de Sabinas depósitos evaporíticos, terrígenos y calcáreos, sobre todo en el Oxfordiano. A esta época corresponden las formaciones de Minas Viejas, Novillo, Olvido, Zuloaga y la Gloria. Con el avance de la transgresión marina, durante el Kimmerigiano y Tithoniano, se crearon los depósitos de mar abierto de las formaciones La Caia y Pimienta, constituidos de secuencias calcáreo-arcillosas, con horizontes carbonosos, así como los depósitos detríticos de la Formación La Casita.

Durante el inicio del Cretácico Inferior continuo la transgresión marina, lo cual dio origen al depósito, durante todo el Neocomiano de la Arcosa San Marcos; donde hubo menor influencia de terrígenos se depositó la Formación Menchaca la cual esta formada por una secuencia de calizas y algunas intercalaciones de margas y lutitas; esta formación constituye la base de la secuencia de plataforma del Neocomiano hacia arriba se tiene a la Formación Patula (areniscas cuarzosas), a la Formación Padilla (calizas y lutitas) y a la Formación La Virgen (calizas, dolomías y yesos).

Desde el Hauteriviano hasta el Aptiano en gran parte del Golfo de Sabinas se depositaron las calizas de la Formación Cupido en un ambiente de plataforma interna. En el límite del Aptiano-Albiano sobreviene un aporte generalizado de terrígenos finos hacia el Golfo de Sabinas que dan lugar a la Formación La Peña (calizas arcillosas, lutitas y limolitas). Durante el intervalo Albiano-Cenomaniano una importante transgresión marina que cubrió incluso los elementos hasta entonces positivos, origino

el desarrollo de gruesas secuencias de carbonatos en todo el Noreste de México. Sobre la Plataforma de Coahuila se depositaron secuencias de facies someras y evaporíticas gracias a la presencia de arrecifes que bordeaban a los anteriores elementos positivos; a este intervalo pertenecen las formaciones Aurora y Acatita.

En el Cretácico Superior con la retirada gradual de los mares hacia el oriente se depositaron en toda la región sedimentos fundamentalmente terrígenos provenientes de la porción occidental de México, pertenecientes a las secuencias del Cretácico Superior de las formaciones Georgetown (calizas arcillosas), Del Rio (lutitas y calizas arcillosas), Buda (calizas arcillosas) y Edge Ford (calizas arcillosas y lutitas).

Las deformaciones de la Orogenia Laramide se desarrollaron principalmente en la parte final del Mesozoico e inferior del Cenozoico. A este episodio pertenecen las estructuras anticlinales, sinclinales y fallas inversas tan características de la región. Posterior a la Orogenia Laramide sobrevino un fallamiento normal que favoreció la depositación continental de sedimentos aluviales, lacustres y eólicos en fosas tectónicas.

## GEOLOGÍA LOCAL

A continuación se abordara la Geología Regional correspondiente a la “Sierra de la Gavia”, con ello se describe de una manera breve pero concisa las litologías así como rasgos geológicos importantes para el desarrollo y entendimiento del proyecto en cuanto a la viabilidad y caracterización del sitio como almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>.

Los atributos geológicos de La Sierra de la Gavia se encuentran repartidos en las siguientes Provincias Geológicas (Fig. 4):

Cuenca de Parras y Sabinas

Penínsulas Paleográficas de Coahuila y Tamaulipas

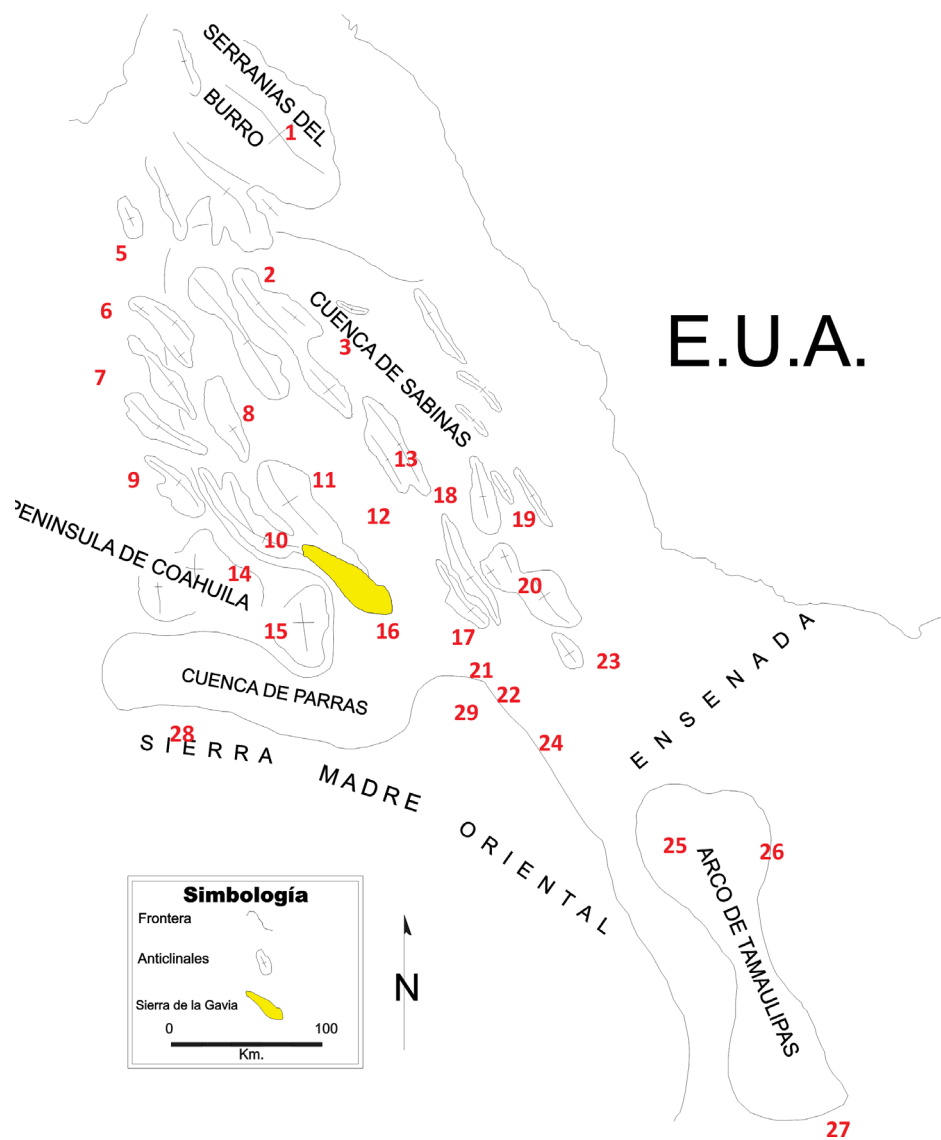


Fig. 7 Tendencia Estructural de la "Sierra de la gavia"  
Digitizada de Krutak, 1967

- |  |                          |                         |
|--|--------------------------|-------------------------|
| ① Serranías del Burro                          | ⑩ Sierra de San Marcos   | ⑳ Sierra Picachos       |
| ② Sierra de Sta Rosa                           | ⑪ Sierra de la Purísima  | ㉑ Sierra del Fraile     |
| ③ Sierras (Oballos)                            | ⑫ Sierra de la Gloria    | ㉒ Sierra de las Mitras  |
| ④ Sierra de Padilla                            | ⑬ Sierra de Pajaros      | ㉓ Sierra Papagayos      |
| ⑤ Sierra de Salsipuedes                        | ⑭ Sierra de los Alamitos | ㉔ Cerro de la Silla     |
| ⑥ Sierra Potrero                               | ⑮ Sierra de la Paila     | ㉕ Sierra San Carlos     |
| ⑦ Sierra de la Madera                          | ⑯ Sierra de la Gavia     | ㉖ Sierra Cruillas       |
| ⑧ Sierra de las Ovejas                         | ㉑ Sierra de Salinas      | ㉗ Sierra Aldama         |
| ⑨ Sierra de Lagunilla<br>y Sierra de la Fragua | ㉒ Sierra Bustamante      | ㉘ Sierra de Parras      |
|  | ㉓ Sierra de la Iguana    | ㉙ Saliente de Monterrey |





CAPÍTULO 5.  
MARCO TECTÓNICO



## GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

**Plegamientos – Este de la Península de Coahuila**

**Plegamientos – Noroeste del Arco de Tamaulipas**

En el área de la Sierra de la Gavia se tiene un anticlinal alargado y doblemente buzante, En el área de la Sierra de la Gavia se tiene un anticlinal alargado y doblemente buzante, el cual tiene dimensiones aproximadas de 89 kilómetros de longitud a lo largo. A unos 8 kilómetros del de los bordes de la zona noroeste, el pliegue buza abruptamente hacia el noroeste. Con respecto al ancho de su superficie, tomando en cuenta el contacto entre el Aluvión (Qal) y Aurora - Cuesta del Cura (Kac) en los flancos, oscila entre 1.3 a 10.2 km., con un promedio de alrededor de 6.8 km. Tres altos topográficos son los que resaltan en general:

- A. La alargada masa montañosa que forma la mayor elevación, se eleva fuera de la llanura del bolsón al Noroeste de la localidad “la Reata”.
- B. El “anticlinal la Reata”, una pequeño colina alargada de 5 km. de largo, al Sureste de Reata.
- C. “Domo Anheló”, el más largo con alrededor de 13.4 km de longitud, la cual es la anomalía positiva cargada más hacia el sureste.

### CONFIGURACIÓN AXIAL

A groso modo, el eje de la estructura anticlinal es doblemente buzante con una dirección preferencial Noroeste – Sureste. Cerca del área de Patula (ver el Mapa General), existe una cabalgadura a lo largo de la región del eje inmediatamente al sur de la Localidad De “Dolores”, y es ahí en donde el plano de charnela es casi horizontal. Inmediatamente hacia el Sureste, el plano de charnela en la cima del “Barril Viejo” se eleva a 10 grados hacia la intersección con la carretera Federal México 57.

Con dirección Este franco de la carretera México 57 y hacia el Suroeste del “Cañón de San Antonio” el plano de charnela es nuevamente horizontal, ya que buza 2° con dirección Sureste.

Con dirección Suroeste se encuentra otra elevación topográfica local, con una cantidad desconocida de datos estructurales. El buzamiento del eje en el límite sureste de la zona es  $4^{\circ}$  S.  $50^{\circ}$  E., arqueándose en dirección Sur y después Este hasta que termina el pliegue, esto hacia la zona de la “Reata”.

Los buzamientos extremos del anticlinal se encuentran en La Formación Aurora-Cuesta del Cura, de los cuales los ejes tienen una orientación aproximada de  $N 30^{\circ} W$ . A lo largo del anticlinal “La Reata”, se alcanzan inclinaciones de  $3^{\circ}$  y  $5^{\circ}$  al Noroeste y al Sureste respectivamente. Emergiendo de los depósitos aluviales, el mismo se eleva aproximadamente  $9^{\circ}$  sobre el “Domo Anheló”, con una orientación hacia el Sureste, y desciende aproximadamente  $12^{\circ}$  hacia el Sureste debajo del Aluvión del flanco Noreste del “Domo Anheló”.

## PLEGAMIENTOS

Los plegamientos de gran amplitud ocurren en ambos flancos de la sierra, tanto al Noreste como en el Suroeste. Los ejes de estas estructuras se muestran en el mapa general.

El plegamiento más prominente observado se encuentra en el extremo Suroeste de la sierra, esto al Noroeste de “San Lázaro”.

Otro plegamiento se da como una estructura Sinclinal el cual está presente en el extremo Noreste a pocos kilómetros al sur del “Rancho de la Gavia”; Las Formaciones: Taraises – Cupido, La Peña, y Aurora – Cuesta del Cura, son parte de este plegamiento.

El área que se encuentra inmediatamente al Noreste de la carretera México 57 en el extremo norte de la sierra, muestra un plegamiento abrupto anticlinal y un sinclinal que se desarrolla en la Formación Indidura. Ambos plegamientos y sus ejes buzaban abruptamente hacia el Noroeste.

En adición a estas grandes áreas de plegamientos, menores deformaciones son notorias en algunos de los carbonatos expuestos en la “Sierra de la Gavia”.

Las calizas Taraises – Cupido, particularmente muestran gradación en capas a gran escala.

La información acerca de los esfuerzos orogénicos que deformaron el área es escasa. De los alineamientos de los pliegues (Noroeste – Sureste) en la provincia, se puede hacer una conjetura, la cual nos indicaría que los esfuerzos compresionales actuaron del Suroeste hacia el Noreste o viceversa.



CAPÍTULO 6.  
ALMACENAMIENTO  
GEOLÓGICO DE CO<sub>2</sub>  
CCS: CARBON CAPTURE AND STORAGE <sup>2</sup>





## MARCO CONCEPTUAL

### PROPIEDADES DEL CO<sub>2</sub>

El bióxido o dióxido de carbono, también llamado anhídrido carbónico, es un gas inodoro e incoloro, ligeramente ácido y no inflamable a temperatura ambiente (20°C a 25°C). Está formado por una molécula lineal de un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno en la forma O=C=O. Es soluble en agua cuando se mantiene a presión constante pero tiende a volatilizarse al descender la presión, creando burbujas. Su forma común es gas pero se solidifica a temperaturas inferiores a -78°C, formando nieve carbónica, y puede licuarse si se le disuelve en agua. En solución acuosa crea el ácido carbónico, el cual es muy inestable para ser aislado en forma sencilla. Tiene una densidad en condiciones ambiente de 1.873 kg/m<sup>3</sup>.

Se utiliza en química para el control de temperatura en reactores y la neutralización de efluentes alcalinos y, en condiciones supercríticas, para teñido de polímeros, fibras animales y vegetales. También se utiliza para neutralización de aguas residuales y procesos de transporte a baja temperatura (-78°C). En la industria alimenticia se usa para la carbonatación de bebidas y, en combinación con nitrógeno, para aumentar la caducidad de los alimentos. También funciona como fluido criogénico; la cafeína se remueve del café con CO<sub>2</sub> supercrítico. En medicina se usa para dilatación quirúrgica en laparoscopías abdominales. Asimismo puede servir para aumentar la conductividad del agua ultra pura y para limpieza de resinas fotosensibles al CO<sub>2</sub> supercrítico, evitando así utilizar solventes orgánicos. Es una excelente alternativa para el control del pH del ácido sulfúrico.

PROPIEDAD	VALOR
Mayores riesgos	Producto a alta presión; inhalación, toxicidad 5000 ppm, no inflamable, no olor
Punto crítico	Temperatura 31°C, presión 73.825 bar, densidad 464 kg/m <sup>3</sup>
Densidad	1.873 kg/m <sup>3</sup> gas, 1562 kg/m <sup>3</sup> sólido y 1032 kg/m <sup>3</sup> líquido
Masa molecular	44.01
Ebullición (sublimación)	-78.5°C
Solubilidad en agua	1.45 kg/m <sup>3</sup> a 20°C
Estructura cristalina	Parecida al cuarzo (el cuarzo cristaliza en el sistema hexagonal)

**TABLA 2.**  
MODIFICADO DE KRUTAK, 1967

El CO<sub>2</sub> se encuentra principalmente en la atmósfera e hidrósfera; en la primera en una concentración de 0.04% aproximadamente. El ciclo del CO<sub>2</sub> es una sucesión de transformaciones biogeoquímicas que sufre el carbono a lo largo del tiempo y revista gran importancia para el clima en la Tierra. Se puede apreciar en forma esquemática en la figura.

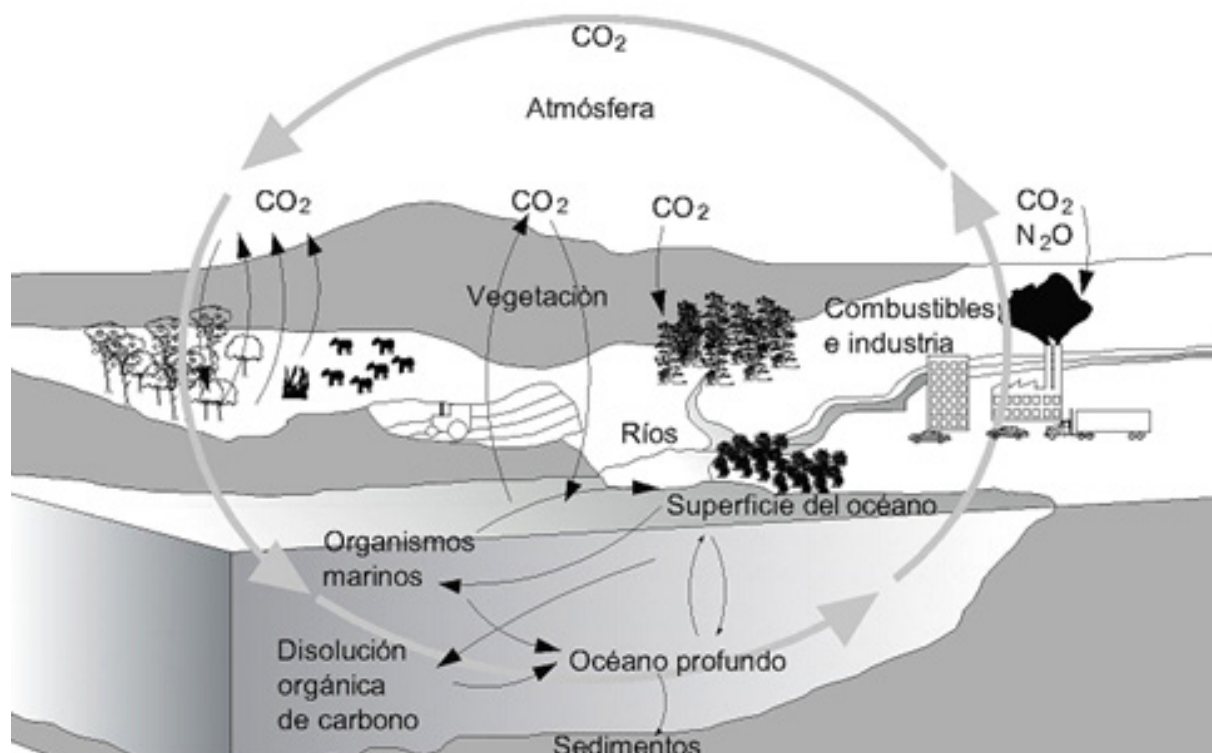


Fig. 8 Ciclo del CO<sub>2</sub>  
Tomada de Martínez-Montesinos, 2008

Es de primordial interés reducir la cantidad de bióxido de carbono que las plantas generadoras de energía eléctrica producen a partir de combustibles fósiles como energético principal, por ello las fuerzas de la economía de mercado están diseñando esquemas para la captura del CO<sub>2</sub>.

Los principales países emisores de CO<sub>2</sub> son los Estados Unidos, China (en la región este asiático) y la India (en la región sur de Asia); aunque también es reconocida como importante emisora la región noroeste de Europa.

De las plantas consumidoras de combustibles fósiles, las carboeléctricas son las principales productoras de CO<sub>2</sub>, un gas de efecto invernadero considerado el principal responsable del cambio climático en el mundo. Se estima que su producción total en las plantas que utilizan combustibles fósiles, en todo el mundo es de aproximadamente 23.5 gigatoneladas anuales, de las cuales en los Estados Unidos solamente se capturan de 35 a 50 millones de toneladas al año.

Existe un mercado muy limitado para el CO<sub>2</sub> producido comercialmente. Se usa, por ejemplo, en la fabricación de bebidas carbonatadas, para algunos procesos industriales como la producción de cemento y acero, además, en refinerías. También es inyectado en pozos petroleros para incrementar la producción de yacimientos que han sido sobre explotados; esta aplicación se conoce como Recuperación Mejorada de Crudo (RMC),\* mediante la utilización de CO<sub>2</sub>, tecnología que representa quizá la comercialización más importante para este gas. Otra aplicación ocurre en el proceso conocido como la Recuperación Mejorada del Metano (RMM): resulta que el metano se encuentra presente en las minas de carbón, y en aquellas que no han sido explotadas y tienen poca probabilidad de ser productivas. La RMM se basa en la absorción de CO<sub>2</sub> presente en el carbón; no obstante, esta tecnología se encuentra en su fase experimental.

## PERSPECTIVA DE LA CAPTURA Y ALMACENAMIENTO

El bióxido de carbono es emitido principalmente por la utilización de combustibles fósiles; tanto en grandes unidades de combustión –ejemplo: las usadas por la generación de electricidad– como por las pequeñas fuentes distribuidas (motores de combustión interna); también como resultado de algunos procesos industriales y debido a los incendios forestales.

La captura y almacenamiento del bióxido de carbono (CCS por sus siglas en inglés: Carbon Capture and Storage) es considerada la opción más factible para reducir las emisiones antropogénicas del CO<sub>2</sub>, tecnología que ya se aplica a fuentes de emisiones de este gas tales como plantas generadoras de electricidad o en lugares donde se realizan procesos industriales de gran escala. Algunas de estas fuentes pueden proporcionar combustible descarbonizado como el hidrógeno para los sectores del transporte, industrial y de la construcción.

Los tres componentes principales en el proceso de CCS son captura, transporte y almacenamiento, en el cual la primera etapa implica separar del CO<sub>2</sub> de otros productos gaseosos. En los procesos de quema de combustibles fósiles como en las plantas generadoras de electricidad, la tecnología de separación puede usarse para captar el CO<sub>2</sub> después de la combustión, o bien, descarbonizar el combustible antes de la combustión. Los sistemas Oxyfuel se han desarrollado para usarse en turbinas de gas, aunque esta tecnología se encuentra en la fase de experimentación (Figura 7).

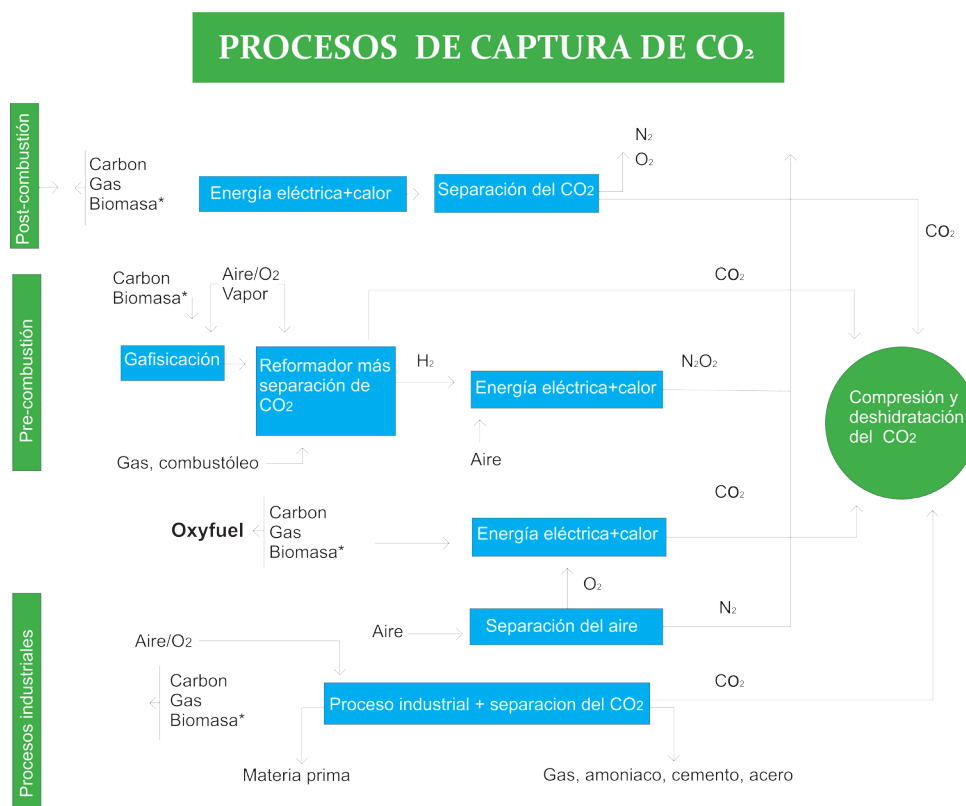


Fig. 9 Procesos de captura del CO<sub>2</sub>  
Digitizada de Tovar, 2008

En la segunda etapa se transporta el CO<sub>2</sub> capturado a un lugar apropiado para su almacenamiento, el cual deberá estar localizado a 300 km o menos de la fuente de CO<sub>2</sub>. Para ser transportado, el gas deberá ser comprimido a una densidad muy alta en las instalaciones donde se lleva a cabo la captura. El transporte se puede hacer por tubería o por barco. El primero se lleva a cabo con el gas comprimido en estado gaseoso, mientras que en el segundo, el CO<sub>2</sub> se encuentra en estado líquido, dado que de esta forma el gas ocupa menos volumen. La licuefacción de los gases se usa de manera rutinaria, por ejemplo, para el transporte del gas natural licuado. Si se realiza con cuidado, el transporte del CO<sub>2</sub> en cualquiera de las dos formas, no implica riesgos.

Finalmente, los métodos de almacenamiento incluyen la inyección dentro de formaciones geológicas o inyección a gran profundidad dentro del lecho marino, aunque también puede hacerse en formaciones geológicas subterráneas como yacimientos abandonados de gas natural o petróleo, formaciones salinas subterráneas y en minas de carbón no explotables. Se tiene varios años de experiencia en el almacenamiento del CO<sub>2</sub> y la elección del lugar depende de cuál sitio se encuentra más cercano y no conlleve riesgos de filtraciones; una vez almacenado, ya no se extrae. Los expertos han calculado que para filtraciones de CO<sub>2</sub> a razón de 0.01% anual de la cantidad previamente almacenada, la técnica de almacenamiento geológico representa un enfoque muy efectivo para su mitigación. En filtraciones menores a esta cantidad, se garantiza que 90% del CO<sub>2</sub> almacenado, permanecerá así aún después de mil años.

En términos teóricos hay cuatro medios geológicos para el almacenamiento de gas:

1. En espacios vacíos que quedan después de la extracción de hidrocarburos.
2. En los poros que se generan al desplazar metano por CO<sub>2</sub> existente en mantos de carbón.
3. En medios rocosos cristalinos muy fracturados, típicamente rocas basálticas.
4. En acuíferos que por su contenido salino no son atractivos para explotación.

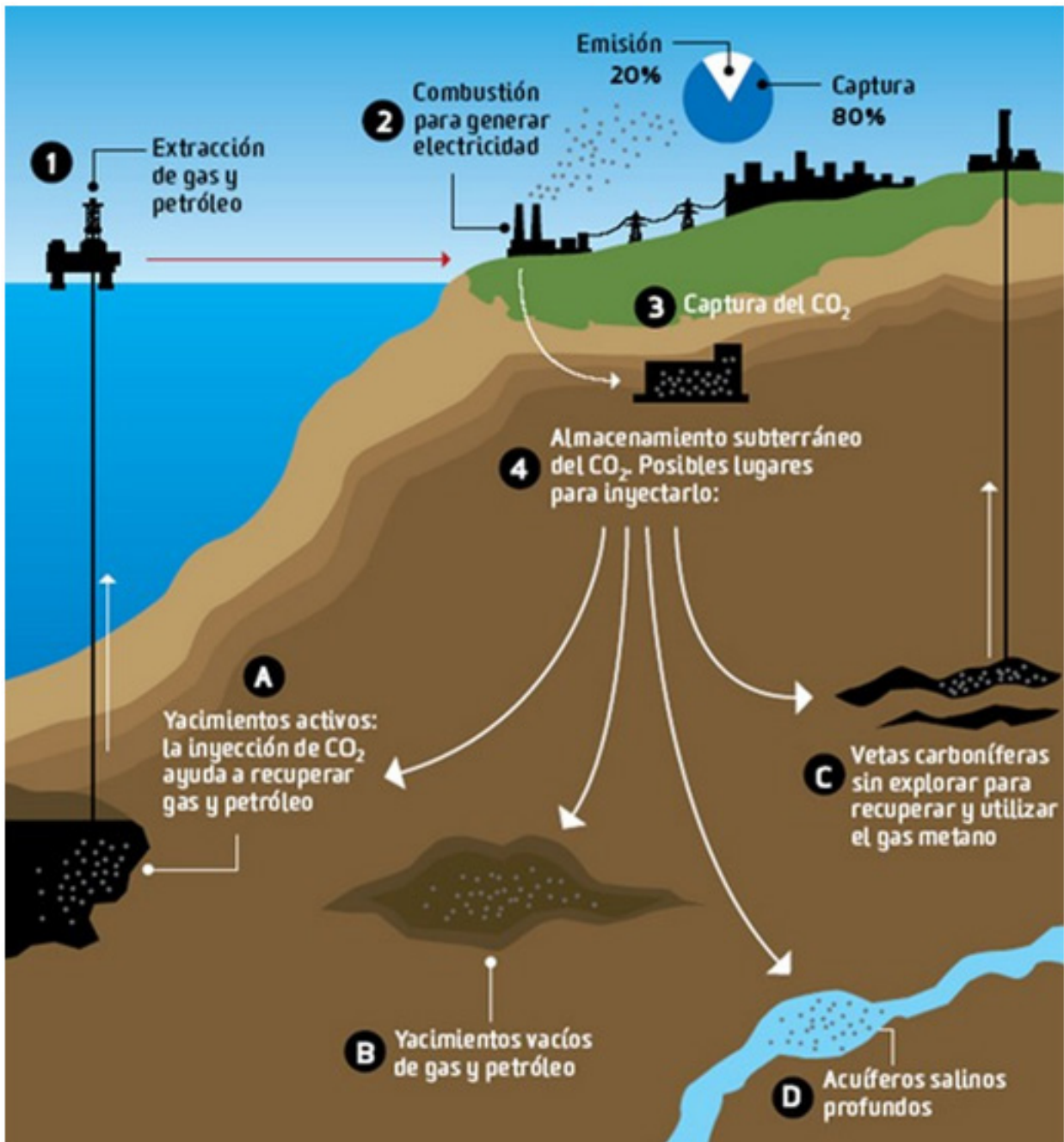


Fig. 10 Procesos de captura de CO<sub>2</sub>  
Tomada de Tovar, 2008

La tecnología de CCS ha tenido avances importantes; para mediados de 2005 ya existían tres proyectos comerciales relacionados con la captura y almacenamiento geológico del CO<sub>2</sub>: el “Proyecto Sleipner de procesamiento de gas natural mar adentro”, en Noruega; el “Proyecto Weyburn de recuperación mejorada de crudo” (RMC), en Canadá –que almacena el CO<sub>2</sub> capturado en los Estados Unidos–, y el “Proyecto de gas natural In Salah”, en Argelia.

Cada uno de ellos captura y almacena de una a dos megatoneladas de CO<sub>2</sub> por año; sin embargo, conviene mencionar que la tecnología de CCS aún no se ha aplicado a una gran planta generadora (ejemplo: 500 MW) que utilice combustibles fósiles y, en general, suele suceder que haya más experiencia en alguna de las fases del proceso (captura, transporte y almacenamiento) que en toda la tecnología CCS.



## IMPORTANCIA DE LA CAPTURA Y ALMACENAMIENTO

El interés internacional sobre el cambio climático llevó en 1992 a organizar la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático (UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change), cuyo objetivo es “la estabilización de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero en un nivel que evite la interferencia antropogénica peligrosa con el sistema climático”.\*\* Por otra parte, las predicciones del uso global de energía estiman un incremento sustancial en las emisiones de CO<sub>2</sub> para mediados del presente siglo, debido a que el uso de combustibles fósiles para el suministro de energía eléctrica va a prevalecer, al menos, hasta ese plazo. La magnitud de la reducción de emisiones necesaria para estabilizar la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, estimada en dicha convención, está en el rango de 450 a 750 ppm (partes por millón).

En este contexto, la disponibilidad de la tecnología CCS en la gama de opciones para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero puede ayudar a alcanzar las metas establecidas. Entre otras opciones se incluye:

- Reducir la demanda de energía mediante el incremento de la eficiencia en los procesos de conversión de energía.
- La descarbonización en los combustibles en el proceso de producción de la energía (como conversión de carbón a gas natural) y el incremento del uso de fuentes renovables de energía, además de la nuclear.
- La reducción de gases de efecto invernadero diferentes al CO<sub>2</sub>.

La fuerte dependencia mundial en el uso de combustibles fósiles (aproximadamente de 80% del uso global de energía), el potencial de la tecnología CCS para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y los promisorios resultados de sistemas de CCS que se encuentran ya en operación, explican el interés en esta tecnología.

## LAS FUENTES DE CO<sub>2</sub>

Las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, debido al uso de combustibles fósiles en el año 2000 fueron de 23.5 giga toneladas, de las cuales, 60% se atribuye a fuentes de emisión estacionarias, sin embargo, no todas ellas son apropiadas para la captura de CO<sub>2</sub>, pues se requiere que se encuentren a una distancia razonable para el almacenamiento y no representen riesgos de filtraciones.

Adicionalmente, la gran mayoría de las fuentes de emisión de CO<sub>2</sub> tienen concentraciones de 15% o menos. No obstante, una pequeña porción (2%) de las fuentes basadas en combustibles fósiles tienen concentraciones de 95% o más.

Un análisis de las fuentes que se encuentran a una distancia de 50 km de formaciones geológicas aptas para el almacenaje y que tienen el potencial de generar ingresos (mediante el uso de CO<sub>2</sub> para la producción mejorada de hidrocarburos,

como RMC o RMM) indica que tales fuentes emiten 360 megatoneladas de CO<sub>2</sub> por año. De acuerdo con un reporte del Panel Internacional sobre el Cambio Climático (PICC), existe una buena correlación entre las fuentes de CO<sub>2</sub> importantes y buenos prospectos de depósitos sedimentarios, con muchas fuentes localizadas por encima o a una distancia razonable (300 km o menos) de áreas con potencial de almacenamiento geológico.

## CAPTURA Y PROPIEDADES DEL CO<sub>2</sub>

El propósito de esta captura es producir un flujo concentrado a muy alta presión, cuyo transporte y almacenamiento resulte factible. Si bien el flujo completo de gas que contiene bajas concentraciones de CO<sub>2</sub> puede transportarse y almacenarse en depósitos subterráneos, los costos asociados hacen que este enfoque se vuelva impráctico, por lo que es necesario producir un flujo casi puro para su transporte y almacenamiento.

El PICC ha recomendado 80% de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2050. Si los resultados obtenidos por los investigadores del medio ambiente sostienen la aseveración de que las emisiones antropogénicas tienen una influencia a largo plazo sobre el clima mundial, los esfuerzos para desarrollar suministros de energía eléctrica con bajas emisiones de CO<sub>2</sub> deberán tener prioridad sobre otros desarrollos tecnológicos.

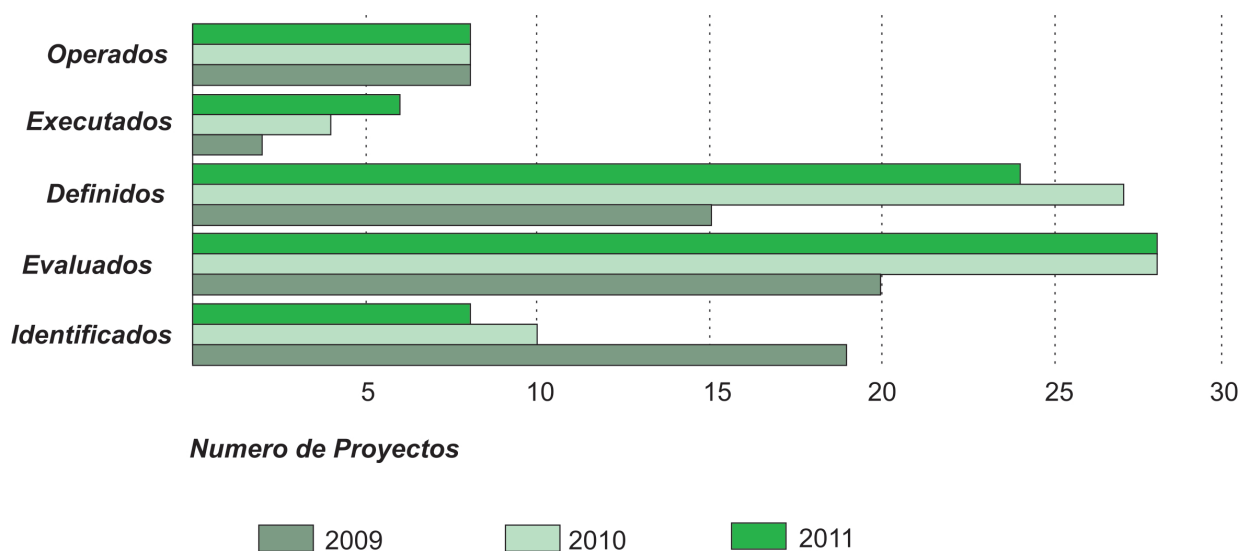
Actualmente, algunas plantas carboeléctricas tienen capacidad para la captura de CO<sub>2</sub>, pero, esta tecnología tiene la desventaja de ser muy costosa, sobre todo si se planea implementarla en países en vías de desarrollo. Por otra parte, existen otros procesos que parecen prometedores, tanto en términos económicos como tecnológicos.

Uno es el de Gasificación Integrada en Ciclo Combinado (GICC), cuyo desarrollo ha tenido progresos significativos, pues se basa en el hecho de que el CO<sub>2</sub> puede ser capturado del gas derivado del carbón mediante procesos disponibles en la industria química. Otra tecnología prometedora es la combustión con oxígeno para formar CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O con la subsecuente condensación del vapor, tecnologías que pueden reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta 85%.

La importancia de este tema es tal que se considera que las futuras plantas generadoras de energía van a ser instaladas, no en lugares que ofrezcan disponibilidad de agua y combustibles, sino en aquellos con opciones atractivas para el depósito de CO<sub>2</sub> de desperdicio.

## EJEMPLOS EN EL MUNDO

Este capítulo solo trata de dar una breve idea de cómo están los proyectos a nivel mundial para el CCS de CO<sub>2</sub>, esto a través de gráficas para un entendimiento concreto y para brindar un marco de la importancia del almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>.



*Fig. 10 Se muestra la cantidad de proyectos mundiales, así como su estatus. Digitizado de Carbon Storage Taskforce, 2009*

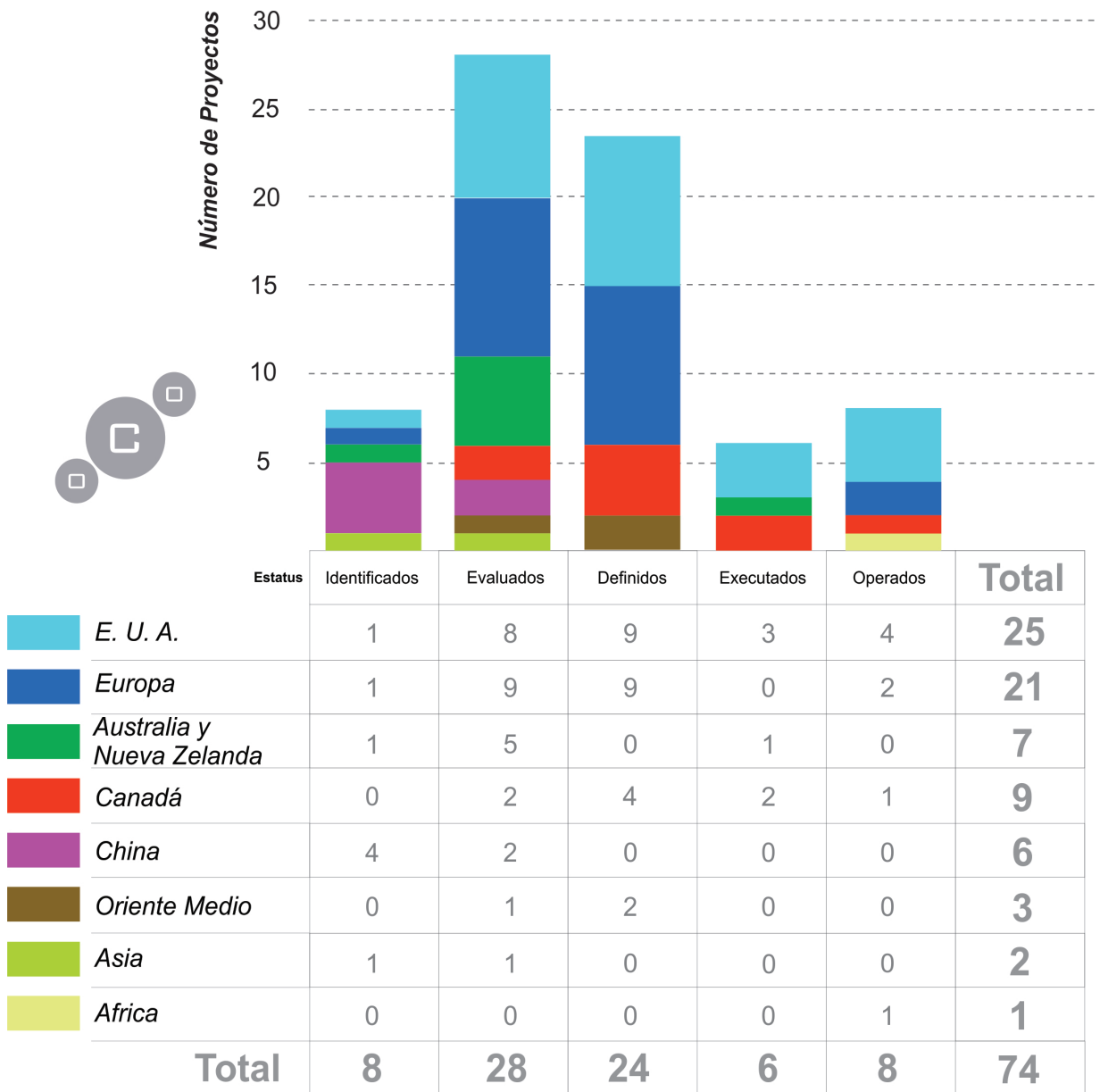


Fig. 11 Imagen que ejemplifica la cantidad de proyectos por regiones y países así como su estatus. Digitizado de Carbon Storage Taskforce, 2009.

## PROYECTOS MUNDIALES DE CCS

NOMBRE	País	Tipo de Captura	Volumen de CO <sub>2</sub> (millones de toneladas por año)	Año de Inicio
Shute Creek Gas Processing facility	E.U.A.	Precombustion	7	1986
Sleipner CO <sub>2</sub> injection	Noruega	Precombustion	1	1996
In Salah CO <sub>2</sub> Storage	Argelia	Precombustion	1	2004

*Fig.12 Imagen que muestra los 3 principales proyectos de CCS de CO<sub>2</sub> a nivel mundial Digitizado de Carbon Storage Taskforce,2009.*

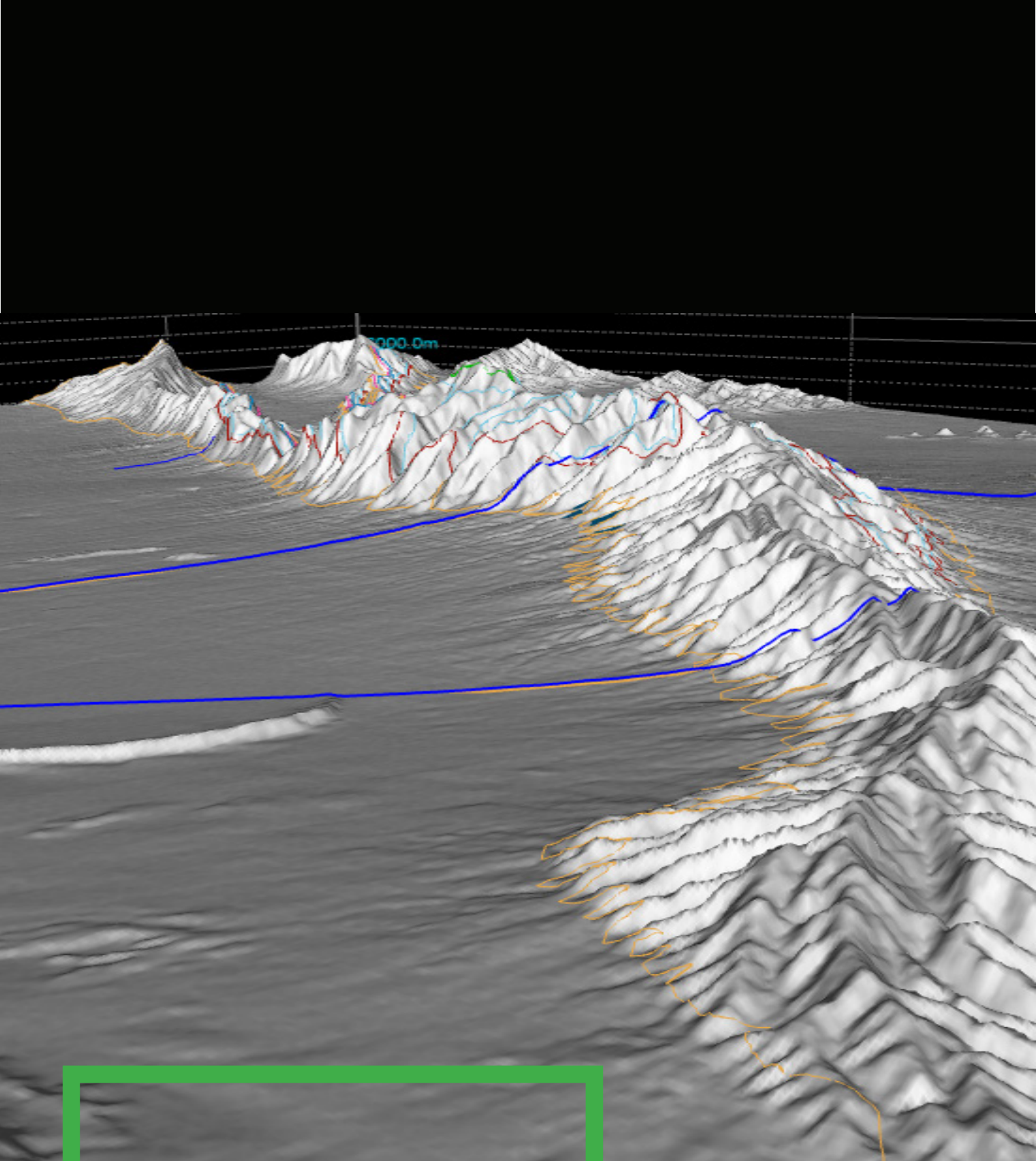
En las imágenes de este capítulo se trata de demostrar de manera gráfica y sencilla los alcances de los proyectos de CCS a nivel mundial.

Cabe decir que México no figura en ninguna lista por que no han proyectos en etapa de operación, ni tampoco en etapa de ejecutados.

Para este trabajo de tesis podemos decir que se esta tomando a la “Sierra de la Gavia” en etapa de :

**Proyecto Identificado.**





CAPÍTULO 7.  
MODELO GEOLÓGICO 3D





La caracterización detallada y el desarrollo adecuado del modelo con las propiedades del yacimiento, así como de las rocas almacén y sello, además de la información referente a la geología estructura, permitirá un análisis de los riesgos asociados con el almacenamiento de CO<sub>2</sub> en el subsuelo para la zona de la “Sierra de la Gavia”.

El almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>, puede ser un factor importante en las estrategias para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera, ya que al reducirlas, se puede ganar tiempo para la transición hacia fuentes de energía renovables.

La investigación geológica adopta el criterio de Bachu, quien propone que los estudios obedezcan una secuencia lógica, aumentando el grado de resolución de la evaluación y disminuyendo la escala del territorio abarcado.

En la siguiente figura se muestra como el nivel de resolución que se ofrece para la caracterización de la “Sierra de la Gavia” es alto :

**DETALLE Y RESOLUCION**

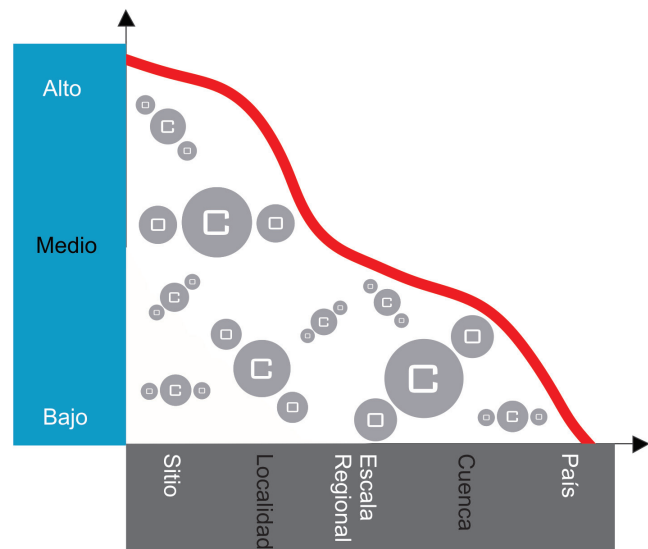


Fig. 13 Niveles de resolución y escala de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>. Digitizado de Carbon Storage Taskforce,2009.

En el presente trabajo de tesis como ya se mencionó en el objetivo, se ofrecerá un Modelo Geológico 3D, el cual conforme a la clasificación de Bachu se sitúa dentro de la escala de Sitio, es por ello que el nivel de detalle y resolución es alto, con ello se podrá evaluar de buena manera las características geológicas, estratigráficas, estructurales, etc., todas las cuales nos permitirán definir a La Sierra de la Gavia para su factibilidad como sitio de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>.

# CLASES

CRITERIO	1	2	3	4	5
1 Ambiente Tectónico	Convergencia Oceánica	Convergencia Intramontañosa	Plataforma Continental Divergente	Divergencia tipo <i>foredeep</i> (cuenca remanente)	Cratónica Divergente
2 Tamaño	Pequeño	Mediano	Grande	Gigante	
3 Profundidad	Superficial (<1,500 m)	Intermedia (1,500-3,500 m)			
4 Geología	Ampliamente fallado	Moderadamente fallado y fracturado	Fallamiento y fracturamiento limitado, amplias pizarras		
5 Hidrogeología	Superficial, sistemas de flujo cortos ó compactación del fluj	Sistemas de flujo intermedio	Regional, sistemas de flujo de largo alcance; topográfica ó flujos de eosión		
6 Geotermia	Cuenca caliente	Moderada	Cuenca fría		
7 Potencial de Hidrocarburos	Ninguno	Pequeño	Medio	Grande	Gigante
8 Madurez	Inexplorada	En exploración	En desarrollo	Madura	Sobre madura
9 Carbon y CBM	Ninguno	Profundo (> 800 m)	Superficial (200-800 m)		
10 Cuerpos Salinos	Ninguna	Domos	Horizontes		
11 Dentro ó fuera de costa	Profunda en alta mar	Superficial poco profunda	Dentro de la costa		
12 Clima	Ártico	Sub-ártico	Desértico	Tropical	Templado
13 Accesibilidad	Inaccesible	Difícil	Aceptable	Fácil	
14 Infraestructura	Ninguna	Menor	Moderada	Extensa	
15 Fuentes de CO <sub>2</sub>	Ninguna	Pocas	Moderadas	Mayores	

Fig. 14 Criterio de Bachu para caracterizar a los sitios para el CCS de CO<sub>2</sub>. Digitizada de Bachu, 2009.

En cuanto a sitios potenciales para almacenar  $\text{CO}_2$  y en específico nuestro sitio de interés “Sierra de la Gavia”, se puede decir, en forma general, que cumple con ser un sitio tectónicamente inactivo, con ello la seguridad que ofrece para garantizar la hermeticidad a largo plazo como sitio de almacenamiento es alta.

Además la “Sierra de la Gavia”, cumple con las siguientes características que favorecen el almacenamiento geológico de  $\text{CO}_2$ :

- Presencia Pobre de fracturamiento.
- Se localiza en una zona con estados de esfuerzo que no induce presiones importantes al lugar de almacenamiento.
- Profundidades mayores a 800 m.
- Altas posibilidades de mecanismo de sello.
- Porosidad y permeabilidad medias a altas.
- Pliegue anticlinal que tiene buen cierre estructural.

A continuación abordaremos lo referente al cálculo de los volúmenes que se pueden almacenar en el sitio.

Estos volúmenes se definen teniendo en cuenta las características petrofísicas básicas de las formaciones que se elijan como rocas almacén y rocas sello; tales características son:

- Porosidad
- Permeabilidad
- Ambiente de Deposito
- Condiciones de presión y temperatura

Con respecto de la condición de presión y temperatura a la que se ve sometida la roca, es necesario considerar la siguiente grafica, en donde se muestra la relación entre densidad y volumen relativo del  $\text{CO}_2$ , dado que es importante saber cómo se comportara el  $\text{CO}_2$  una vez inyectado a diferentes profundidades.

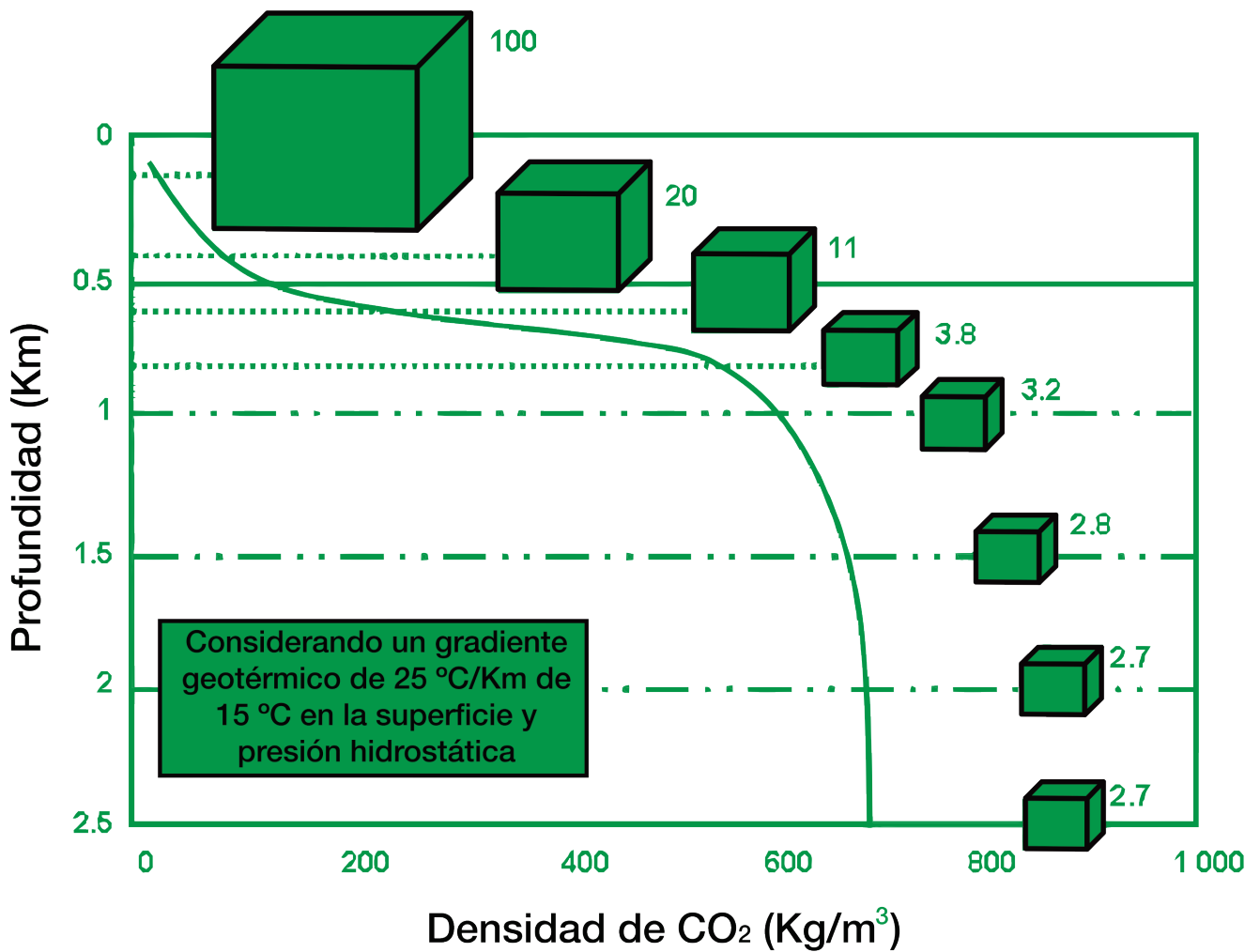


Fig. 15 Densidad y volumen relativo del CO<sub>2</sub> a diferentes profundidades. Digitizado de Dávila, 2011.

Lo siguiente será determinar la capacidad de almacenamiento del sitio, dicho término por definición se refiere a la capacidad volumétrica de un sitio para ser llenado de un fluido.

Sin embargo, hay que ahondar más en cuanto al almacenamiento del CO<sub>2</sub>. En 2005 el CSLF (Foro de Liderazgo para el Secuestro de Carbono) definió la pirámide tecno-económica de recursos-reservas para la capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub> de la cual se tiene las siguientes definiciones para las capacidades de almacenamiento:

(a) Mayor grado de seguridad de almacenamiento potencial

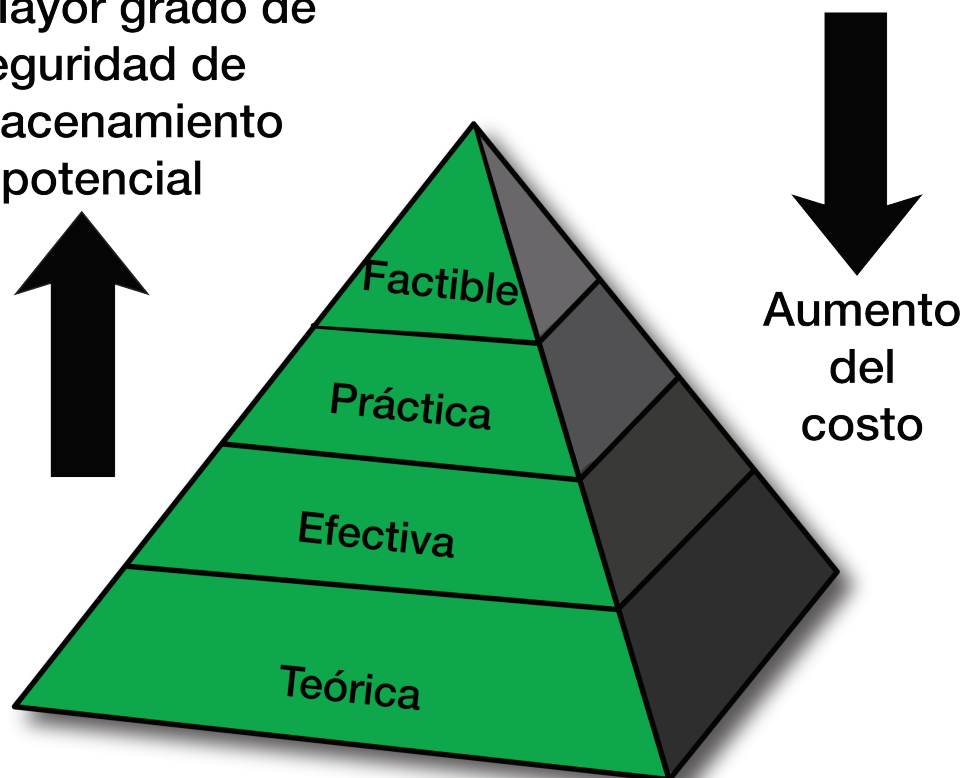


Fig. 16 Potencial de almacenamiento de los proyectos de CCS de CO<sub>2</sub>. Digitizado de Dávila, 2011.

A continuación se define cada uno de los tipos de capacidades de almacenamiento según la figura anterior:

**Capacidad teórica:** Representa el límite físico que el medio geológico puede aceptar y ocupa a la pirámide completa.

**Capacidad efectiva (también llamada capacidad realista):** Representa una subdivisión de la capacidad teórica y se obtiene al imponer limitantes geológicas y de ingeniería.

**Capacidad práctica (también llamada capacidad viable):** Es la subdivisión de la capacidad efectiva que se obtiene al aplicar limitaciones técnicas, legales, regulatorias, de infraestructura y económicas. Corresponde al nivel de reservas que usualmente manejan la industria minera y el sector energético.

Capacidad factible: Es la subdivisión de la capacidad práctica que se obtiene al contrastar las limitantes geológicas con las reales, en tiempo y espacio, para uso industrial. En la industria minera la capacidad factible corresponde a las reservas ofertables. La diferencia entre la capacidad práctica y factible está en la capacidad de almacenamiento.

Una vez descrito el término de capacidad de almacenamiento, veremos que para el caso de la “Sierra de la Gavia” utilizaremos la capacidad efectiva, la cual se determinara a través de la siguiente manera:

$$CAE = VP * BSE$$

(Capacidad Efectiva)

$$VP = A * h * \phi$$

(Volumen de porosidad)

De donde se tiene que:

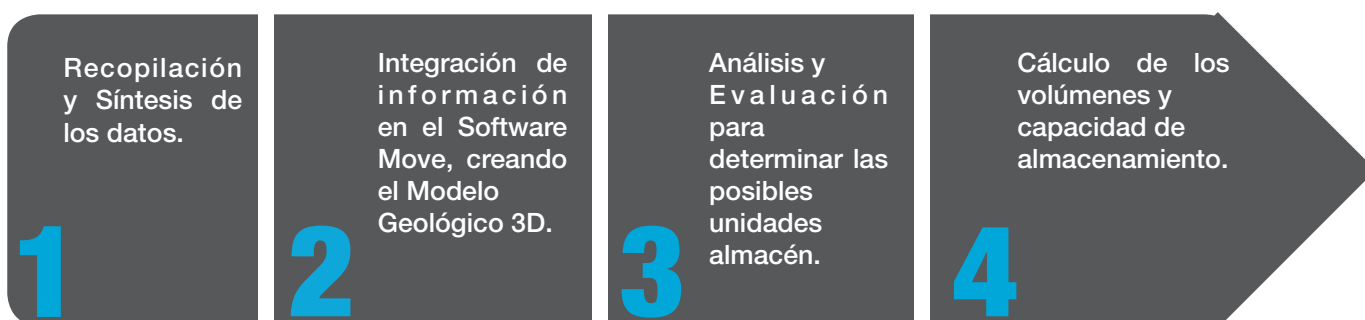
**BSE:** Factor de eficiencia

**A:** área (km<sup>2</sup>)

**h:** Espesor

**Φ:** Porosidad efectiva del intervalo

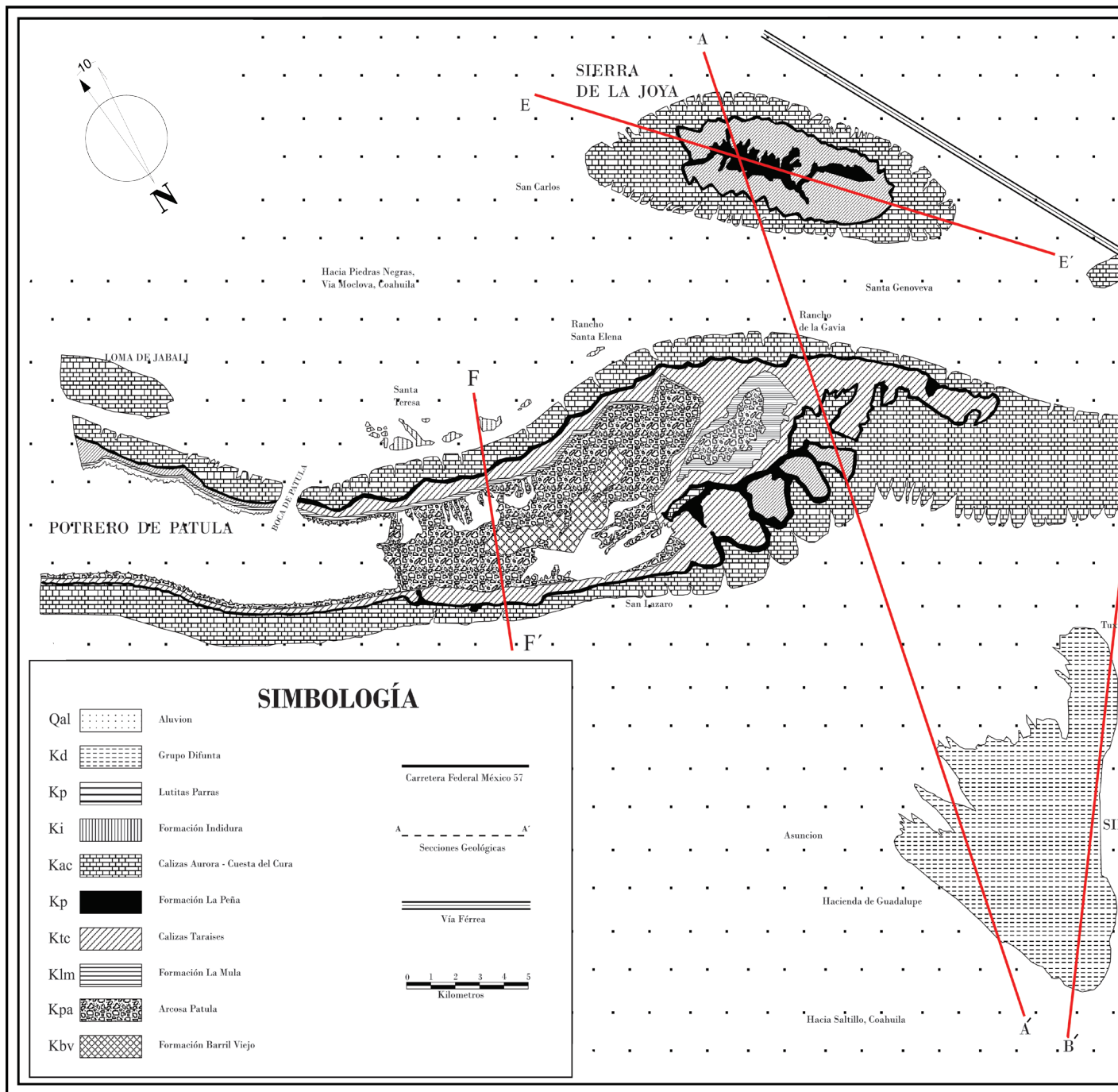
De toda la información descrita en este capítulo, podemos resumir gráficamente la metodología utilizada para la caracterización de la “Sierra de la Gavia” como sitio para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>.



## MAPAS Y SECCIONES UTILIZADAS

El mapa general fue tomado del boletín para la Sociedad Geológica de América – “Geología Estructural de la Sierra de la Gavia, Coahuila, México”, de Krutak, 1967; del cual se desprenden 6 secciones las cuales fueron utilizadas para la creación del Modelo 3D. Dicho mapa se corrigió en la etapa de la integración en el software move, ya que al realizar la georeferenciación los contactos del lado Este de la Sierra propuestos por Krutak no concordaban con la morfología del Modelo digital de Elevaciones (mde), el cual se descargó del sitio web del INEGI; es por ello que el contacto para las Calizas Cuesta del Cura (Kac), se redefinió conforme a la geomorfología a la que se atribuye dicha unidad, además de hacer un comparativo con los contactos que describe el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en su carta Geológico-Minera 1:250,000 , “Monclova”, con clave G14-4.

Este problema de mala georeferenciación de los datos que obtuvo Krutak en campo, seguramente se deben a la carencia de herramientas con las que se contaba en la época para la realización de mapas geológicos, sobre todo para la exactitud que los proyectos actuales requieren.

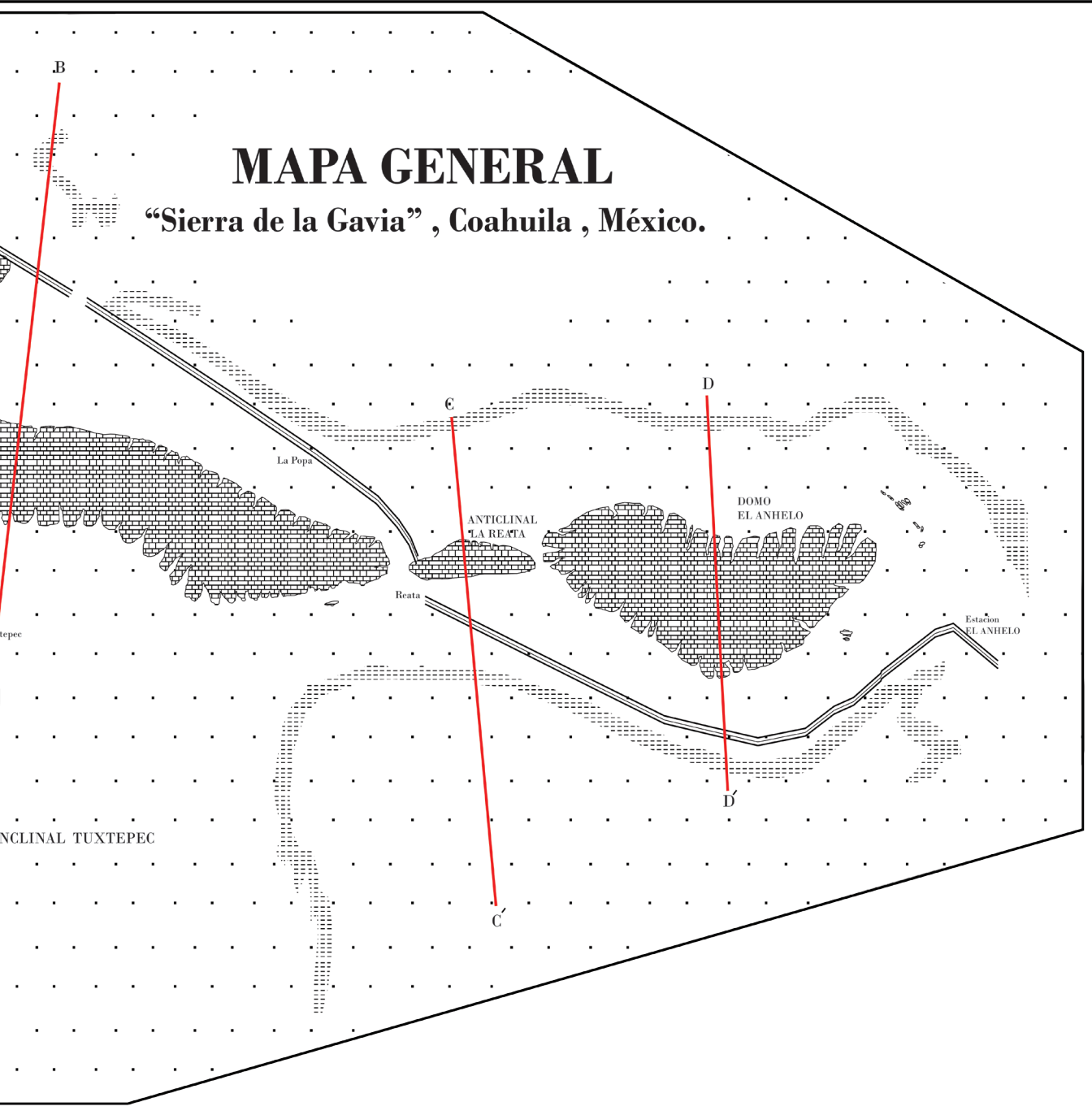


*Mapa General de la zona de la "Sierra de la Gavia", en donde se muestra la simbología utilizada para las unidades de rocas que componen a la sierra, así como la ubicación de las secciones geológicas. Digitizado de Krutak, 1969.*



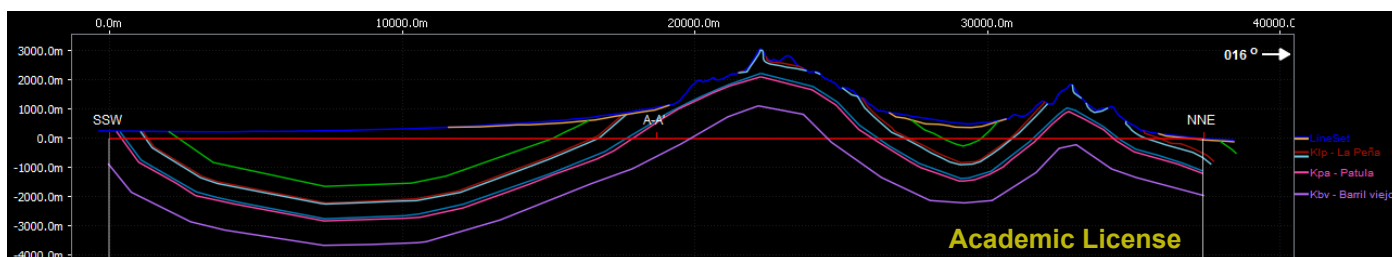
# MAPA GENERAL

“Sierra de la Gavia”, Coahuila, México.

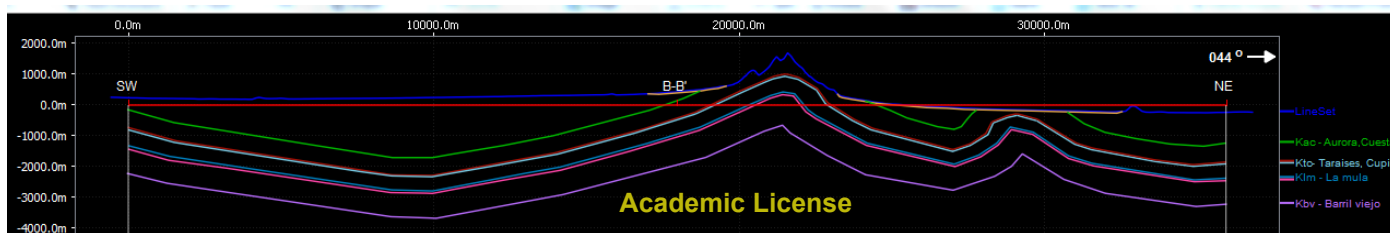


Secciones geológicas utilizadas el software MOVE para crear las superficies que simulan el subsuelo de la “Sierra de la Gavia”. Todas las secciones, así como también el mapa general, fueron digitizados para una presentación óptima.

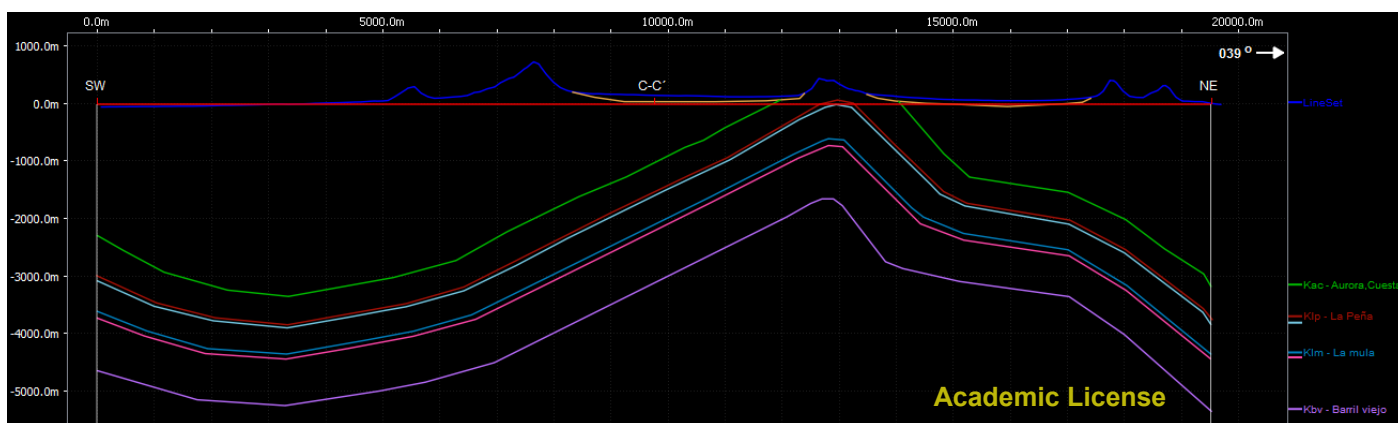
Fig. 17-22 Secciones Geológicas utilizadas para el modelo geológico 3D. Digitizado de Krutak, 1967.



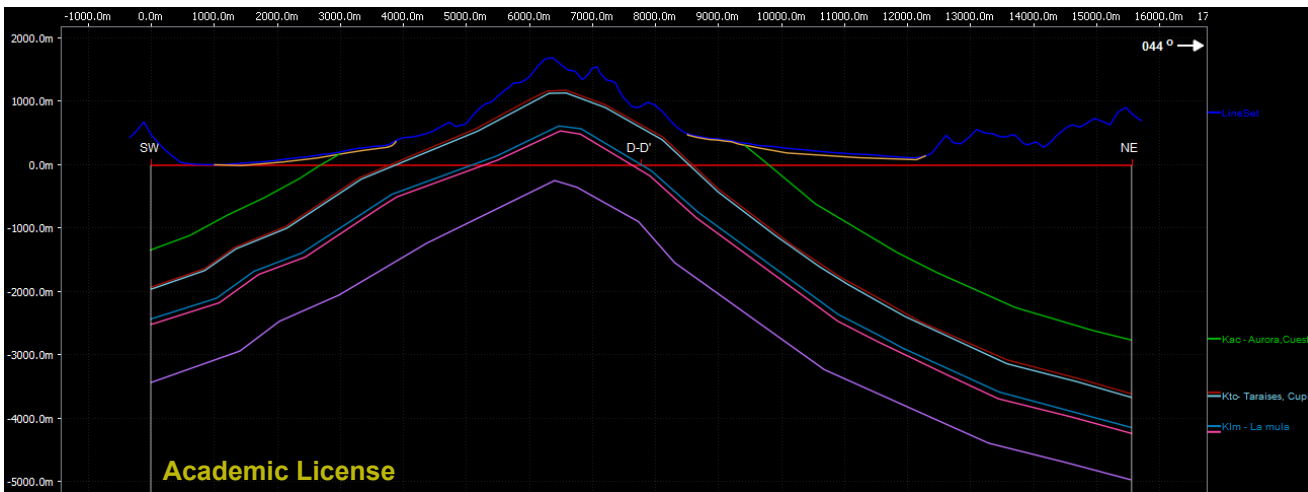
Sección A



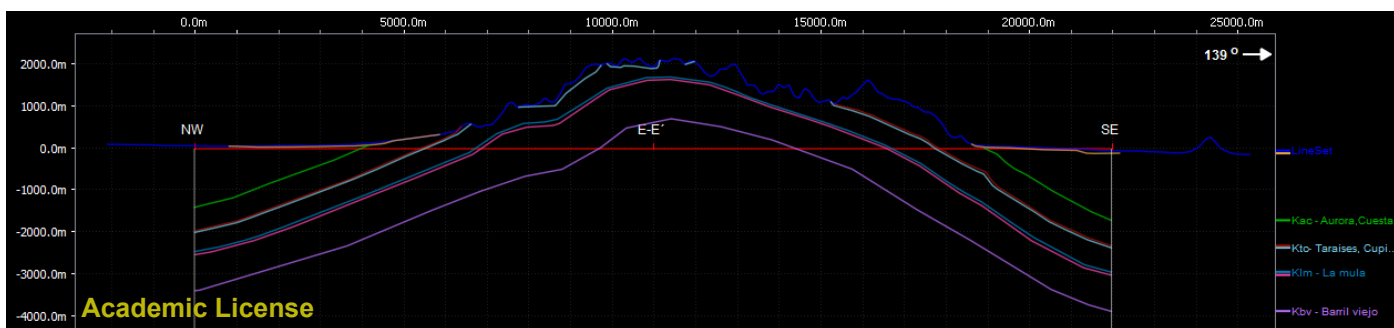
Sección B



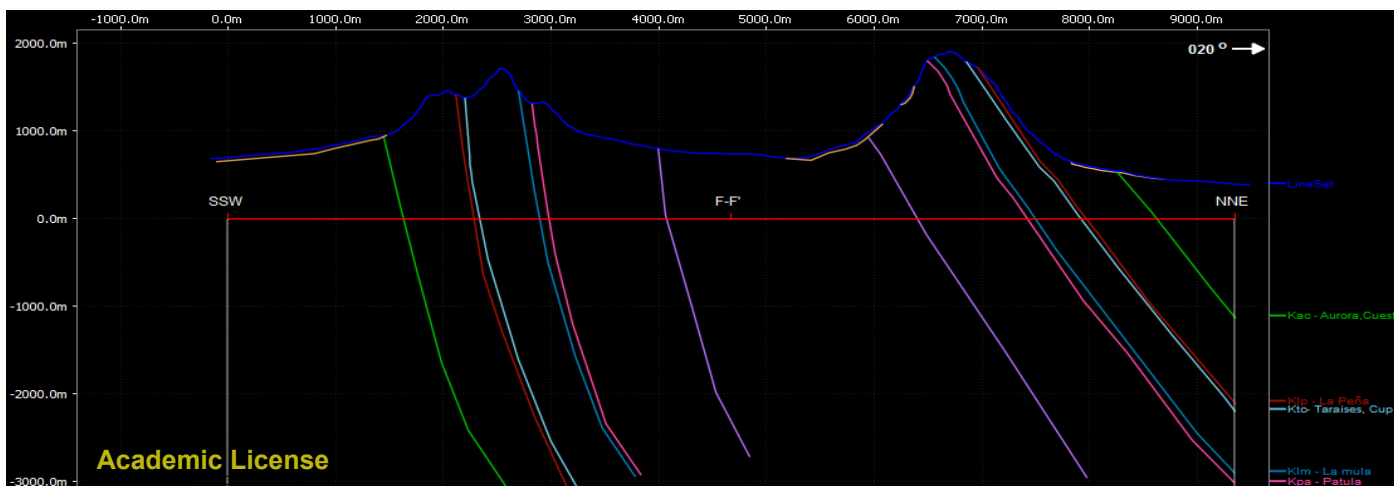
Sección C



Sección D



Sección E



Sección F

## MODELO 3D

En las siguientes imágenes se verá la integración de todos los datos en el Software Move, tales como:

- Secciones Geológicas
- Modelo Digital de Elevaciones
- Datos estructurales
- Contactos litológicos de las unidades
- Superficies creadas simulando el comportamiento de las formaciones en el subsuelo. (creadas por el método “spline curves”)
- Mayado de Coordenas UTM

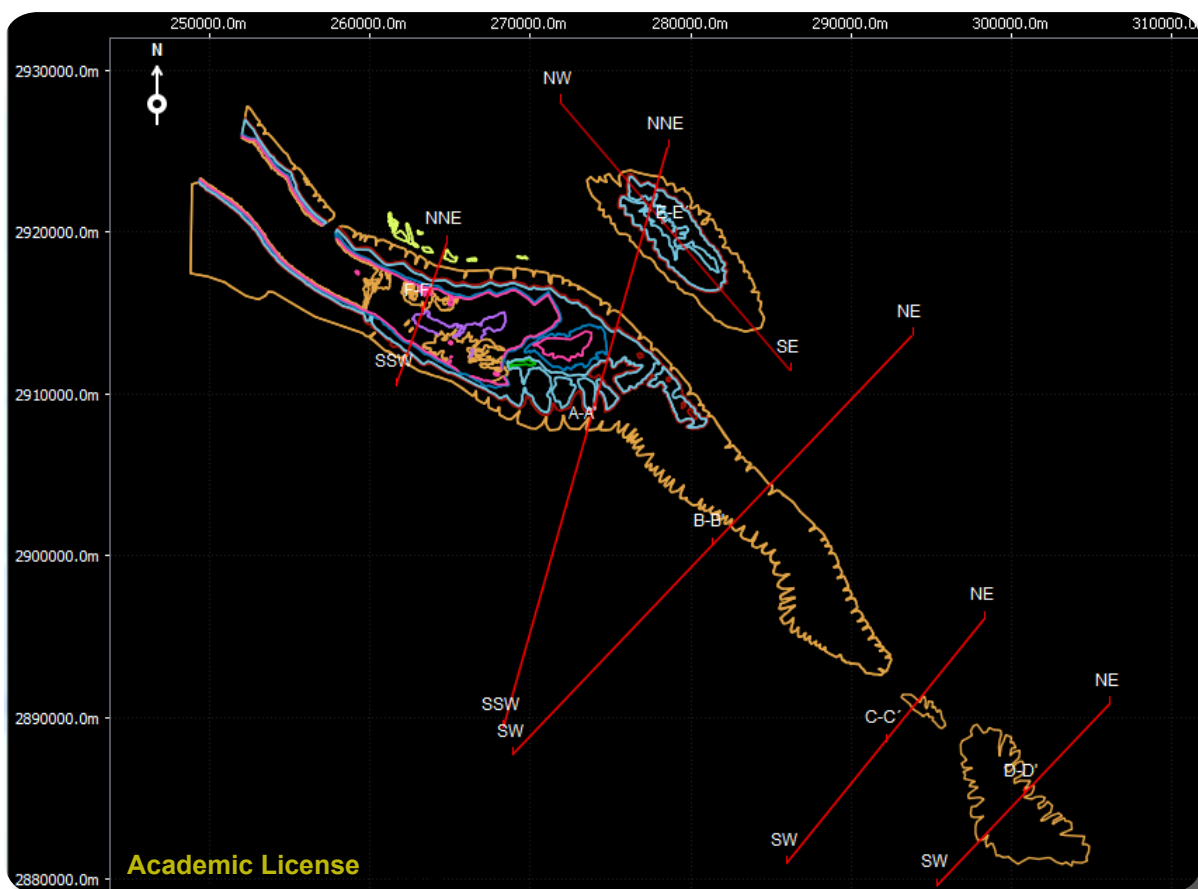


Fig. 23 Imagen aerea del modelo, se muestran los contactos geológicos, así como la malla de georeferenciación.

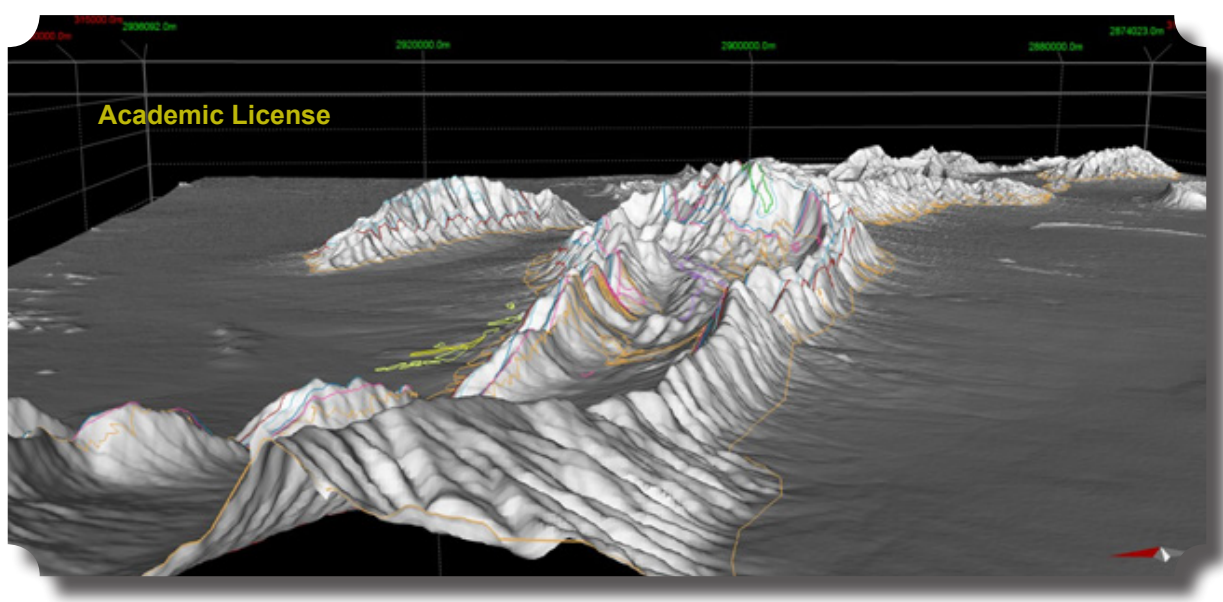


Fig. 24 Vista W-E de la Sierra de la Gavia, donde se puede ver la exposicion de la rocas mas viejas que se encuentran en el nucleo del anticlinal, esto debido a la erosión que sufrió la sierra.

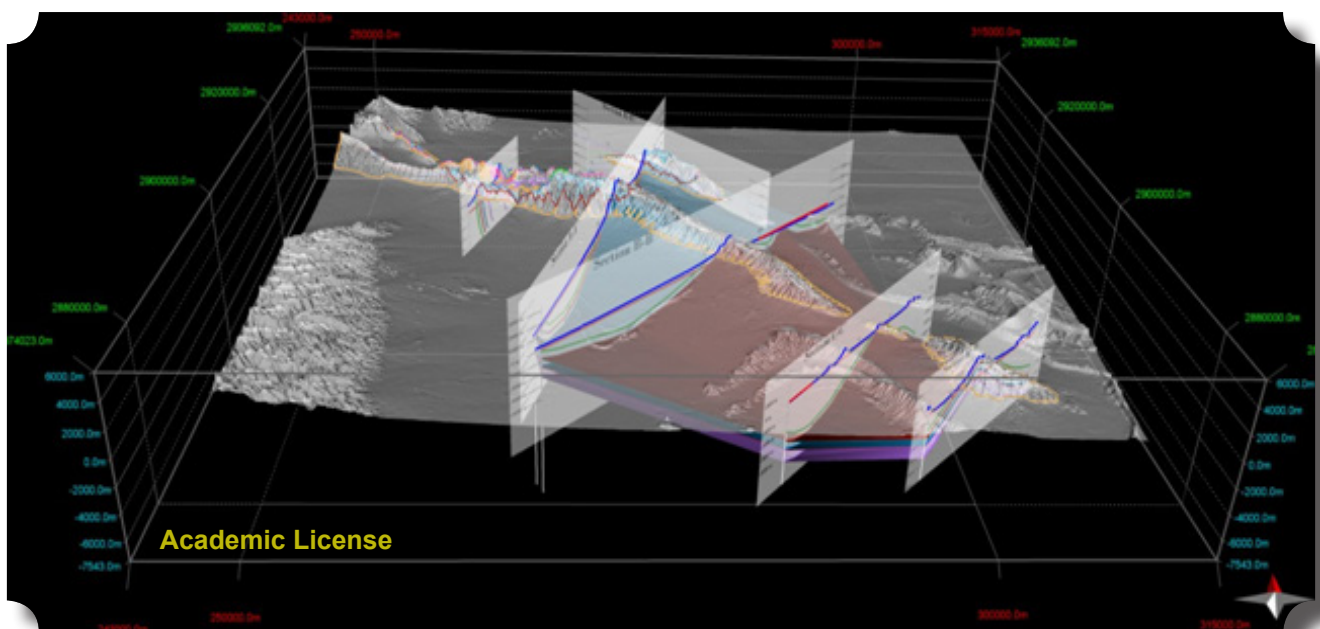
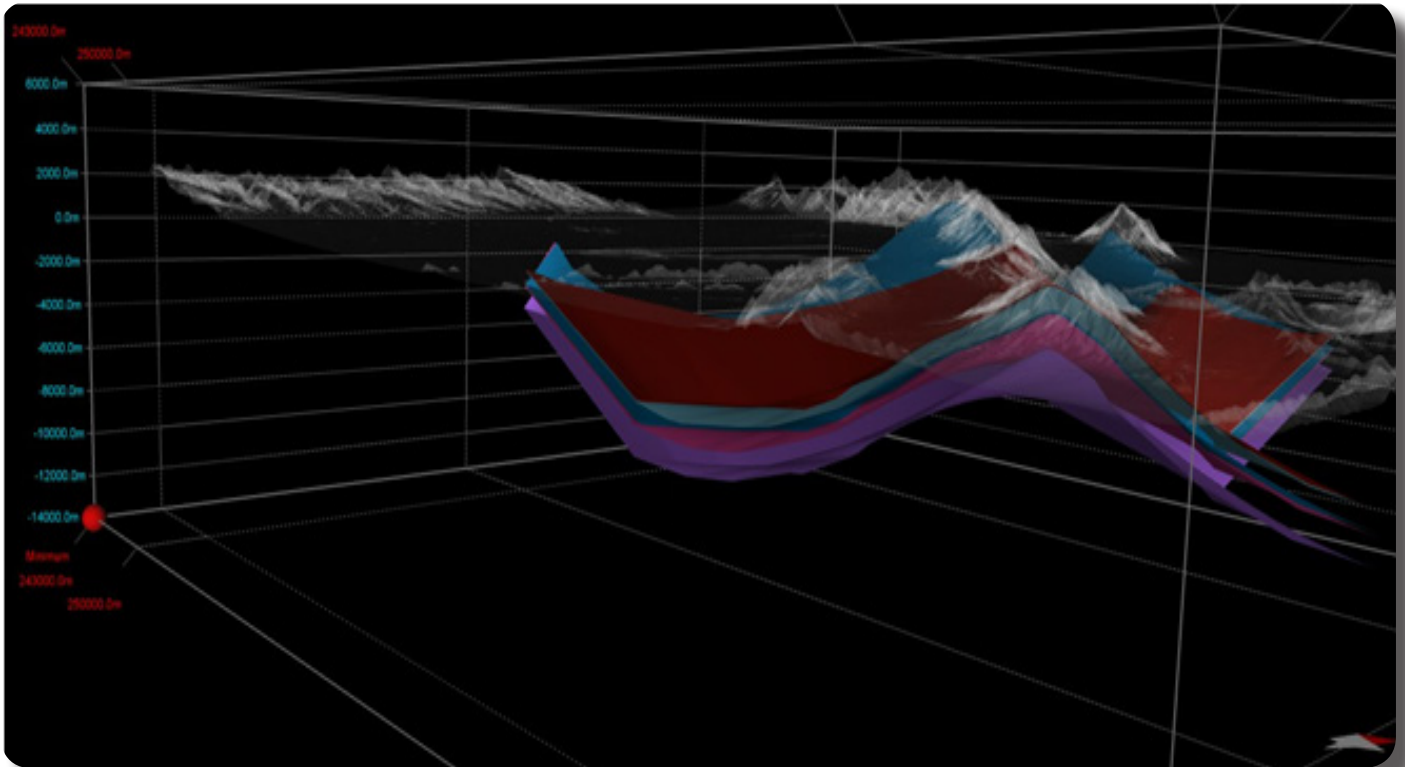
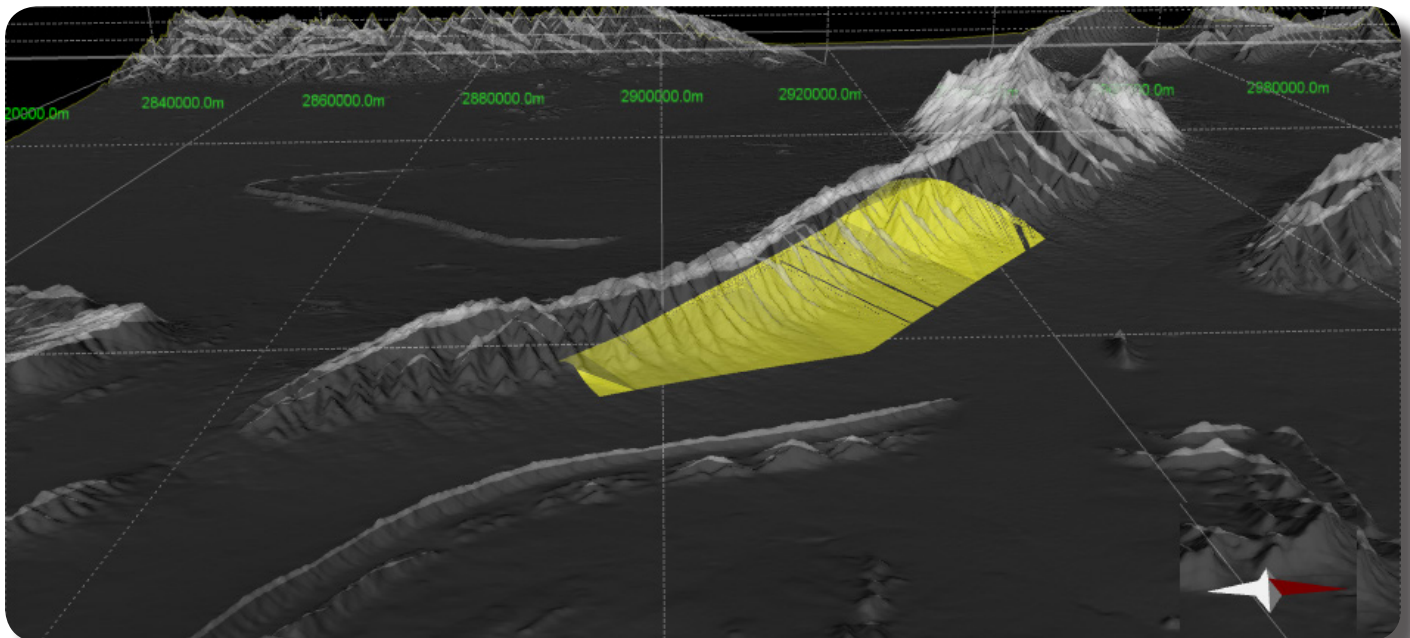


Fig. 25 En esta imagen se muestra toda la información descrita anteriormente, la cual se integró para la realización del Modelo Geológico 3d



*Fig. 26 Vista con orientación SE-NW, en la que se aprecian mejor las superficies creadas para cada unidad litológica.*



*Fig. 27 En esta imagen se observa la superficie propuesta para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>, de la cual se obtuvieron los volúmenes descritos en la siguiente apartado de este capítulo (Análisis de Resultados).*

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

La zona que se sugiere para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en la “Sierra de la Gavia” tiene un area aproximada de:

$$1,457,181,688.2 \text{ m}^2$$

Por lo que se calculará la Capacidad de Almacenamiento Efectiva (CAE), a partir de los siguientes datos:

$$A = 49,564,003 \text{ m}^2$$

$$\Phi = 14 \%$$

El espesor de la Formación Patula que se considera como apto para el almacenamiento dentro de la trampa estructural, es de : 210 m.

Por lo que de la formula para Volumen de Porosidad obtenemos los siguiente:

$$\begin{aligned} \mathbf{VP}_{(m^3)} &= \mathbf{A * h * \Phi} \\ &= (49,564,003 \text{ m}^2) (210 \text{ m}) (.14) \end{aligned}$$

$$\mathbf{VP} = 1,457,181,688.2 \text{ m}^3$$

Una vez que se obtuvo el Volumen de Porosidad procederemos a sustituirlo en la formula para la Capacidad de Almacenamiento Efectivo.

En este paso utilizaremos los siguientes valores para el factor de eficiencia (BSE) :

$P_{10}$	$P_{50}$	$P_{90}$
4.96	6.7	14.03

$$\text{CAE} = (1,457,181,688.2 \text{ m}^3) \text{ BSE}$$

Para BSE = 4.96 , se tiene que:

$$\text{CAE} = 7,227,621,173 \text{ m}^3$$

Para BSE = 6.7, se tiene que:

$$\text{CAE} = 9,763,117,311 \text{ m}^3$$

Para BSE = 14.03, se tiene que:

$$\text{CAE} = 20,444,259,085 \text{ m}^3$$

$$\text{TOTAL: } 37,434,997,570 \text{ m}^3$$





CAPÍTULO 8.  
CONCLUSIONES Y  
RECOMENDACIONES



- **L**a zona en la que se encuentra la Sierra de la Gavia es tectonicamente pasiva , ademas de contar con las condiciones estructurales para crear una trampa Geologica estructural,ya que debido a los plegamientos a los que se vio sometida la zona, se tiene un anticlinal que presenta buen cierre estructural; cabe decir que tambien la rocas en su mayoria son sanas, es decir no presentan gran fracturamiento, lo que en su conjunto favorece a crear una trampa que sirva para el almacenamiento Geologico de  $CO_2$ .

- **L**a buena infraestructura carretera y de servicios, asi como cercania, con grandes ciudades, como Monterrey , Nuevo León y Monclova, Coahuila, favorecen aun mas el desarrollo de un posible proyecto de almacenamiento en la zona.

- **E**l uso del software MOVE, favorecio la integración de la información, haciendo que el trabajo de identificacion de una zona factible para el almacenamiento, se viera favorecido en cuanto a tiempos, ademas que el Modelo Geológico 3D, como resultado de dicha integración, permitio ver de un modo bastante didactico el comportamiento estructural y geologico en el subsuelo de la “Sierra de la Gavia”.

- **E**l resultado en la Capacidad de Almacenamiento Efectiva con **37,434,997,570**  $m^3$ , muestra el potencial que la “Sierra de la Gavia” tiene, para ser contemplado como un sitio factible en el tema de Almacenamiento Geológico de  $CO_2$ .

- **T**odo lo referente a las energias, industrias, etc., que favorecen en el quehacer diario a mitigar el impacto ambiental antropogenico, deben ser consideradas, discutidas y analizadas por los gobiernos, no solo como medios preventivos, si no, como un fin que ha de dar las herramientas de progreso hacia nuevas tecnologias; y en el caso de México, la activacion podria darse con incentivos a la investigacion, asi como la interaccion de la academia y la ingenieria aplicada, en el caso concreto de los proyectos de Almacenamiento Geologico de  $CO_2$  .



- **E**s necesario integrar información a la ya ofrecida en este trabajo, tal como estudios geofísicos que ayuden a caracterizar mejor a las unidades de rocas, aportando datos petrofísicos para un mejor entendimiento y enriquecimiento del Modelo Geológico 3D.
  
- **C**on respecto de los estudios geológicos, habra que hacer un trabajo con mayor detalle para obtener muchos mas datos estructurales, asi como definir aun mejor los contactos geológicos, todo esto ademas ayudara para el comprender mejor el comportamiento del subsuelo de la Sierra de la Gavia.
  
- **E**s importante ademas de estudios Geofísicos, se realizen barrenos, esto claro esta, despues de haber detallado el Modelo Geológico con nuevos datos Petrofísicos, estructurales, estratigráficos, etc., ello con la intencion de definir aun mejor el potencial y las zonas para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>.
  
- **L**a incorporación de mas SOFTWARE como herramientas dentro del ambito académico, favorecerá el desarrollo óptimo en el aprendizaje de los alumnos, ya que lo hace muy didáctico, ademas de proporcionar conocimiento y experiencia al participar en proyectos que pueden tener una contiduidad a futuro, tal es el caso de este trabajo de tesis.
  
- **M**éxico dentro del contexto mundial en cuanto al tema de Almacenamiento Geologico de CO<sub>2</sub>, aun esta muy rezagado, es por ello que se debe hacer énfasis en que paraestatales como CFE, tomen estos proyectos para el desarrollo del pais, no solo por medio de “Outsourcing” , lo que definitivamente enriquece el conocimiento y habilidades de los profesionistas Mexicanos, sin embargo , hay que impulsar el desarrollo de los proyectos de ingeniería planificandolos y operandolos en favor de México, ello con el fin de un futuro con mayores posibilidades de interacción y desarrollo para nuestro País.



Bachu, Stefan, (2007). CO<sub>2</sub> storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment, Elsevier, v. 34, p. 254-253.

Bachu, Stefan, (2007). CO<sub>2</sub> storage capacity estimation: Methodology and gaps, Greenhouse Gas Control Journal, v. 1, p. 430-443.

Bol. Soc. Geol. Mex vol. 63 no. 2 México ago. 2011 - Secuencias estratigráficas del Berriasiano-Aptiano en la Cuenca de Sabinas: su significado en el entendimiento de la evolución geológica del noreste mexicano.

Bradshaw, (2007). Escalas de evaluación.

Brendan Beck, (2010). IEA CCS Programme, OECD/IEA-3rd NACAP Meeting, Presentation-Cuernavaca, Mor. México.

Centro Mario Molina, (2008). Estrategias de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero en el Sector Eléctrico, p. 44 – 45.

Dávila Serrano, Moisés, (2010). A preliminary study of regional geologic carbon sequestration in Mexico, International Journal of Physical Science, v. 5, p. 408-414.

Dávila Serrano, Moisés, (2011), Viabilidad Técnica y ambiental para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en México, IPN.

Eguiluz de A.S., (1984). Tectónica Cenozoica del Norte de México: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v.34, p. 41-62.

Eguiluz de A.S., (1994). La Formación Carbonera y sus Implicaciones Tectónicas, Estados de Coahuila y Nuevo León: Sociedad Geológica Mexicana Boletín, v. 50, p. 33-39.

Eguiluz de A.S., Aranda-García M. y Marret R., (2000). "Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México": Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53, p. 1-26.

Eguiluz de A.S., (2000). Origen y Evolución de una Cuenca Triásico-Jurásica en el Centro de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Publicaciones Ocasionales No. 2, Cuarta Reunión Sobre la Geología del Noreste de México y Áreas Adyacentes, Resúmenes, 27

Eguiluz de A.S., (2001). Geologic Evolution and Gas Resources of the Sabinas Basin in Northeastern Mexico, en Bartolini C., Buffler R. T. y Cantú-Chapa A., eds., The Western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, Sedimentary Basins, and Petroleum Systems: AAPG Memoir 75, p. 241-270.

Global CCS Institute, (2010), The Status of CCS Projects. Interim Report 2010. Muskoka, Canadá

GreenFacts,(2009).Consenso Científico sobre Capturay Almacenamiento de CO<sub>2</sub>, Suiza, p. 8-15.

Gunter,W.D.,SamWong.,ThomasGentzis,(2001).Field-TestingCO<sub>2</sub>Sequestrationand Enhanced Coalbed Recovery in Alberta Canada-A historical perspective and Futures plans, p 1-4.

Gupta,Neeraj,(2008).GeologicStorageofCO<sub>2</sub>-Models in Cross-Boundary Partnership, Conferencia en Houston, Texas.

Hepple,R.P.,S.M.Benson.StoringCO<sub>2</sub>Underground,IEAGreenhouse GasR&D Programme. p. 1-8.

IEA GREENHOUSE GAS R&D PROGRAMME , annualreview2012

López-Ramos E., (1981). Paleogeografía y Tectónica del Mesozoico en México: Universidad Nacional Autónoma de México. Revista del Instituto de Geología, v.5, p. 158-177.

Martinez Montesinos, Nava Carreón, (2008). Estado del arte del secuestro geológico de CO<sub>2</sub> y aplicaciones, UNAM.

Midland Valley, (2012). Tutorial Guide for MOVE ®

Padillay Sánchez R.J., (1982). Geologic Evolution of the Sierra Madre Oriental Between Linares, Concepción del Oro, Saltillo y Monterrey, México. Austin, Texas, University of Texas [Ph D. Thesis], p. 217.

Padillay Sánchez R.J., (1986). Post-Paleozoic Tectonics of Northeast Mexico and its Role in the Evolution of the Gulf of Mexico: Geofísica Internacional, 25, p. 157-206.

Secretaría de Energía, SENER, (2009). Prospectiva del Mercado de Gas Natural, 2009-2024. México.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), (2007). Carta Geológica de la República Mexicana, Escala 1: 4,000,000.

Suárez, Díaz Isabel, (2007). Transporte y Almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Conferencia, Generación de Electricidad mediante el Carbón: El Reto del CO<sub>2</sub>, España. Universidad de Alante, p. 15 - 22.

The Carbon Storage Taskforce, (2010). National Carbon mapping and infrastructure plan- Australia, p. 5-15, 113.



Tovar González,(2008). Captura y Almacenamiento de Bióxido de Carbono.Ciencia y desarrollo Tomo 16.

Zoltán de Cserna,(1992). Carta Tectónica de México, Instituto de Geografía, Escala 1: 4,000,000.

## **Paginas WEB:**

<http://sequestration.mit.edu>

<http://www.ccsbrowser.com/>

<http://www.co2captureproject.com/>

<http://www.epa.gov/climatechange>

<http://www.globalccsinstitute.com>

<http://www.ieaghg.org/>

<http://www.mve.com/>

<http://www.sgm.gob.mx/>

<http://www.inegi.org.mx/>