

Evaporites

- Evaporation triggers deposition of chemical precipitates
- Examples include
 - rock salt = NaCl
 - anhydrite (CaSO_4) and rock gypsum = $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
 - some calcite or dolomite
 - some potassium and magnesium salts

DEFINIÇÃO

Evaporitos são rochas sedimentares comumente formadas em ambientes de sedimentação de baixo aporte de terrígenos, submetidos a clima seco onde as taxas de evaporação das águas são elevadas permitindo a formação de uma salmoura a partir da qual minerais evaporíticos se formam. O potencial econômico dessas rochas é enorme, valendo salientar que o cloreto de sódio ou sal de cozinha é um dos minerais evaporíticos de maior importância para o ser humano. Além disso, os evaporitos costumam estar associados a ambientes altamente produtivos em matéria orgânica e no registro geológico é conhecida a associação de campos gigantes de petróleo e seqüências espessas de evaporitos. Neste texto, iremos

OCORRÊNCIA

Depósitos evaporíticos são encontrados hoje em muitas regiões do mundo, sempre em ambientes onde a razão de evaporação excede a razão de precipitação ou outra chegada de água; outro importante fator controlador é a discreta contribuição sedimentar de terrígenos de fora da bacia. Tais ambientes podem ser tanto de características continentais como marinhas, desde desertos até mares hipersalinos. Geralmente, ocorrem nas latitudes de 30°N e S onde os ventos frios descendem, porém podem ocorrer em áreas tão diversas como na Antártica ou em regiões equatoriais onde o clima é controlado por cinturões orográficos.

IMPORTÂNCIA

O conhecimento atual sobre os evaporitos deixa claro que a sua importância sob o ponto de vista econômico não se restringe aos próprios minerais evaporíticos (exemplo: trona, gipsita, anidrita, halita, silvinita, etc.), ou sua importante função como selante do reservatório de petróleo, mas também como hospedeiro de vários minérios. A freqüente associação com petróleo, onde cerca de 70% dos campos de petróleo gigantes em rochas carbonáticas estão relacionados a depósitos evaporíticos (Zhang Yi Yang, 1981, in: Warren, 1989), permite reconhecer a importância de se estudar e entender a geologia e

AMBIENTES DE FORMAÇÃO

-SABKHAS-CARACTERISTICAS DOS DEPÓSITOS

Os evaporitos formados em sabkhas, adjacentes a um corpo d'água (marinho ou não marinho) em clima árido, são na sua grande maioria componentes de um perfil de solo nas zonas vadasas e freáticas. O sedimento evaporítico se forma dentro de um sedimento hospedeiro, mais abundante, e que se comporta como matriz, e cuja composição pode ser tanto carbonática, siliciclástica ou mista. Gipsita, anidrita e halita são os minerais evaporíticos mais comuns, ainda que o influxo de águas continentais possa causar o aparecimento de inúmeros minerais dependendo da química de tais águas.

As acumulações sedimentares em sabkhas geram comumente seqüências pouco espessas, variando de 30 cm até 1 ou 2 m (Schreiber e Tabakh, 2000), com cada ciclo truncado por superfícies que são na verdade superfícies de deflação geradas pelo vento ou água (neste caso, durante as tempestades).

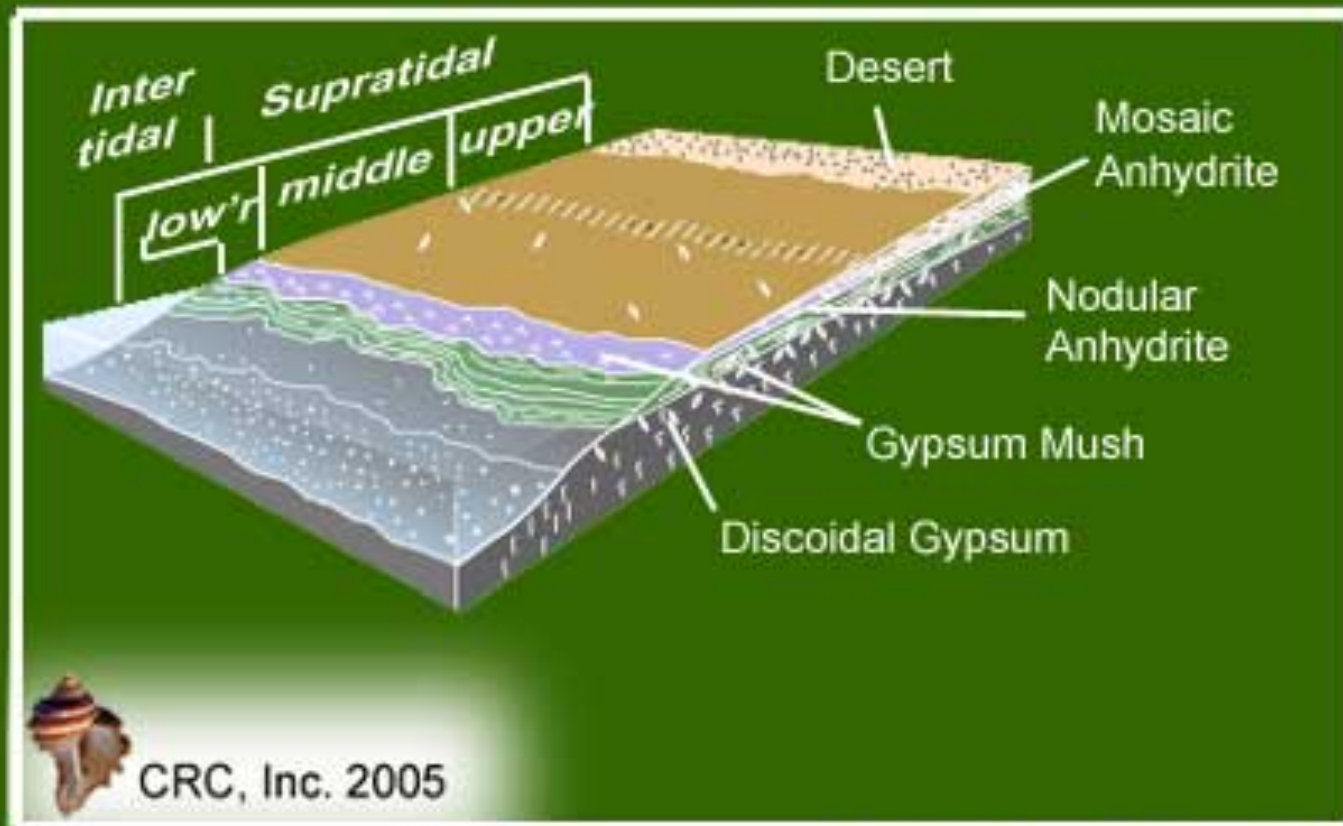
AMBIENTES DE FORMAÇÃO: TANTO CONTINENTAL COMO MARINHO
SABKHAS, AMBIENTES MARINHOS RASOS E PROFUNDOS –LAGOS SALINOS
EM ÁREAS CONTINENTAIS.

Como mencionado, os ambientes de formação dos evaporitos ocorrem tanto em situações de caráter continental como marinho. O ambiente marginal marinho é representado pelas planícies do tipo sabkha e salinas, porém os evaporitos podem ser formados em ambientes marinhos rasos e profundos; além desses, os lagos salinos em áreas continentais são extremamente importantes para a formação de camadas espessas de sais em seqüências lacustres.

Sabkhas:

Ambientes costeiros onde ocorrem evaporitos são áreas essencialmente de baixo aporte de sedimentos clásticos e altas taxas de evaporação. Nestes ambientes encontra-se uma planície de sal denominada pelos árabes de sabkha (Fig. 1).

Marine Sabkha



CRC, Inc. 2005

Modified from Shinn 1983

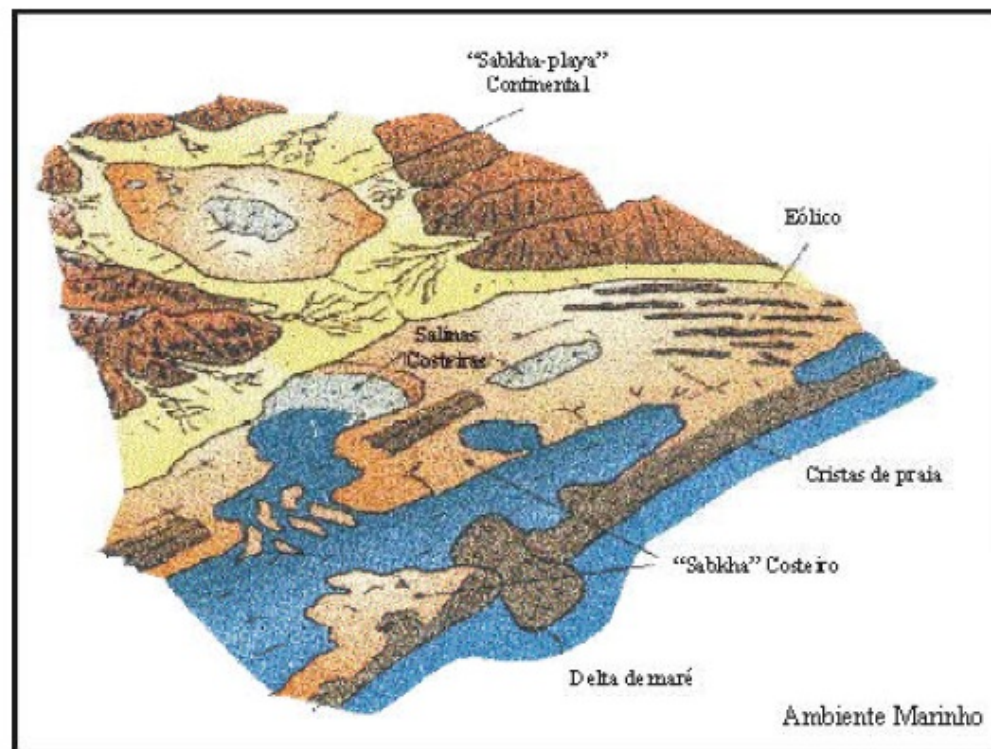


Figura 1 – Esquema ilustrativo dos principais ambientes evaporíticos modernos (os ambientes de águas profundas e de plataforma não são encontrados atualmente). Modificado de Kendall, 1984.

Águas Rasas:

Os depósitos evaporíticos modernos de águas rasas estão se formando em lagos continentais, lagoas e salinas. O exemplo mais bem documentado vem das salinas do Sul Australiano aonde as seqüências de gipsita subaquosas chegam a 10 metros de espessura tendo sido formados ao longo dos últimos 6000 anos (Warren, 1989). Outros trabalhos têm sido realizados com os evaporitos laminados de natureza subaquosa da Baja Califórnia (SO dos Estados Unidos), Sicília (Itália) e Oriente Médio. O estudo da formação dos sais em salinas (naturais e artificiais), no entanto tem sido de grande importância para o entendimento da formação de evaporitos em ambientes de águas rasas (lâminas d'água inferiores a 50 m, segundo Schreiber, 1986), principalmente no que diz respeito aos processos e exemplos de formação de fácies sedimentares evaporíticas.

**Lagos continentais, lagoas- sul da Austrália gipsita—10 m espessura-
Baja California**



Figura 2 – (A) Esteiras algólicas em processo de ressecamento e formação de gretas. Caneta na parte inferior da foto como escala. (B) Greta de ressecamento mostrando, na base, acúmulo de matéria orgânica em ambiente carbonático evaporítico. Salinas da Lagoa de Araruama, RJ.

Muito do que se sabe a respeito dos evaporitos

de águas rasas e fácies sedimentares associadas vem da observação em salinas artificiais. Os primeiros tanques que recebem água do mar, ou água de lagunas e enseadas pré-concentradas, vão apresentar os primeiros minerais de carbonatos cuja precipitação é fortemente controlada pelas algas e bactérias presentes na água. Geralmente, esteiras algálicas e

A ser abordado em recursos minerais associados a água do mar.

MAR MORTO DEPÓSITOS EVAPORÍTICOS EM ÁGUAS PROFUNDAS....

Águas profundas:

Este ambiente evaporítico é o menos compreendido, e não existe hoje nenhum ambiente marinho profundo para servir de exemplo. O exemplo mais próximo é o Mar Morto, onde se encontra um pacote de sedimentos evaporíticos de natureza continental formado em um ambiente subaquoso de cerca de 300 metros de lâmina d'água, no caso uma salmoura (Warren, 1989). A profundidade da água dessas bacias, de modo geral, é de difícil estimativa, e evidências geoquímicas vêm sendo utilizadas para auxiliar nessa avaliação. O conteúdo de Sr na Formação Lisan (Pleistoceno do Mar Morto), permite a estimativa de profundidades de 400 – 600 metros para a deposição evaporítica Pleistocênica nessa bacia, superior aos atuais 300 metros (Katz et al., 1977 in: Warren, 1989)). De qualquer modo, a profundidade da água deve ser abaixo do nível de base da onda e suficientemente profunda e com um volume suficiente para atuar como um “buffer” químico. Para que uma espessura substancial de sais possa se acumular em águas profundas, a água de fundo deve estar saturada com gipsita e halita.

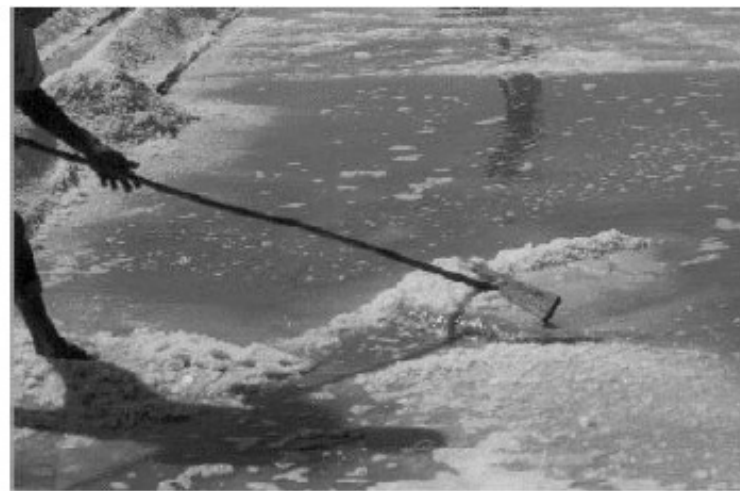
Pacotes extensos e espessos de evaporitos laminados (até mesmo ritmitos) onde os pares de lâminas são representados principalmente por carbonato – sulfato, halita – sulfato e halita – matéria orgânica (Fig. 4 B) implica profundidades de água elevadas, com certeza abaixo do nível de onda (exemplo, a Série Zechstein, Permiano do NO da Europa). A forte associação lateral desses depósitos com fluxos de massa a turbiditos de natureza evaporítica, implica também águas mais profundas do que as de plataforma continental de modo geral (Warren, 1989).



Figura 4 – (A) Nódulos de anidrita. (B) Halita bandeada com matéria orgânica, exemplos do Membro Ibura da Formação Muribeca, Aptiano da Bacia de Sergipe. A seta corresponde a cerca de 1cm aproximadamente.



Figura 6 – Frente de exploração de gipsita e anidrita, Aptiano da Chapada do Araripe, Pernambuco.



RECURSOS MINERAIS EVAPORÍTICOS

Os principais mais importantes, depósitos econômicos de evaporitos são encontrados nas bacias (Fig. 5): (1) Delaware , Permiano do Texas e New México nos Estados Unidos; (2) Zechstein, Permiano do NO da Europa; (3) Louann , Jurássico do Golfo da México; (4) Hormuz, Pré-Cambriano, Golfo da Arábia; (5) Bacias Miocênicas (Messiniano) em torno do Mar Mediterrâneo; (6) Michigan, Siluriano-Devoniano, Norte dos Estados Unidos; (7) Elk Point, Devoniano, Canadá ; (8) Moscou, Devoniano, Rússia; (9) Grupo McArthur, Proterozoico, Austrália; (10) Bacia de Sergipe, Cretáceo (Aptiano), Margem Continental Leste do Brasil, além de outros.

Os minerais mais comuns e economicamente mais utilizados são gipsita/anidrita (Fig. 6), halita, tanto

moderna, extraída das salinas (Fig. 7), como antigas, extraídas de minas e galerias, do mesmo modo que sais de potássio e magnésio (silvita, carnalita e bischofita) (Fig. 8). Esses minerais são empregados em processos químicos incluindo a fabricação de materiais de construção, conservação de alimentos e agricultura. Outros depósitos, incluem vários carbonatos e sulfatos de sódio (trona, NaHCO_3 , $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; thenardita, Na_2SO_4 ; glauberita, $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$; mirabilita, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), acrescido de uma série complexa de boratos (colemanita $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; ulexita, $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, e borax , $(\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O})$. Esses minerais são usados na agricultura, na indústria química e como material de construção.

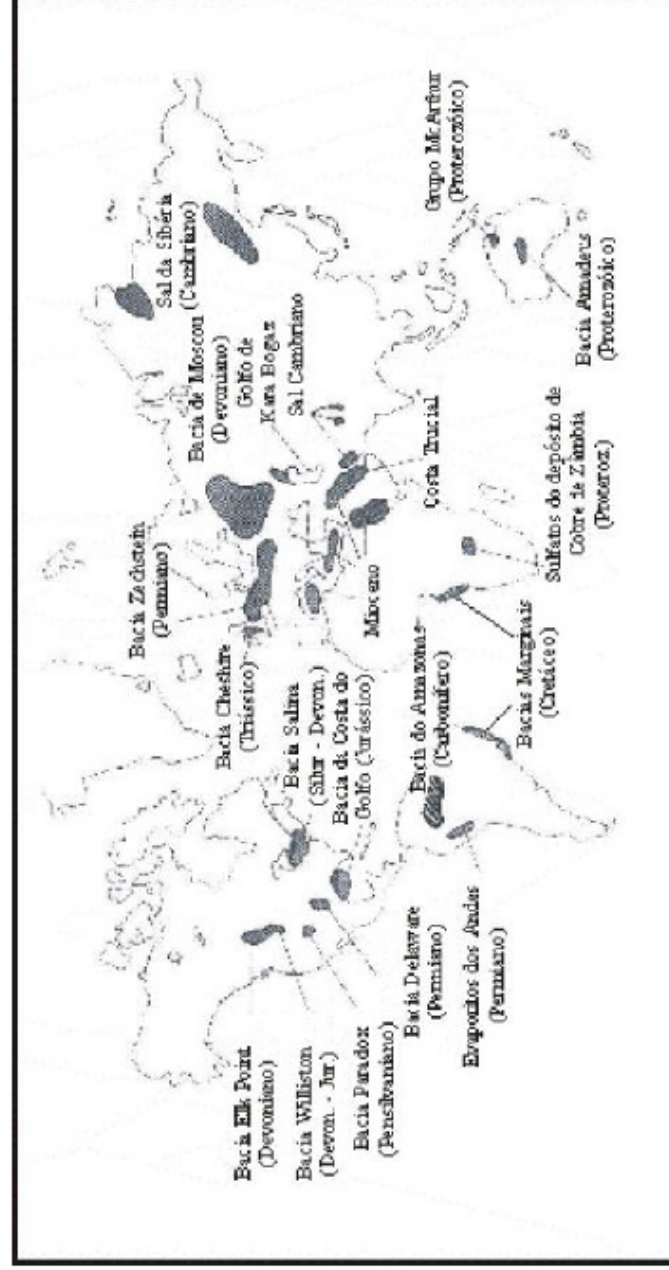
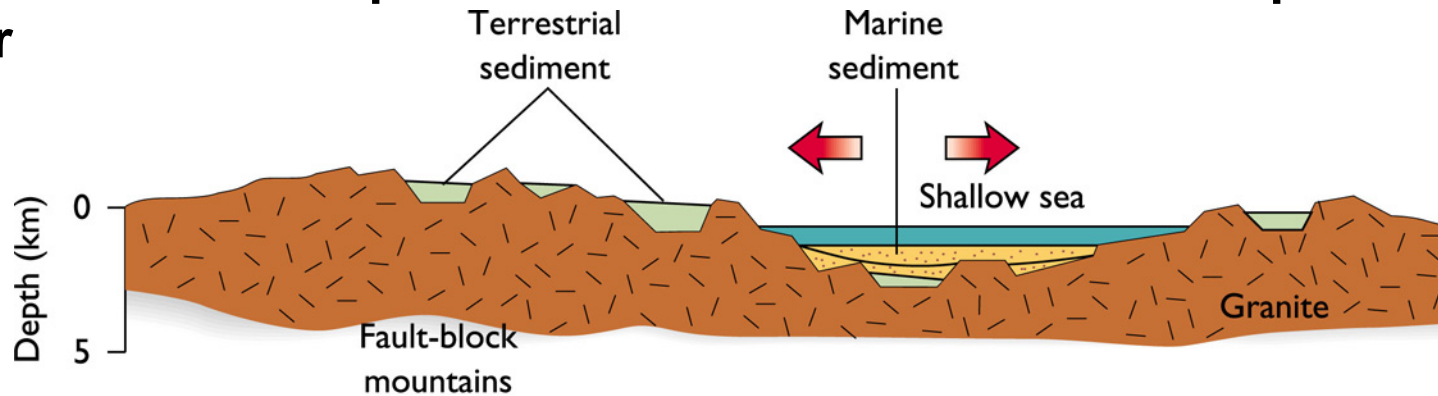
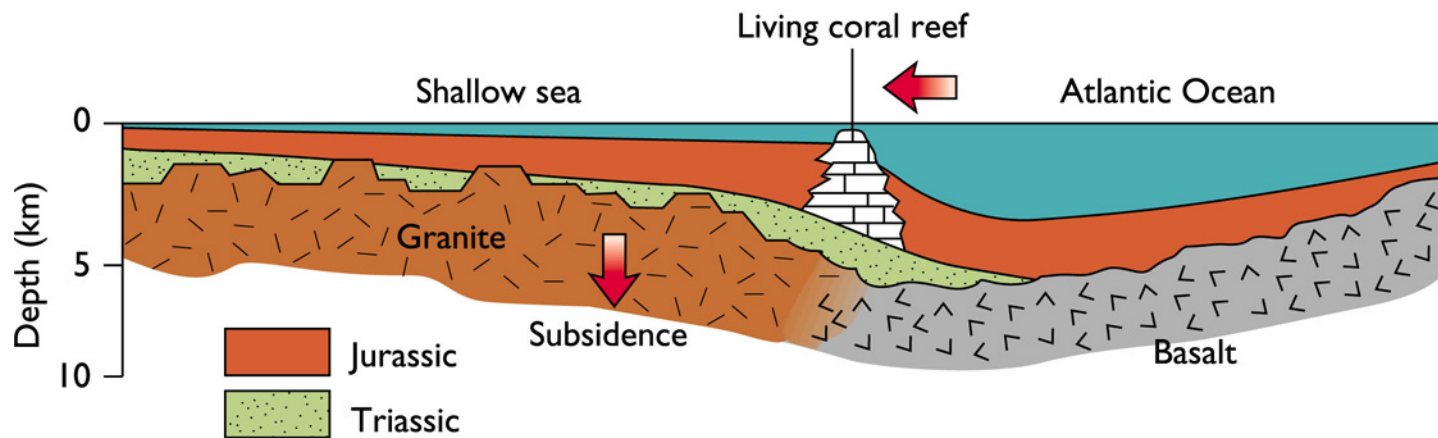


Figura 5 – Localização e idade dos principais depósitos evaporíticos gigantes (modificado de Warren, 1999).

- **Margens passivas do tipo Atlântico são caracterizadas por uma longa história de sedimentação. O assoalho oceano na margem do continente afunda de uma forma gradual que a deposição sedimentar acompanha o afundamento e o fundo da plataforma per**

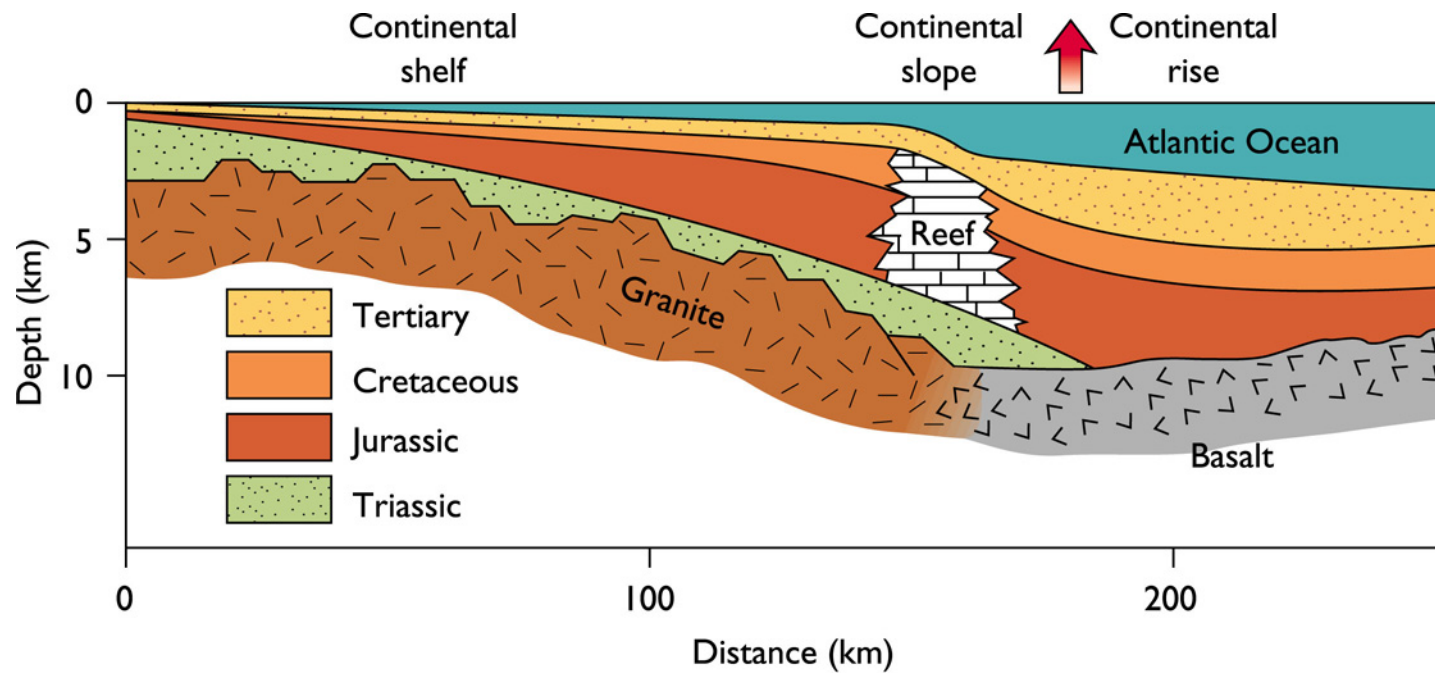


(a) INITIAL RIFTING (Triassic period: 200 million years B.P.)



(b) JURASSIC MARGIN (150 million years B.P.)

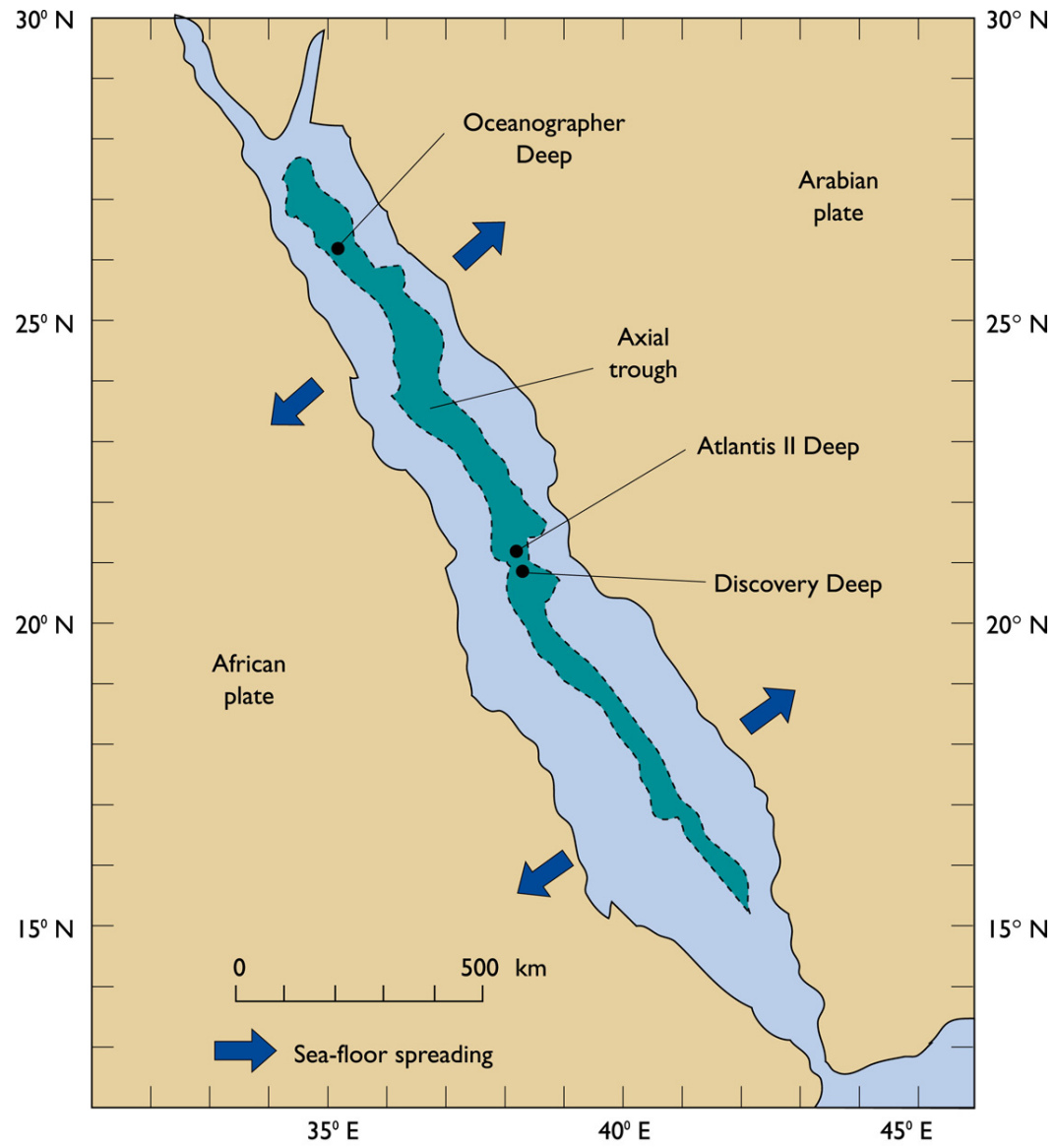
- Depois de uma fase rápida de expansão (tectônica) segue-se um longo período de sedimentação terrígena na plataforma que contribui para o alargamento e espessamento da margem continental.



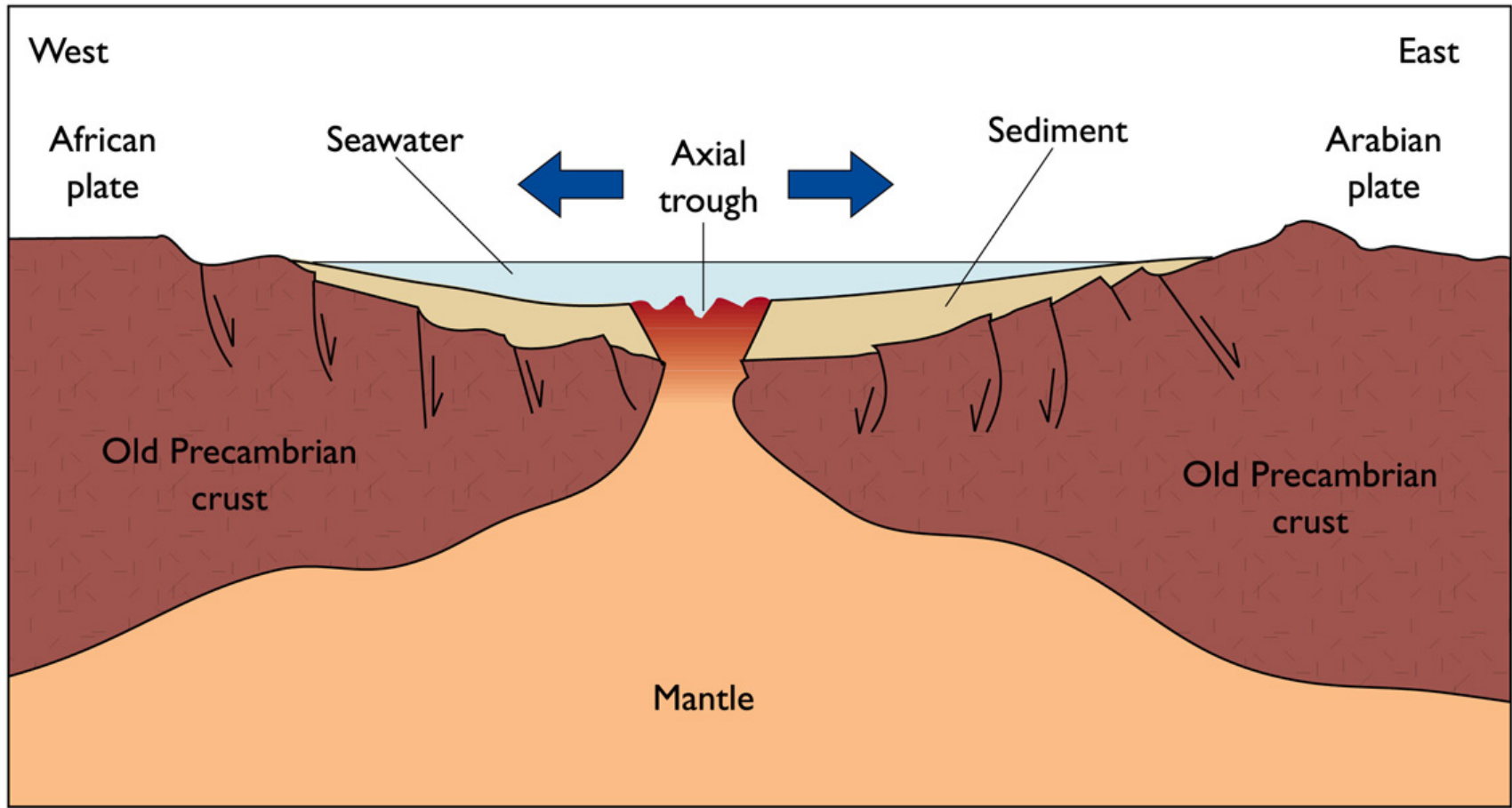
(c) PRESENT-DAY MARGIN SOUTHEAST OF CAPE COD

- Restrição basinal: A presença de sal indica que a maior parte do oceano secou periodicamente a medida que a água evaporava e depósitos (EVAPORITOS) salinos formavam-se .
- Não somente existem evaporitos no fundo, mas a água nas depressões mais profundas (Atlantis II, Discovery Deep e Oceanographer deep) é usualmente mais salgada (salmouras quentes—HOT BRINES). Essas salmouras atingem temperatura de 50 a 60 °C e estão cheia de metais (SULFETOS METÁLICOS) . A fonte tanto do sal como dos metais é o fluxo de água subterrânea através de fraturas das rochas subjacentes. Essa água/salmoura é então aquecida a medida que passa através da crosta aquecida, torna-se corrosiva e lixivia os metais das rochas basálticas, sendo então descarregada ao longo das depressões, falhas e fraturas do fundo, onde permanece devido a SUA ALTA DENSIDADE.
- A medida que o nível dos metais dissolvidos aumenta (ferro, manganês, cobre, chumbo e zinco) aumenta, muitos precipitam com depósitos de sulfetos dando brilho e coloração aos sedimentos.
- Pesquisas geoquímicas indicam que os depósitos da Atlantis II são suficientemente concentrados para serem explorados comercialmente.

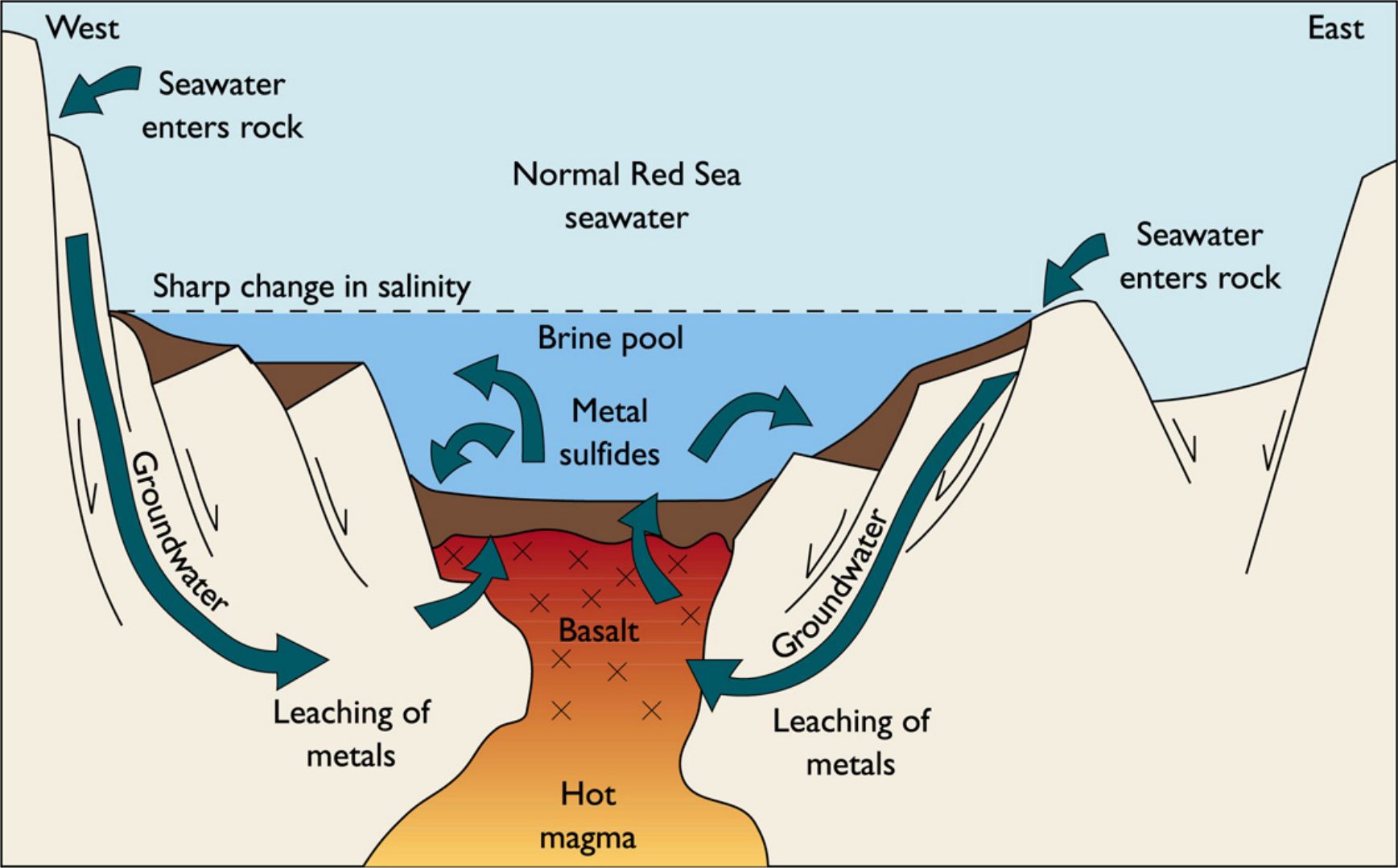
- Jatos de água através de mangueiras poderosas baixadas de navios, poderiam transformar os depósitos em lama densa os quais poderiam então ser bombeados para a superfície a uma taxa aproximada de **200.000 toneladas por dia**. Esses depósitos seriam então processados a bordo do navio de mineração.---
Economicamente deveria ser processado no oceano---o problema é o rejeito da mineração----metais pesados---engenheiros vem trabalhando em técnicas de processamento para minimizar os impactos ambientais.

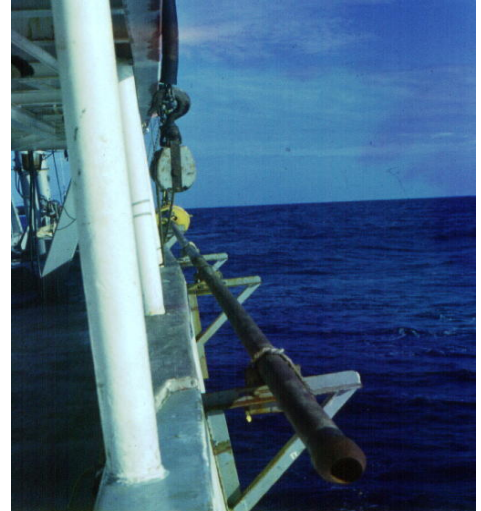
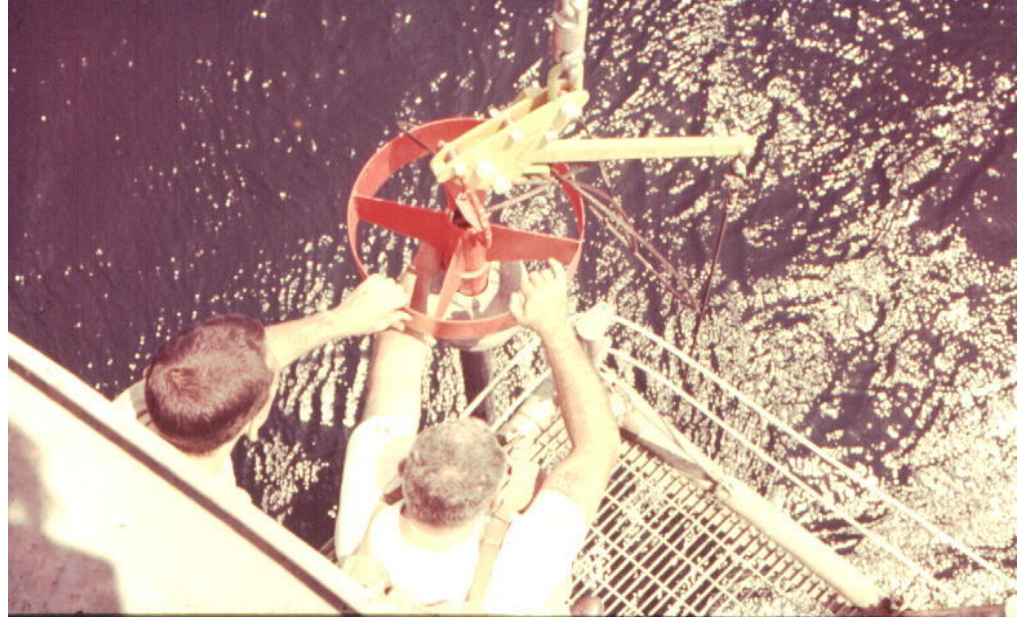


(b) THE RED SEA SPREADING CENTER



(c) GEOLOGIC (WEST-EAST) CROSS SECTION





Papel dos evaporitos e dos processos na concentração de recursos minerais

química e como material de construção.

O papel dos evaporitos, e dos processos evaporíticos, na formação de concentrações de recursos minerais é bastante diverso. Além do próprio valor econômico, a dissolução intraestratal de evaporitos pode resultar na criação de “trends” de permeabilidade que atuam de maneira importante no movimento de fluidos formadores de minérios, ou fornecer a porosidade necessária para o acúmulo de petróleo ou outro minério. Os evaporitos podem também ser de importância considerável na formação de minérios não sedimentares. Um exemplo excelente é fornecido pelo depósito de sulfetos de Níquel – Cobre – Platina na Sibéria, associados a um importante depósito evaporítico. Informações

Evaporitos e matéria orgânica:

No registro geológico encontram-se inúmeras associações entre carbonatos evaporativos, evaporitos, e a ocorrência de hidrocarbonetos. Tais associações foram previamente interpretadas como consequência somente do fato de que os sais se comportam como barreiras à permeabilidade (Borchert e Muir, 1964). No entanto, Szatmari (1980), Kirkland e Evans (1981) e Evans e Kirkland (1988) observaram altos níveis de atividade biológica associados com a deposição de evaporitos modernos e propuseram que tais níveis de produtividade são responsáveis, pelo menos em parte, pelos hidrocarbonetos encontrados em depósitos antigos análogos desses evaporitos. Sedimentos depositados sob condições hipersalinas, particularmente aqueles depositados na fase salina de transição entre carbonatos e evaporitos marinhos, são agora reconhecidos como fontes potenciais de significantes quantidades de óleo (Benaliouhaj et al., 1994; Benali et al., 1995).

Exemplo da Bacia de Sergipe:

No Brasil, depósitos evaporíticos Aptianos ocorrem nas bacias marginais formadas através dos vários processos relativos à ruptura do Gondwana e formação do Oceano Atlântico Sul. A fase evaporítica ocorreu quando da formação de um ambiente marinho restrito, denominado de golfo, que sucedeu a fase inicial de rifteamento, onde ambientes continentais

prevaleciam, e antecedeu a fase marinha carbonática relativa a um mar raso que evoluiu para a bacia oceânica do Atlântico Sul (Fig. 9). Tais depósitos evaporíticos formam um pacote espesso, de 1 km ou mais localmente, que caracteriza um importante marco estratigráfico observado em poços e seções sísmicas obtidos na margem continental.

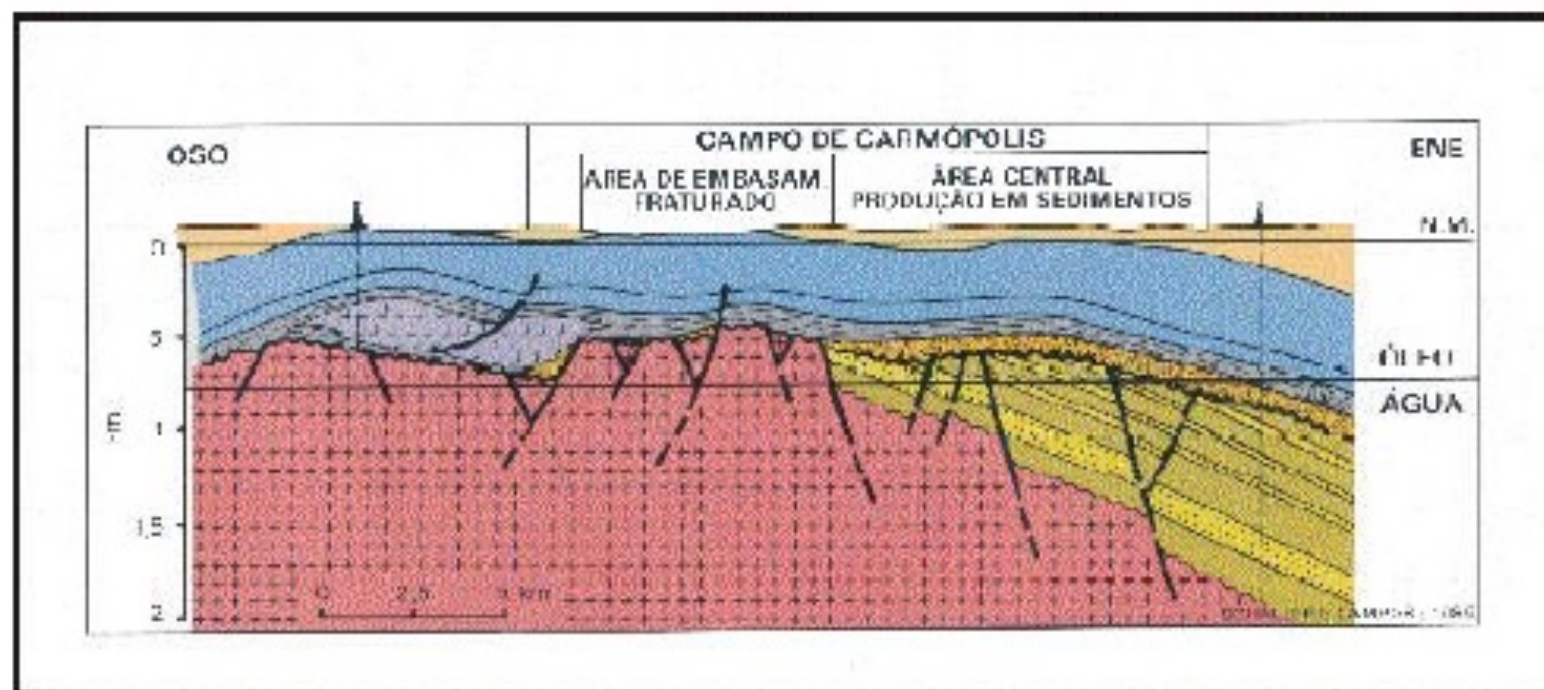


Figura 8 – Distribuição da camada evaporítica de idade Aptiana da Bacia de Sergipe (in: Viro, 1985). Na parte terrestre da bacia, a camada contendo sais de potássio é explorada. A sequência evaporítica corresponde a fase transicional marinha restrita (golfo) e representa um excelente marco estratigráfico da margem continental leste brasileira.

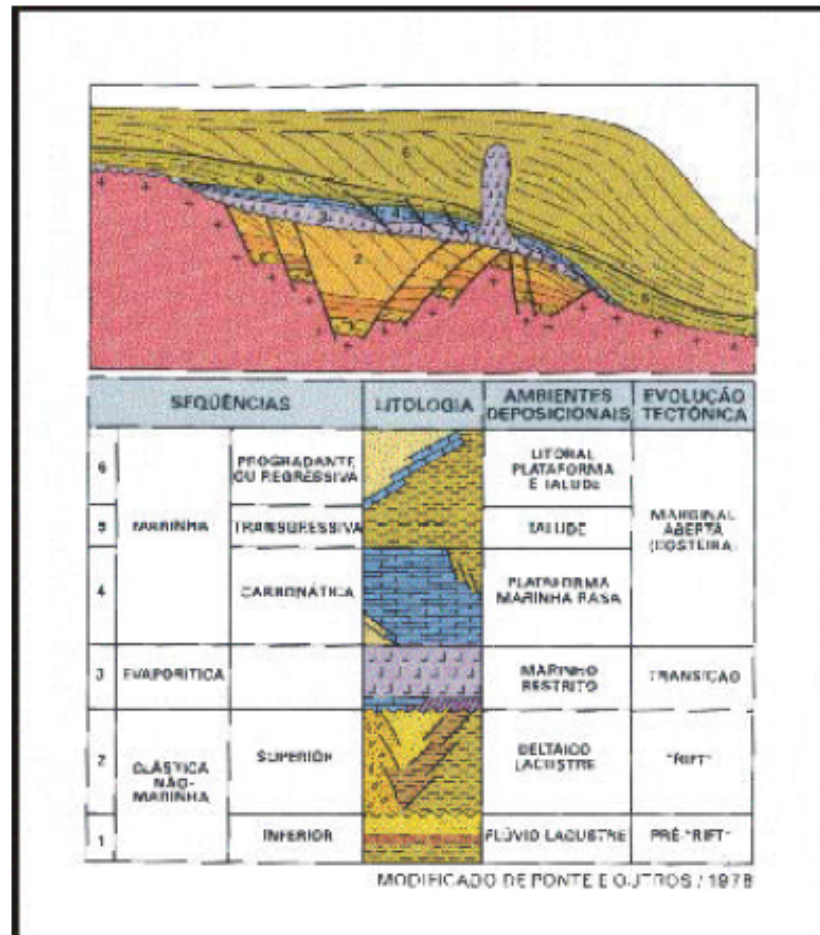


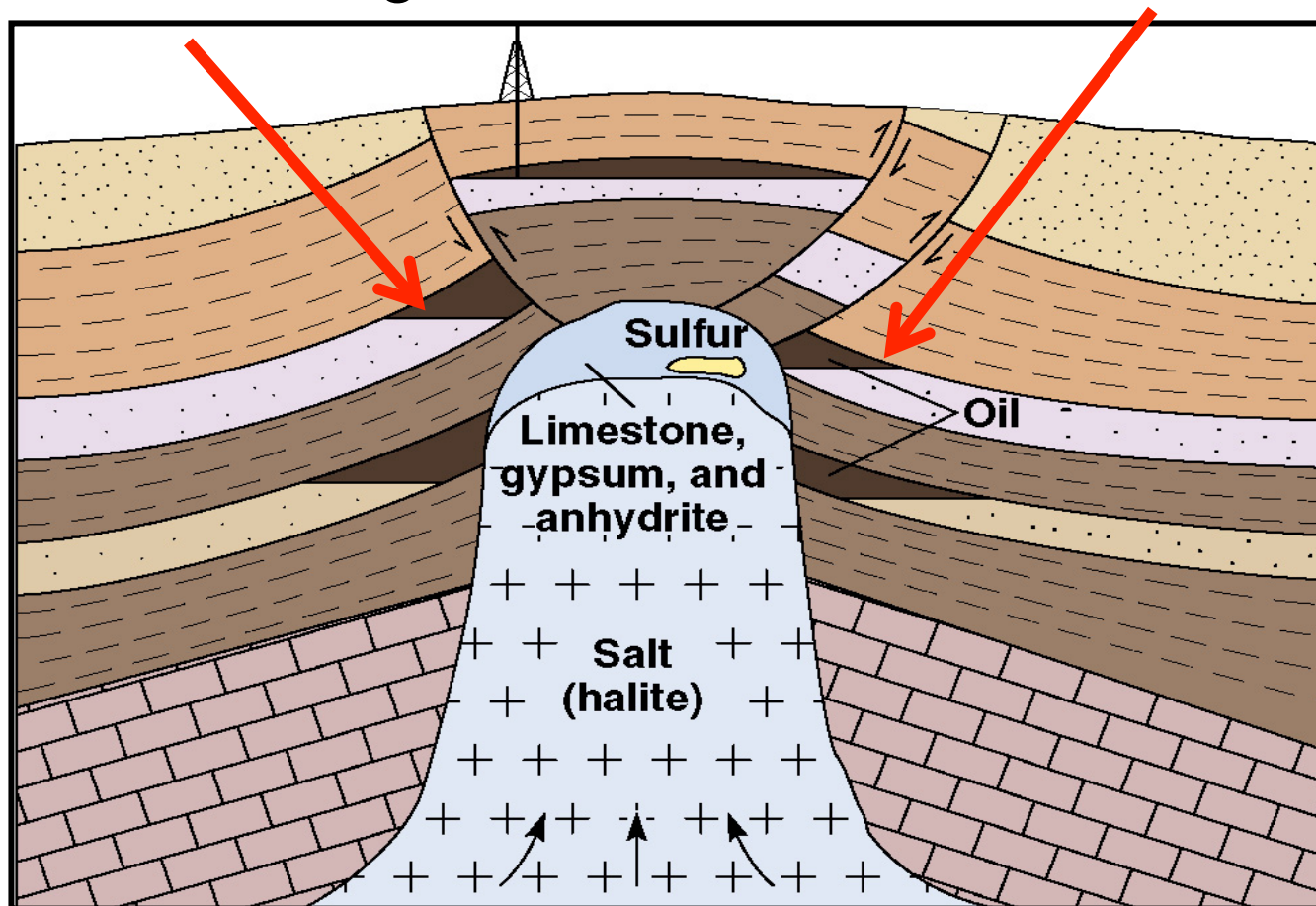
Figura 9 – Esquema ilustrativo das seqüências, litologia e ambientes deposicionais presentes nas bacias marginais brasileiras (Ponte et al., 1978, in: Viro, 1985).

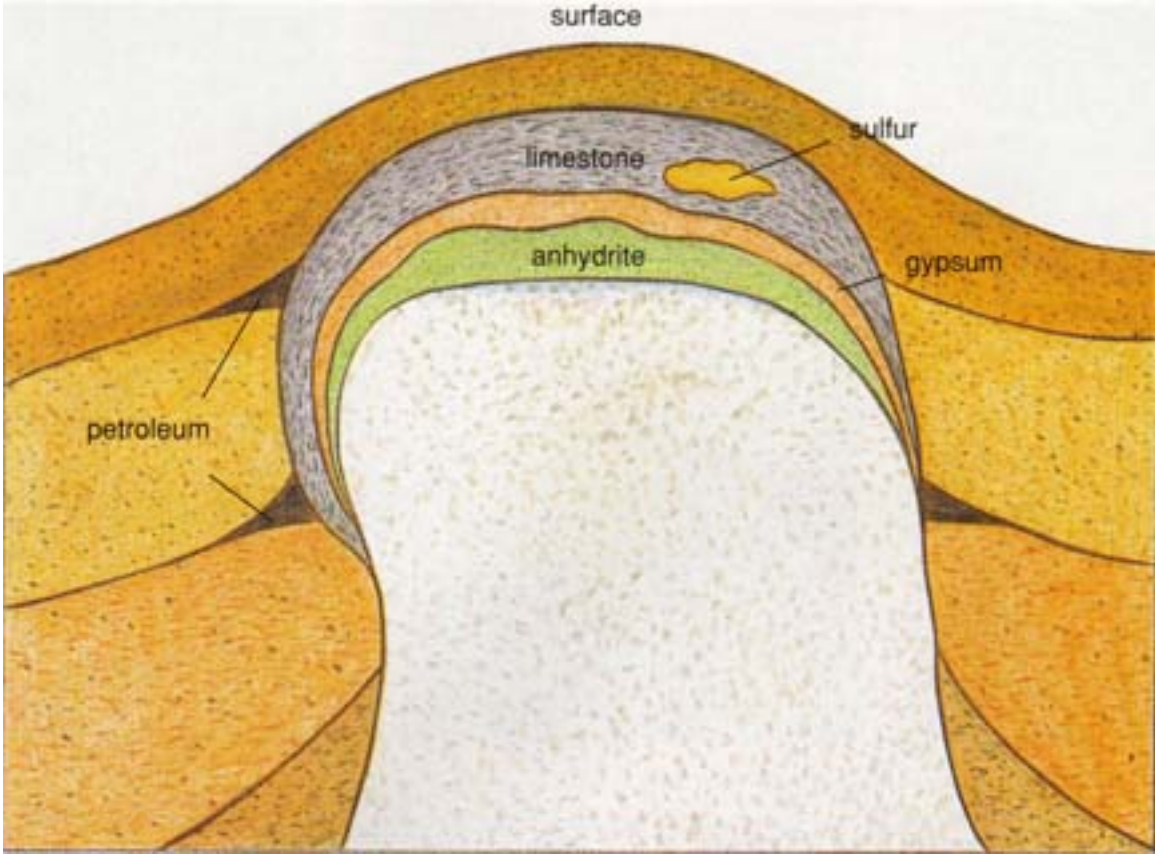
VALORES DE LIXIVIAÇÃO SUBTERRÂNEA:

Na Bacia de Sergipe, a seqüência evaporítica ocorre em parte na porção terrestre, em subsuperfície (Fig. 8), e é formada principalmente por halita, silvinita, carnalita, além da anidrita, taquidrita e carbonatos do Membro Ibura da Formação Muribeca. Tais depósitos evaporíticos foram formados em uma série de ambientes costeiros representados por sabkhas, lagoas salinas e canais de maré (Szatmari et al., 1974; Oliver, 1995). A silvinita e carnalita (e em menor proporção também a taquidrita) vêm sendo exploradas a partir de minas e galerias subterrâneas para fins comerciais como fertilizante, principalmente.

- **Salt Domes:** large masses of salt that have a generally diapiric shape. Less dense than surrounding rock and therefore tend to rise within the crust.
- **Traps:** locations where petroleum accumulates.
 - **Traps** form from upwarping of surrounding sedimentary layers as well as faulting in the units above the dome.
 - May either be **structurally** controlled or **stratigraphically** controlled.

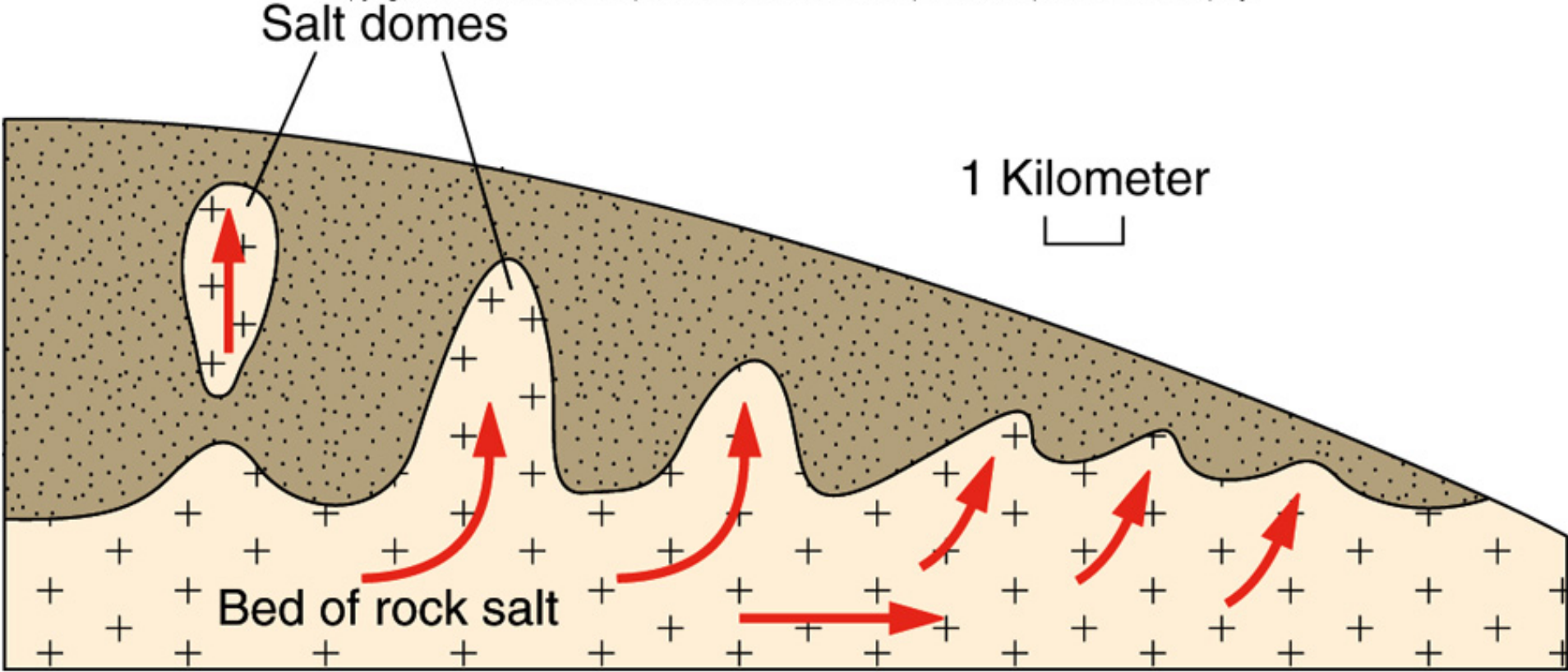
Salt domes form excellent traps. Salt domes originate from deeply buried salt layers (formed by evaporation of ancient oceans). Weight and pressure of overlying rock layers squeezes the salt upward into giant underground “thumbs” that push up through the overlying layers. Most of the oil fields of Texas and Louisiana tap into oil trapped around underground salt domes.

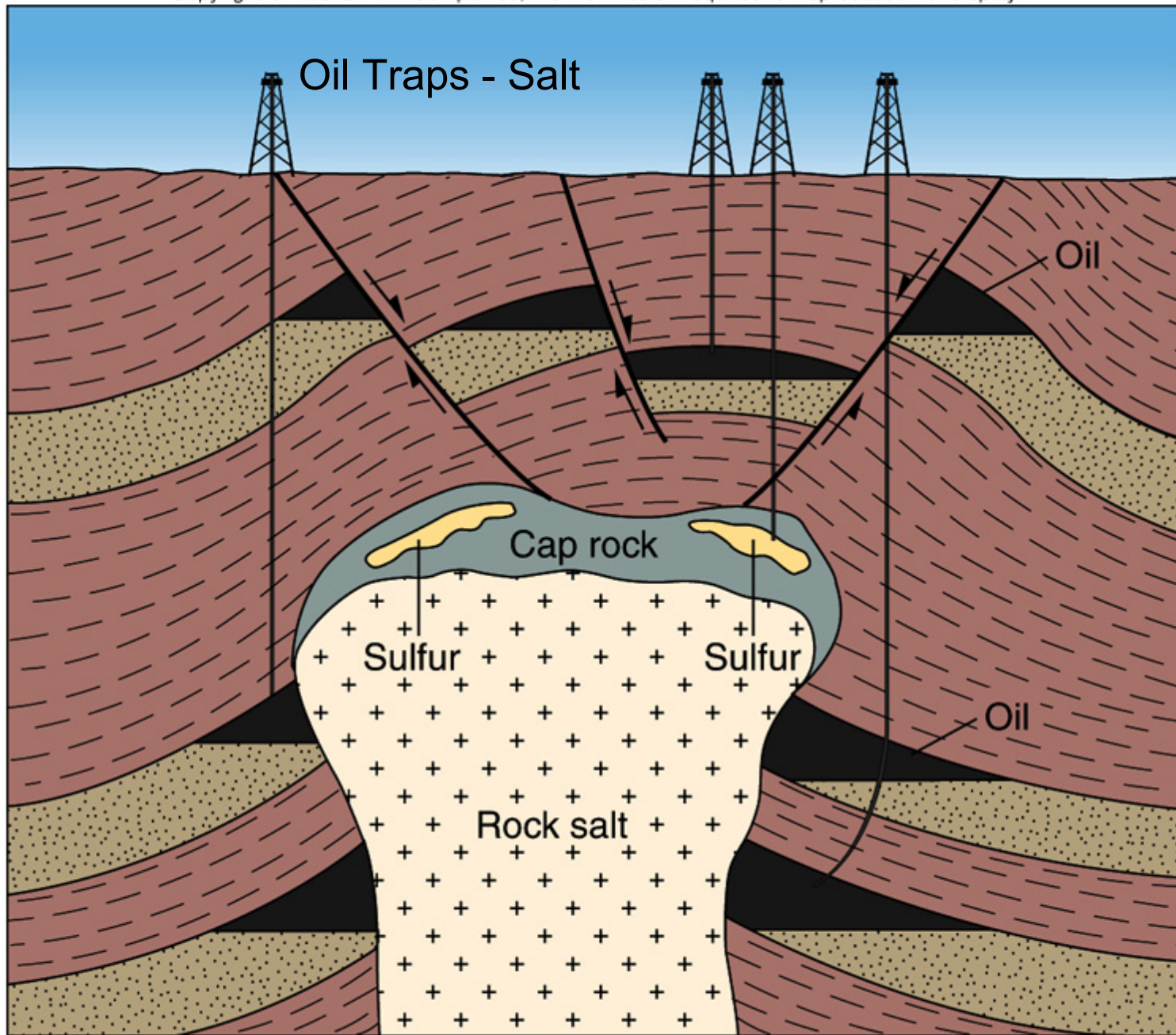




Salt Domes

Copyright © McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.





1 Kilometer

Copyright © McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Salt Body Outcrop

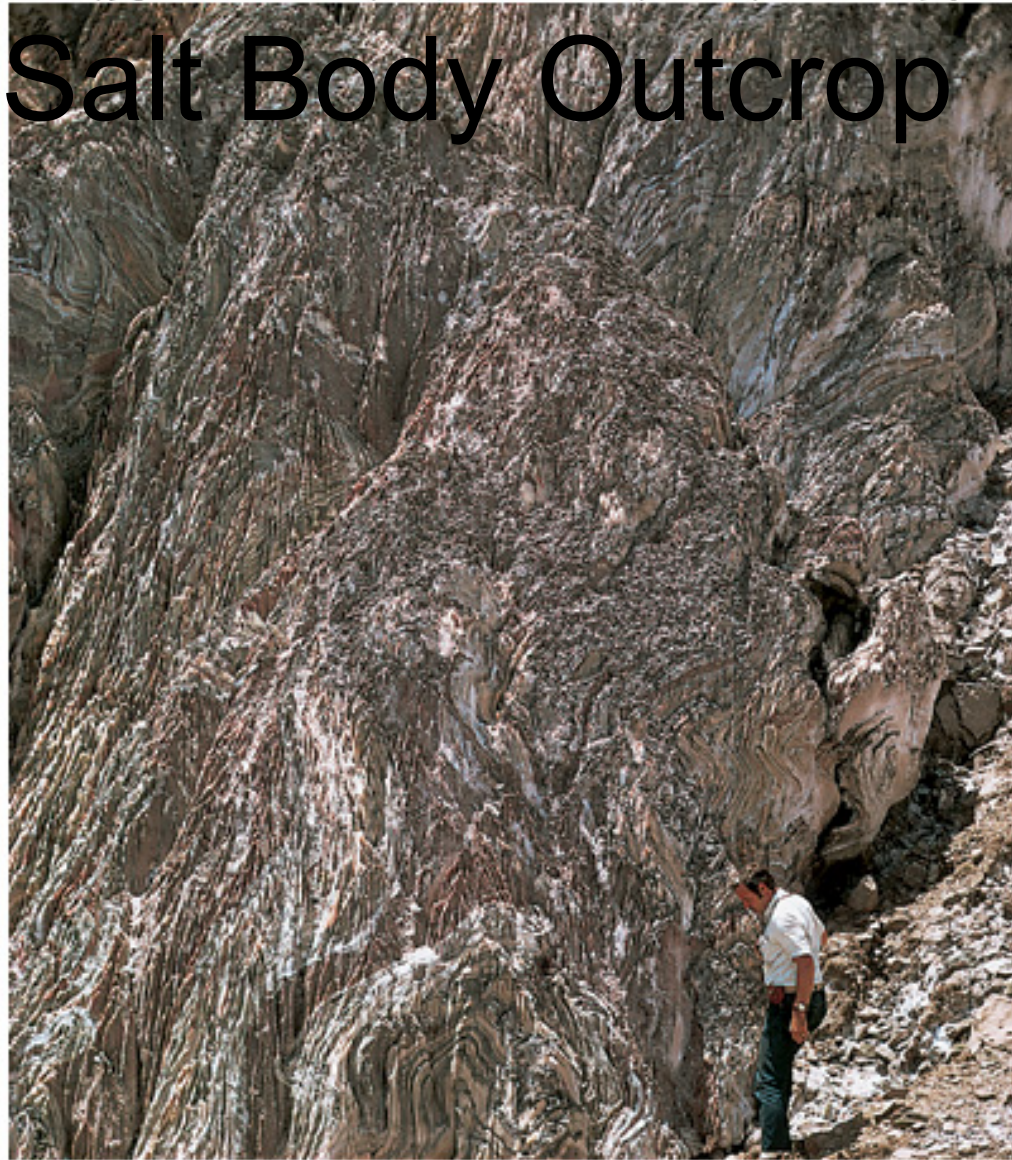
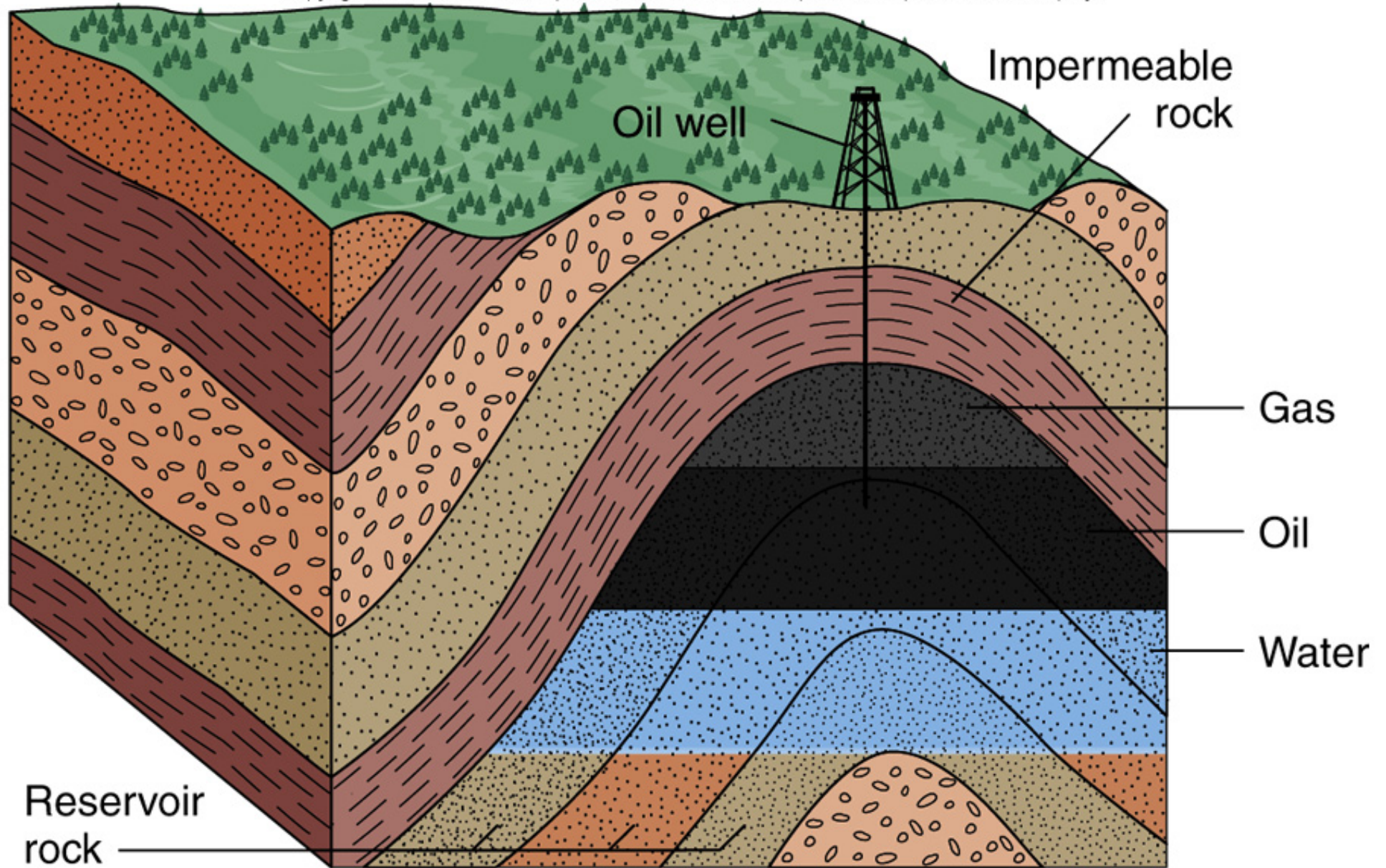


Photo by C. C. Plummer

Note well developed folding, which related to the salt motion.

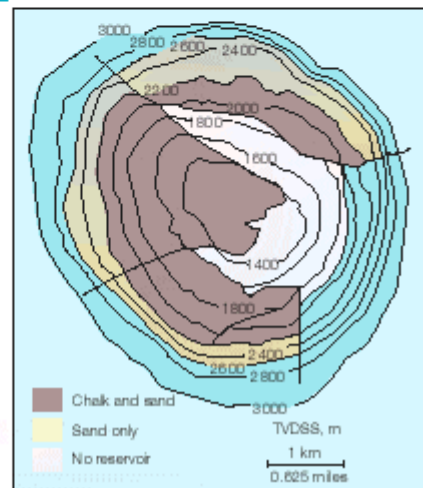
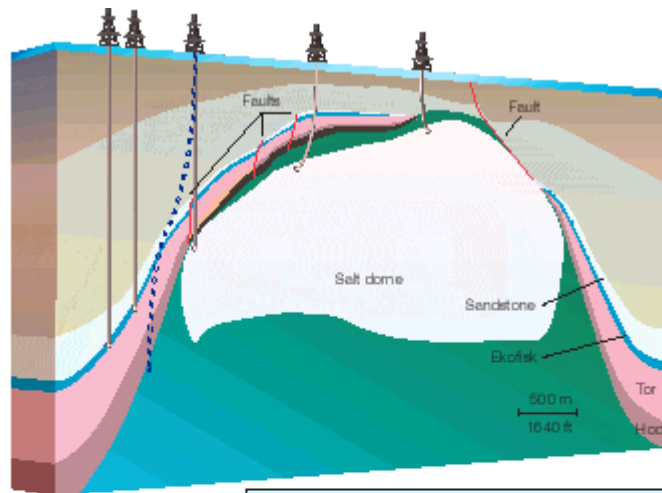


A Fold Traps



B

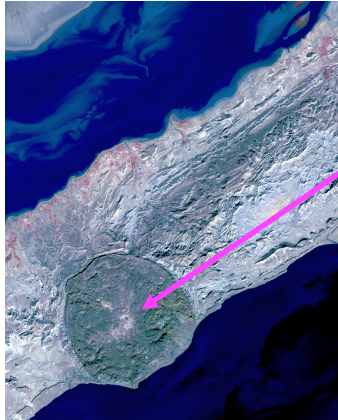
Photo by Diane Carlson



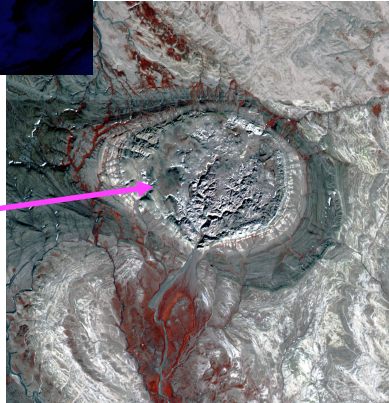


Saltdome Shower Array (SaLSA) concept

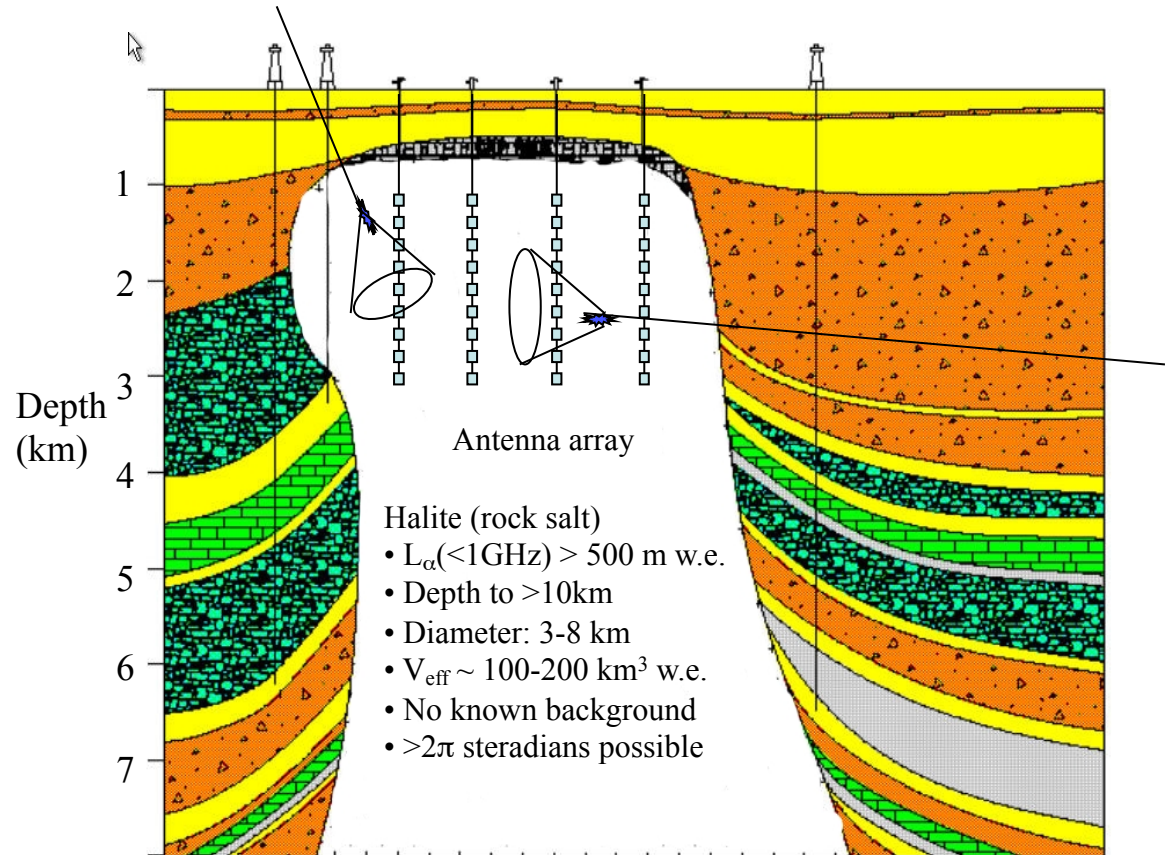
Salt domes: found throughout the world



**Qeshm Island,
Hormuz strait,
Iran, 7km
diameter**

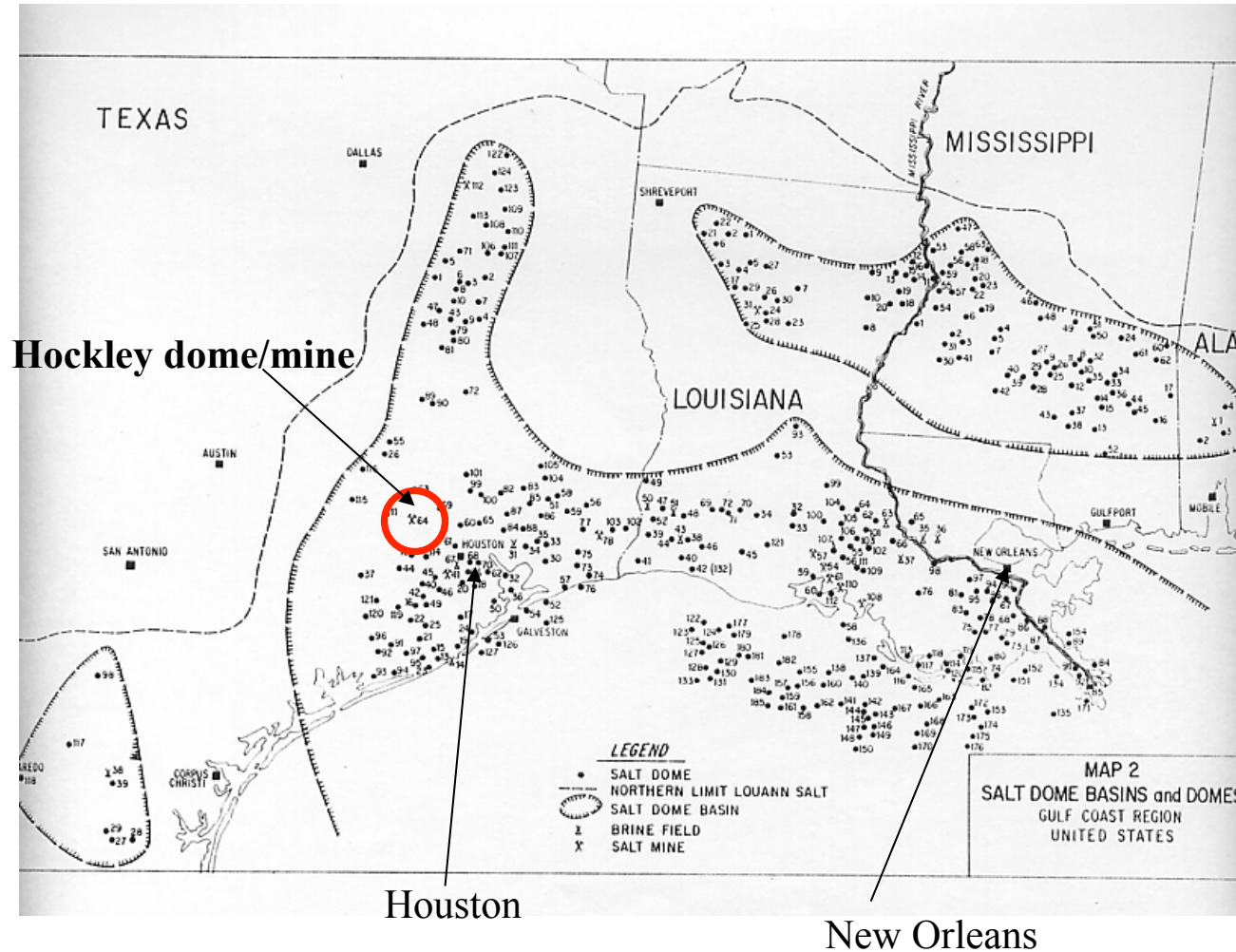


**Isachsen salt
dome, Elf
Ringnes
Island,
Canada 8 by
5km**



- Rock salt can have extremely low RF loss: → as radio-clear as Antarctic ice
- ~2.4 times as dense as ice
- typical: **50-100 km³** water equivalent in top ~3km ==> **300-500 km³ sr possible**

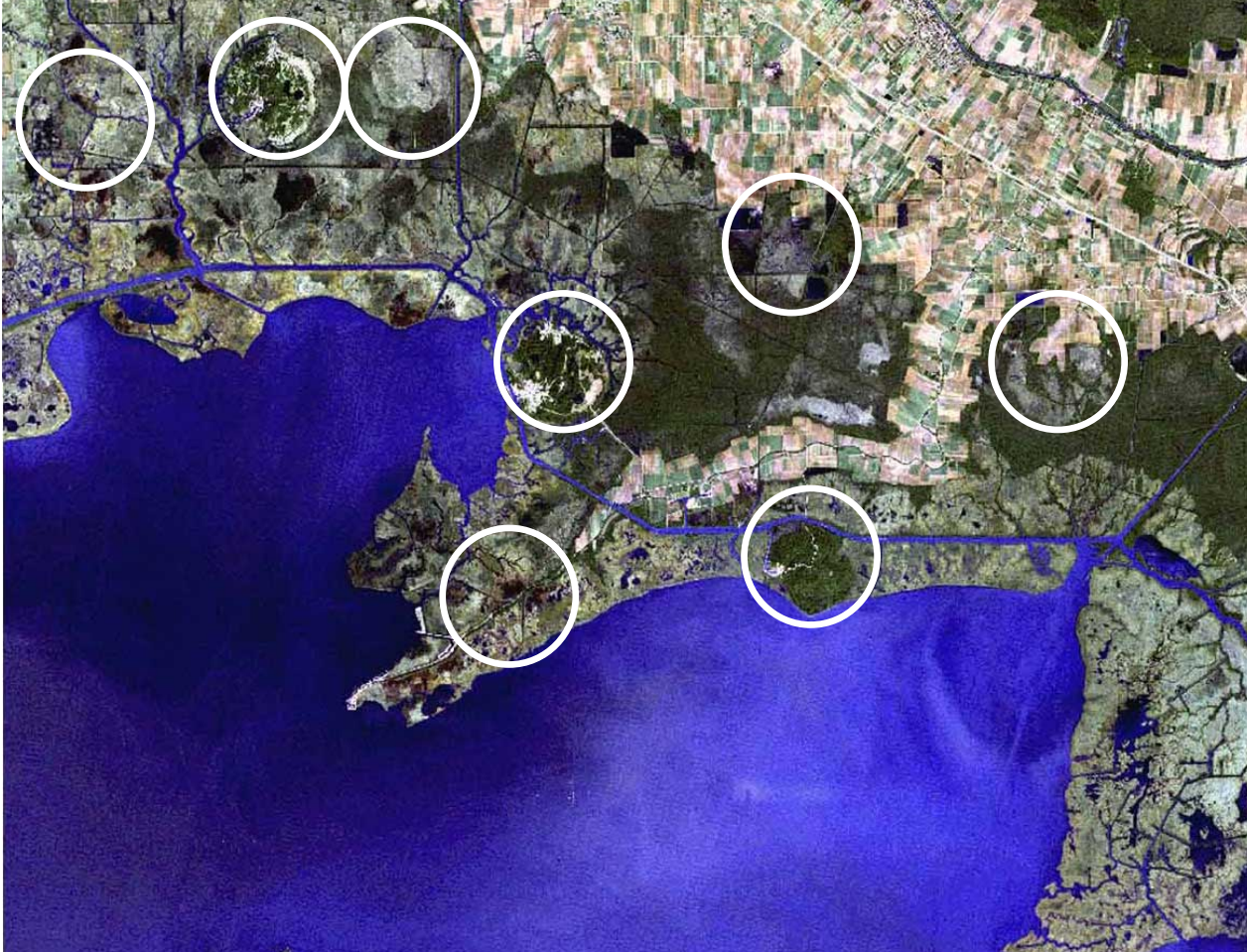
U.S Gulf coast salt domes



Salt dome demographics:

- Several hundred known—some are good source of oil
- Typical ~3-5 km diameters, 5-15 km deep
- ~200 km³ water equiv. in top 3-5 km for many domes

Gulf coast salt domes



- Texas, Louisiana, Mississippi all have dozens or even hundreds of domes
- 3-4 km diameters,

Tehuantepec, Mexico

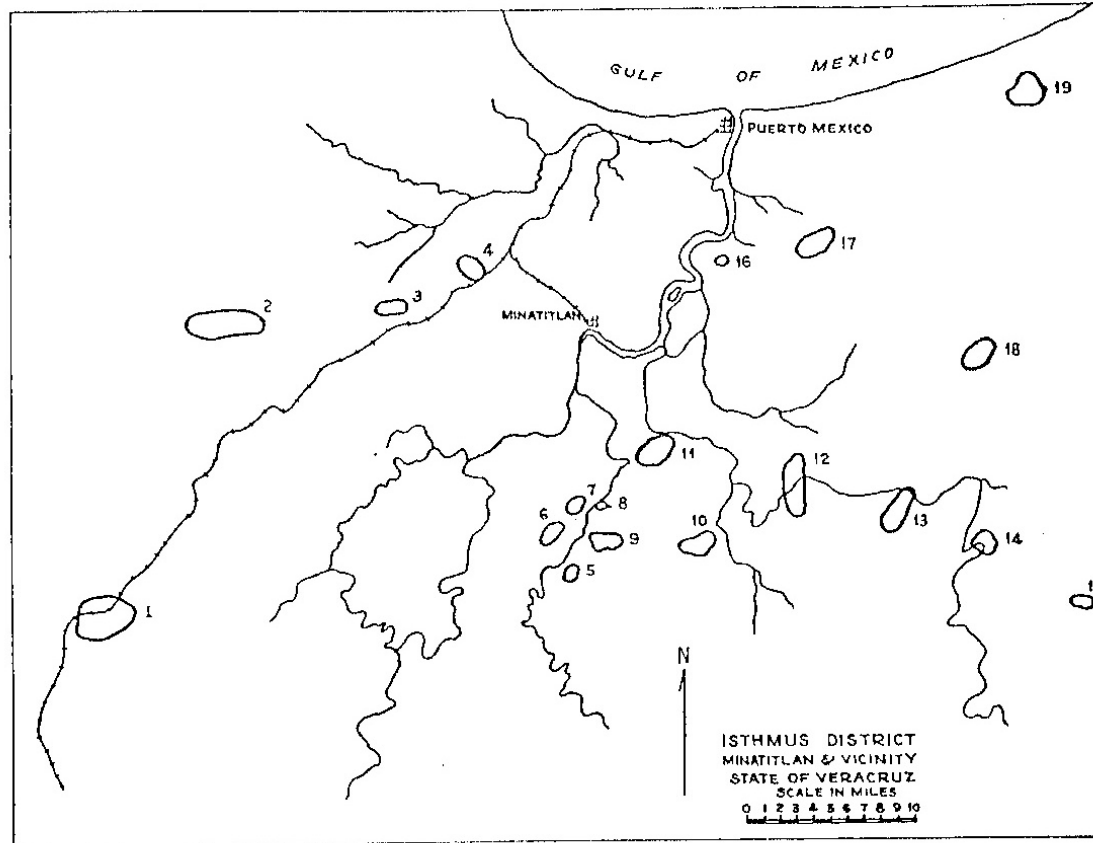


FIG. 2.—Isthmus of Tehuantepec salt-structure province, state of Veracruz, Mexico.

- These salt domes have similar ages, structure, composition, to Louisiana/Texas domes

- Several are very large

Utah/Colorado salt structures

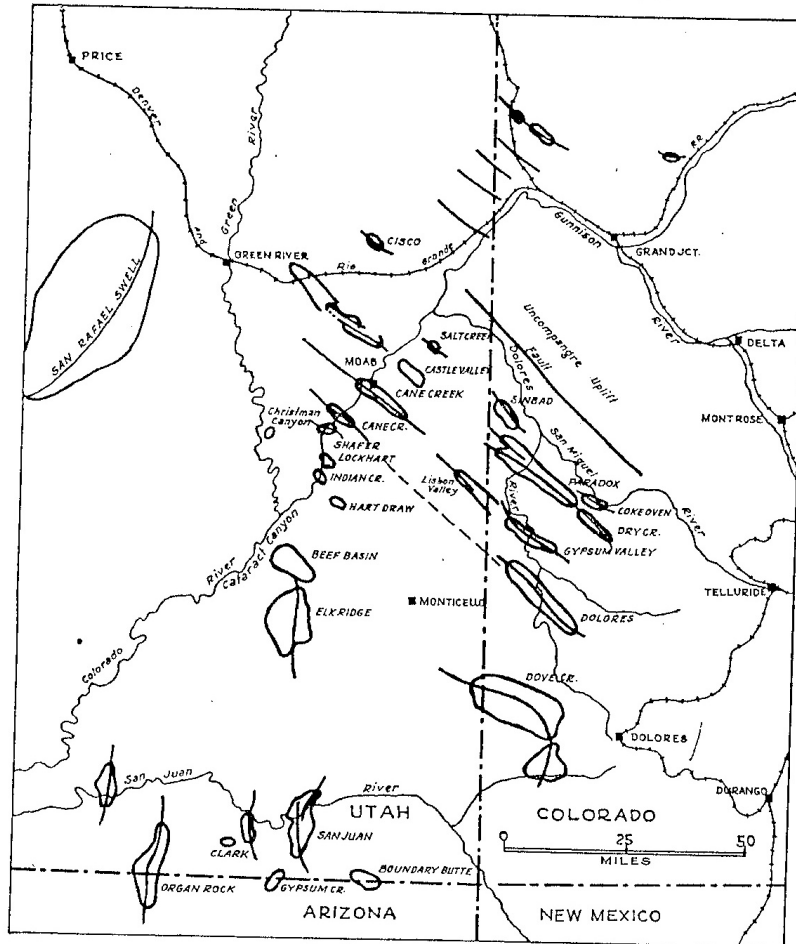


FIG. 3.—Utah-Colorado salt-structure province. After Thomas H. Harrison, "Colorado-Utah Salt Domes," *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, Vol. 11, No. 2 (1927), p. 113, Fig. 1.

- Utah, Colorado contains a region of salt diapirs
- Many "anticlines", several domes

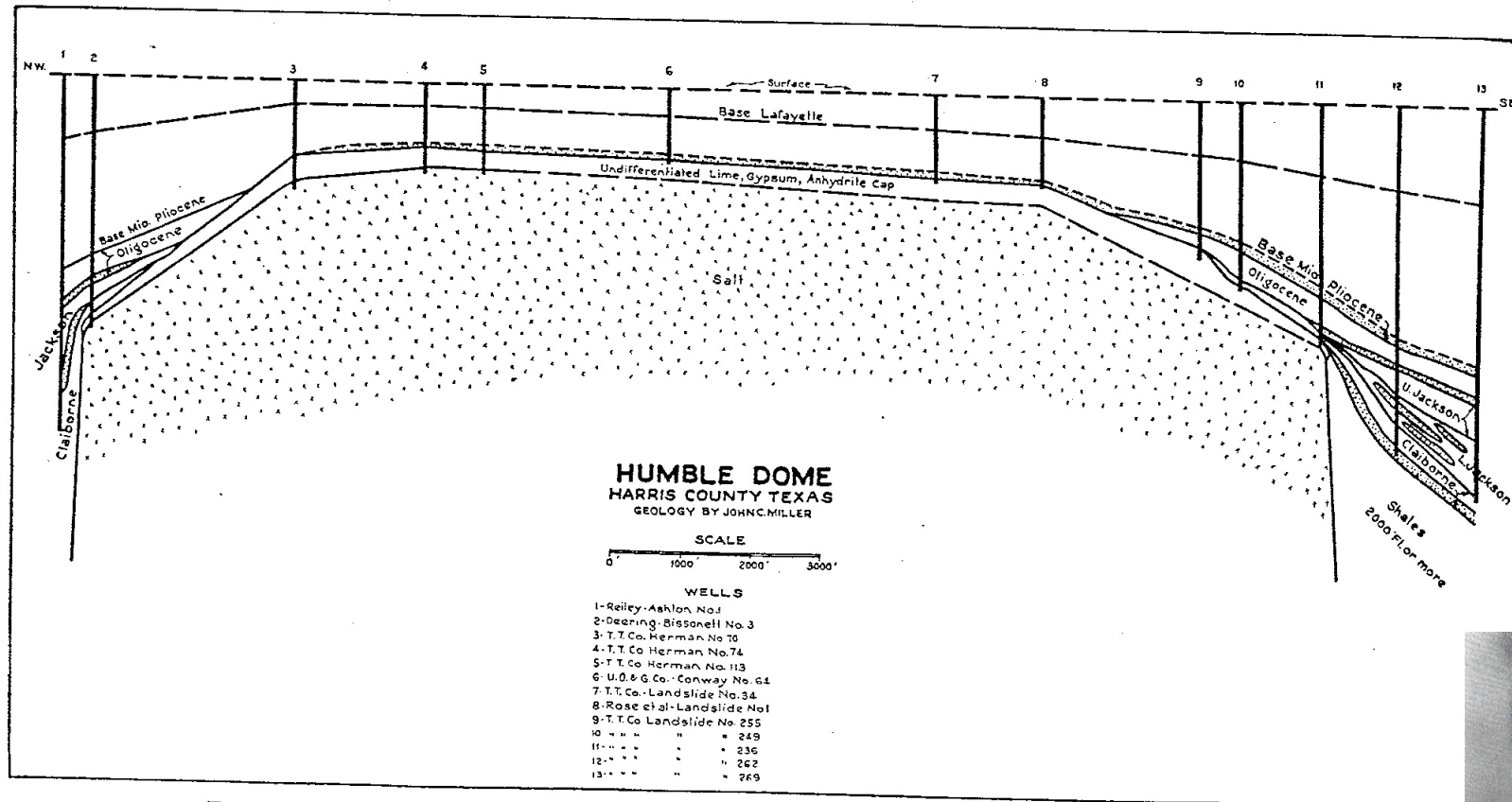
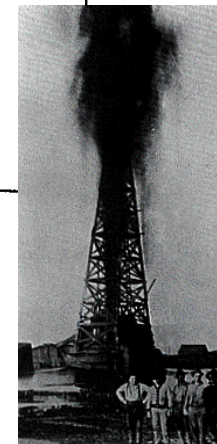


FIG. 20.—Section through Humble dome, Harris County, Texas. (Constructed for the writer by John C. Miller.)

- 4.8 km wide, salt level begins at 600m depth, thick caprock
- Town of Humble is centered on dome!
- Humble Oil--now known at Exxon!!



Examples of salt dome halite purity

Salt dome	Sample depth, ft	NaCl %	CaSO₄ %
Splindletop	2676	94.83	5.17
Sour Lake	7290	92.48	7.52
Saratoga	--	96.79	3.21
McFaddin	2645	98.47	1.53
Hull	706	92.15	7.85
Moss Bluff	4566	96.02	3.98
High Island	3359	89.63	10.37
Grand Saline	Various	98.9	1.1
Hockley	1200	95	5
Avery Island	--	98.73	1.2
Port Barre	--	99	1

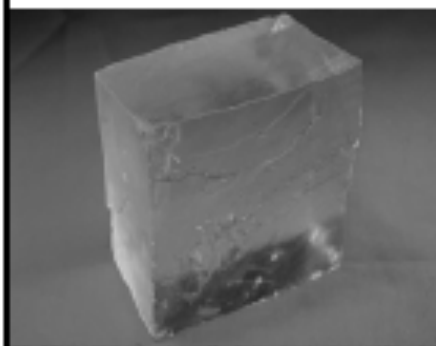


Sulfur Photo from MII, courtesy of the Smithsonian Institution





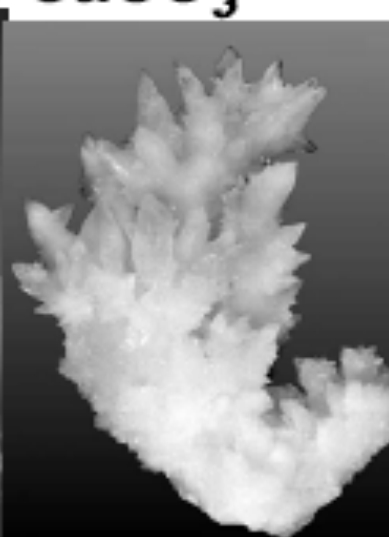
Halite NaCl (Salt)



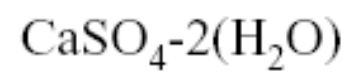
Occurrence: Evaporites,
Salt Domes

Uses: Table salt, De-icing,
Nuclear waste host rock?

Calcite CaCO₃

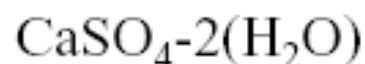


Gypsum



Gypsum

a common sedimentary mineral



Uses: plaster, wall board, some cements, fertilizer, paint filler, ornamental stone, etc..

Gypsum is one of the more common minerals in sedimentary environments. It is a major rock forming mineral that produces massive beds, usually from precipitation out of highly saline waters.

Anhydrite



Anhydrite does not form directly, but is the result of the dewatering of the rock forming mineral Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). This loss of water produces a reduction in volume of the rock layer and can cause the formation of caverns as the rock shrinks.

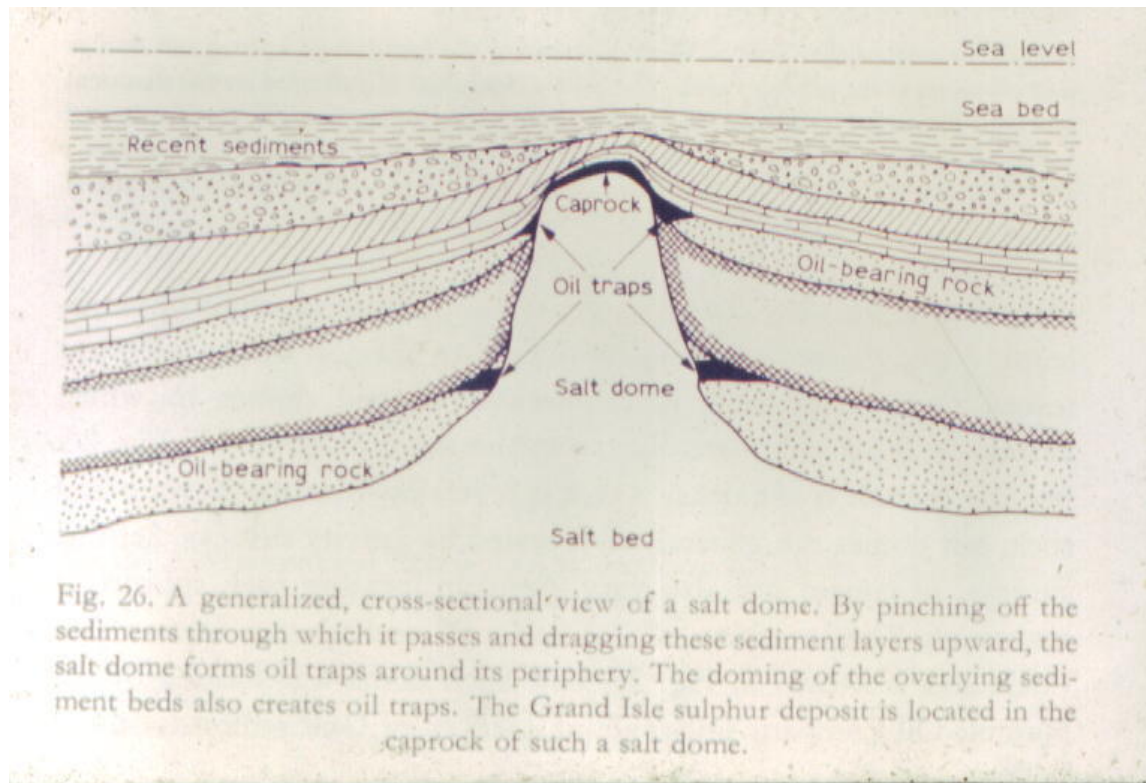
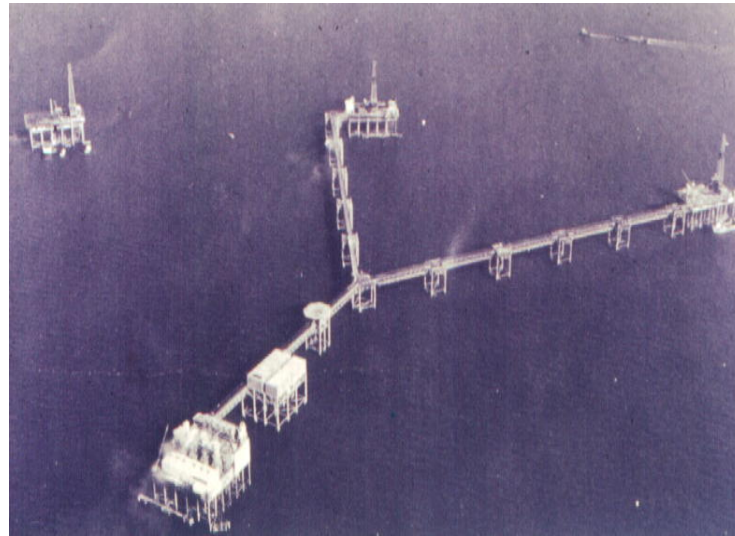
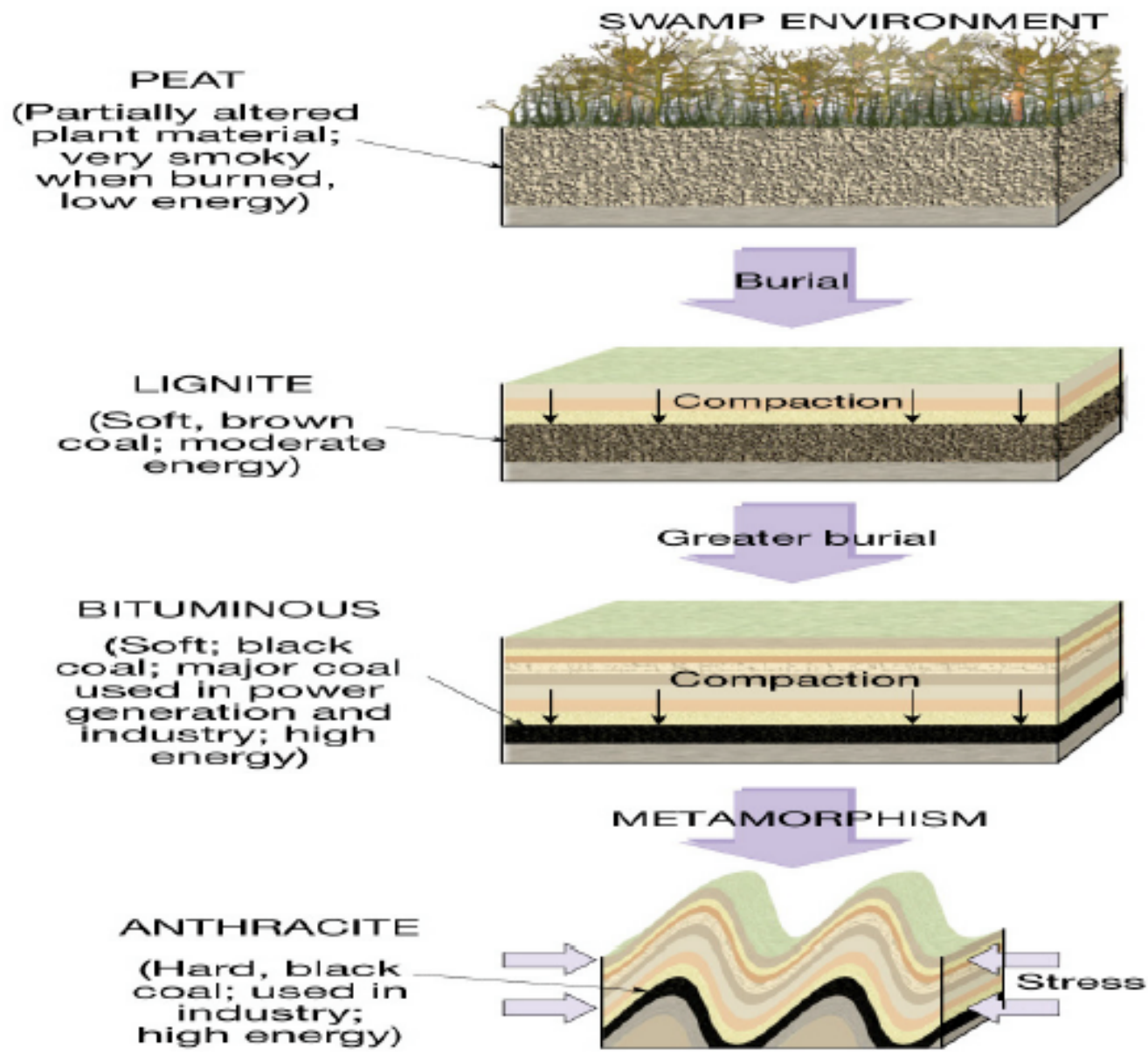
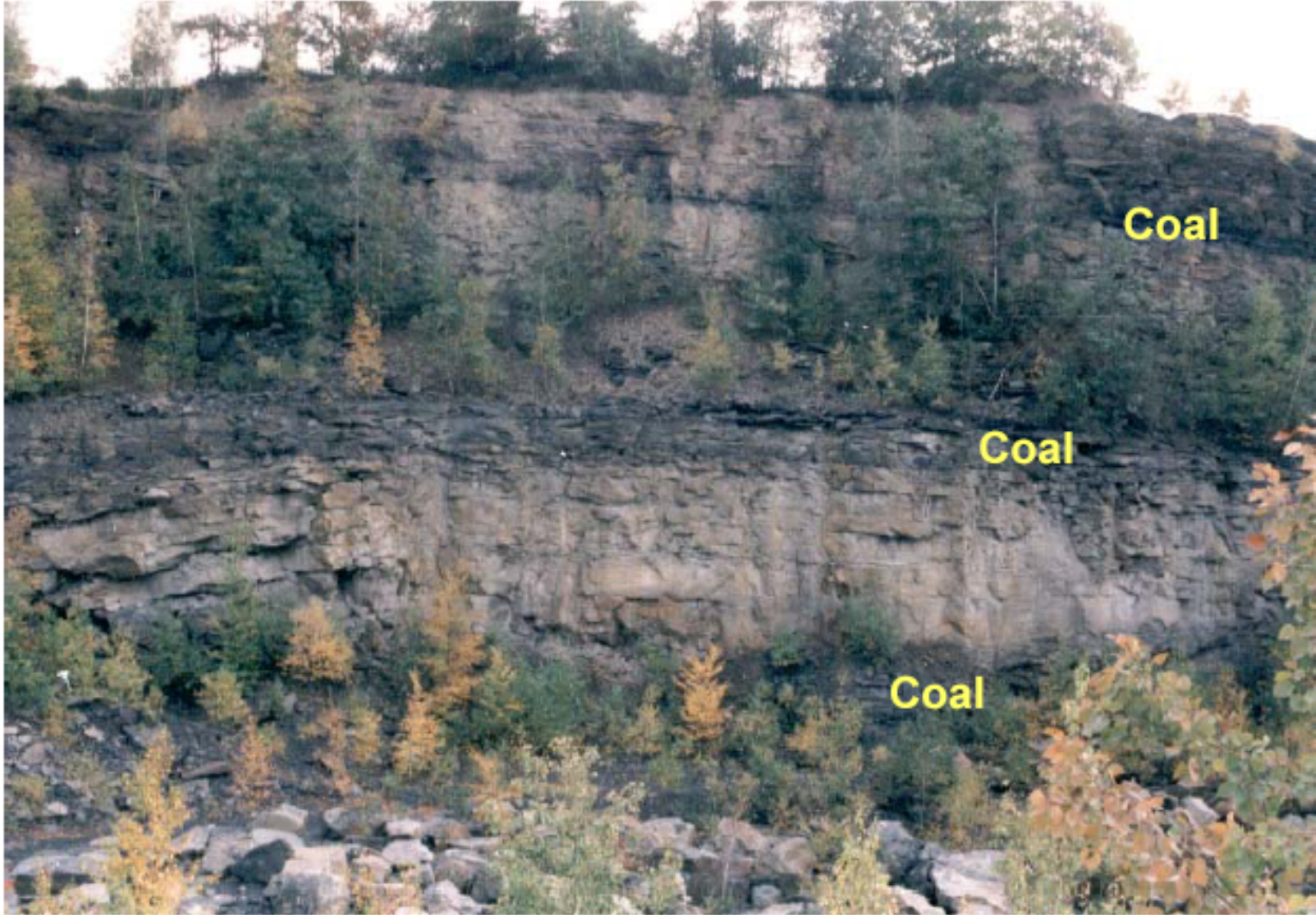


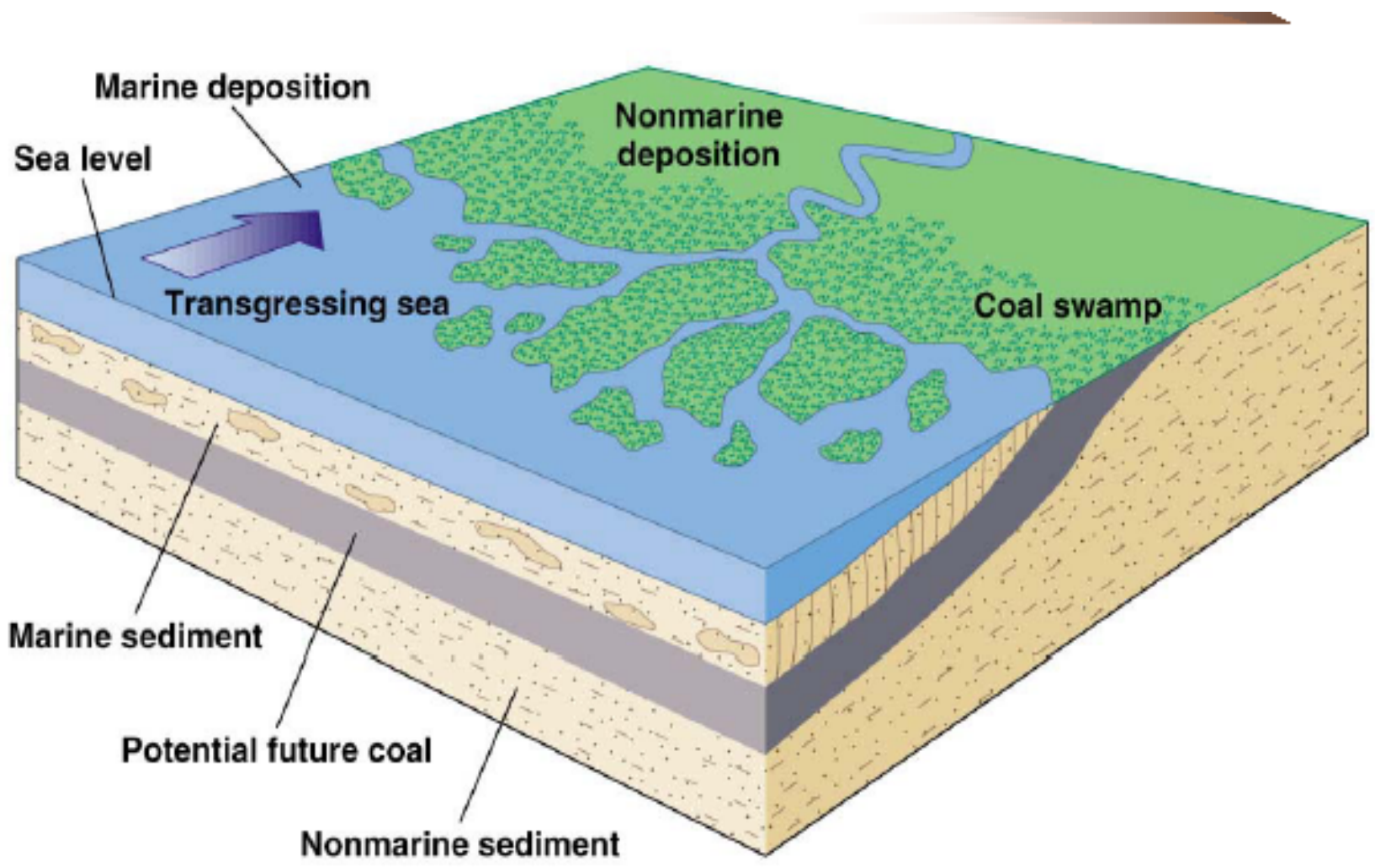
Fig. 26. A generalized, cross-sectional view of a salt dome. By pinching off the sediments through which it passes and dragging these sediment layers upward, the salt dome forms oil traps around its periphery. The doming of the overlying sediment beds also creates oil traps. The Grand Isle sulphur deposit is located in the caprock of such a salt dome.

Coal

- Different from other rocks because it is composed of organic material
- Stages in coal formation (in order)
 1. Plant material
 2. Peat
 3. Lignite
 4. Bituminous







(c)

- a modern coal-forming environment



