

- 1- Krakatoa (Indonésia)
- 2- Ghawar (Arábia Saudita)
- 3- Mukluk (Alasca)
- 4- Lago Assal (Djibuti)

Nesta edição do Jornal Fala da Terra passamos pela Indonésia e relembramos a erupção do Krakatoa em 1883. Em recursos conhecemos um pouco da história do maior campo de petróleo do mundo, Ghawar. Em geohistória acompanhamos a história exploratória do prospecto petrolífero Mukluk nas gélidas águas do Alasca. Em Leitura da Terra visitamos o método geofísico GPR ou Radar de Penetração no (sub) solo. Finalizamos nossa viagem no pequeno país africano Djibuti.

**Luiz Alberto Santos**

### GEODINÂMICA: Erupção do Krakatoa em 1883



Figura 1: Krakatoa

Depois de vários séculos adormecido, em 20 de maio de 1883 o Krakatoa começou a acordar. Pequenas explosões e abalos sísmicos denotaram este despertar. As atividades aumentaram em intensidade quando durante três dias consecutivos foram ejetadas grande quantidade de cinzas e pedras-pomes. Diversas explosões com atividades variáveis se fizeram presente até agosto de 1883. Neste dia uma gigantesca explosão ocorreu liberando enorme quantidade de energia. Logo em seguida o Krakatoa aquiesceu. A ilha vulcânica localizada no estreito de Sonda (entre Sumatra e Java) onde se situa nosso irritado protagonista, com cerca de 33 km<sup>2</sup> foi reduzida a um terço da área original. Em um raio de muitos quilômetros a quantidade de fragmentos de púmice chegou a alcançar 2 m de espessura tornando a navegação impossível.

A montanha que compunha o edifício vulcânico, com altura de 2700 m, reduziu-se a 1500 m e uma cratera com 300 m de profundidade abaixo do nível do mar se formou. Estes números dão ideia da imensa quantidade de rocha que foi pulverizada com a explosão, formando uma nuvem de poeira tão fina que atingiu 50 km de altura, obliterando a luz solar em vasta região. A cidade de Batávia, situada a 200 Km do Krakatoa ficou as escuras por muitas horas durante o dia.

Várias vilas foram destruídas e o número de fatalidades foi estimado em 36000, das quais a maior parte teria morrido em decorrência de uma enorme vaga produzida pela explosão. Há relatos de que esta onda chegou a atingir 35 m de altura em alguns lugares.

### RECURSOS: O gigante Ghawar

A partir de 2006 o Brasil entrou na era do pré-sal. Depois da primeira confirmação de petróleo de boa qualidade nas rochas carbonáticas (ricas em carbonato de cálcio – chamemo-as aqui genericamente de calcários) abaixo da espessa camada de sal na Bacia de Santos, sucessivas outras descobertas foram feitas neste contexto - calcários



## Fala da Terra

abaixo do sal. São grandes campos cujas reservas somadas alcançam vários bilhões de barris de petróleo (óleo que efetivamente será extraído do reservatório e será processado nas refinarias). Nesta seção não falaremos desses gigantes recém-descobertas na costa brasileira, mas do maior dos gigantes, o septuagénario Ghawar.



Figura 2: Arábia Saudita e a localização do campo de Ghawar destacada pelo círculo vermelho.

Na década de 1930, as Américas, Estados Unidos, México e Venezuela, ainda eram maiores produtores de petróleo no mundo. Entre 1930 e 1940 importantes descobertas foram realizadas na Arábia Saudita, entre elas os campos de Dammam (1938), Abu Hadriyah (1940) e Abqaiq (1940). Por conta destas importantes descobertas, intensas campanhas exploratórias foram realizadas a fim de avaliar o potencial petrolífero da Arábia Saudita.

Os geólogos Ernie Berg e Max Steinecke da CASOC (California-Arabian Standard Oil Co.), que veio a se tornar a Saudi-ARAMCO mais tarde, haviam mapeado o extenso e suave anticlinal de En Nala e apontavam a estrutura como promissora para a ocorrência de hidrocarbonetos. Eles haviam sugerido o extremo sul para realização de um poço pioneiro.

Contudo, o primeiro poço perfurado em Ghawar localizou-se no extremo norte do campo devido a proximidade com as plantas de produção já instaladas para o campo de Abqaiq. O poço Ain Dar-1 foi perfurado em 1948 e foi um sucesso exploratório. Nos testes de formação o óleo surgiu alcançando a

superfície. Em 1951 o campo de Ghawar em Ain Dar entrou em produção.

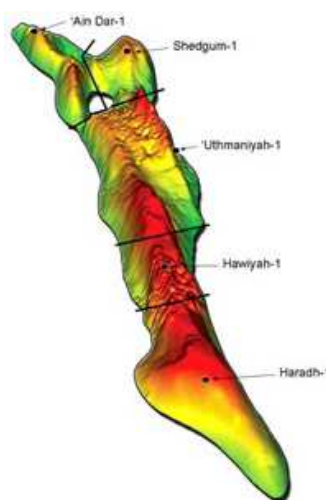


Figura 3: Imagem em 3D do topo do reservatório ARAB-D no campo de Ghawar. A estrutura anticlinal se estende por mais de 285 Km.

Em 1949 foi perfurado o poço Haradh-1 que também encontrou óleo. Aparentemente eles tinham descoberto um segundo campo cerca de 200 Km a sul de Ain Dar-1. Por conta desta distância Haradh-1 não foi imediatamente desenvolvido. Isso somente ocorreria 15 anos depois.

Em 1951 o poço Uthmaniyah-1 foi perfurado e encontrando óleo acenou para o incrível fato de que a estrutura anticlinal de En Nala possuía reservatórios carbonáticos continuamente preenchidos por óleo em uma extensão superior a 200 Km (vide Figura 3).

Um quarto poço, o Shedgum-1, foi perfurado em 1952 para avaliar a continuidade do reservatório para leste, e adivinhem, ele foi bem sucedido achando óleo de boa qualidade no reservatório carbonático denominado Arab-D.

Em 1953 foi concluída a perfuração do poço Hawiyah-1 que, ao interceptar extensa coluna de óleo, confirmou a continuidade do reservatório saturado em hidrocarbonetos entre Uthmaniyah e Haradh.



Os poços Ain Dar-1, Haradh-1, Uthmaniyah-1, Shedgum-1 e Hawiyah-1 são denominados os 5 magníficos que , com exceção de Uthmaniyah ainda produzem individualmente mais de 2000 bpd (barris por dia).

O que forma um campo com 285 km de extensão por 30 Km de largura, óleo de boa qualidade e ótimas condições de permeabilidade dos reservatórios ? Para responder em poucas palavras afirma-se que no caso de Ghawar houve uma perfeita harmonia entre os elementos que compõem um sistema petrolífero (rocha geradora; rocha carreadora (*carrier*); rocha reservatório; rocha selante; e a trapa ou armadilha - <http://www.faladatterra.com/RECURSOS.html>).

Ghawar ocupa o bloco alto de uma falha datada do Carbonífero, uma antiga estrutura com cerca de 320 milhões de anos. As rochas geradora, a Formação Hanifa, e reservatório, o calcáreo Arab-D, ambas foram depositadas durante o Jurássico em ambiente marinho. A rocha geradora tinha teor de matéria orgânica original (COT- carbono orgânico total) em torno de 5 %, altíssimo e ótimo potencial para geração de petróleo. O reservatório é um calcáreo com porosidade efetiva de 35 %, proporcionando altíssima permeabilidade.

Durante o Cretáceo, quando a América do Sul se separava da África, a Península Arábica ficou sob um regime tectônico compressivo favorecendo a formação de dobras, daí a formação do anticlinal de En Nala entre outros.

Capeando a rocha reservatório jaz a rocha selante, um evaporito, com alguma semelhança com o sal que capeia o pré-sal das bacias costeiras brasileiras. Os evaporitos são por excelência os melhores selos para hidrocarbonetos.

Além das características elencadas, as grandes estruturas e as trapas ficaram preservadas até hoje, favorecendo a acumulação de hidrocarbonetos. A soma das reservas remanescentes com o que já foi produzido em Ghawar superam 71 bilhões de barris.

### GEOHISTÓRIA: Mukluk

No final da década de 1960, exatamente em 1968, foi descoberto o gigantesco campo de petróleo de Prudhoe Bay no Alaska, uma nova província petrolífera. O volume de petróleo *in situ* foi estimado em extraordinários 25 bilhões de barris além de 740 bilhões de m<sup>3</sup> de gás. O campo somente entrou em produção em 1977 quando então foi concluído os dutos para escoamento da produção de hidrocarbonetos para os Estados Unidos.

No início da década de 1980 ocorreu o segundo choque do petróleo e o preço do barril sofreu uma elevação que acirrou os ânimos das grandes petroleiras em busca de novas oportunidades e lucros. Então, um consórcio liderado pela Sohio (British Petroleum) e Diamond Shamrock procuravam por um grande elefante em Mukluk, 105 Km a noroeste de Prudhoe Bay.

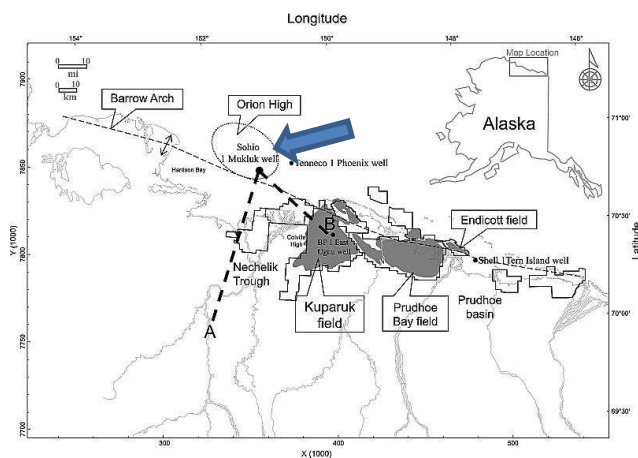


Figura 4: Mapa de localização de Mukluk e demais áreas

Todos os elementos de um promissor sistema petrolífero indicavam grandes chances de sucesso. Em geral as chances de sucesso na indústria do petróleo raramente chegam a 13 %, ou seja, dentre 100 tentativas somente 13 acertos. Os prognósticos em Mukluk eram de 30 em 100, extremamente altos. Alto o suficiente para as petroleiras envolvidas bancarem o custo, um altíssimo custo.

A locação do poço pioneiro situava-se em uma área alagada durante o verão que se congelava no inverno.



## Fala da Terra

Assim, foi necessário construir uma ilha artificial para transporte e instalação da sonda e demais equipamentos e facilidades de perfuração, processo que tomou mais de um ano entre planejamento e execução. A conta ficou em US\$ 2 bilhões em valores atualizados para o ano 2000.

Em 1983, na profundidade do objetivo, a cerca de 2400 m, o poço interceptou água salgada. Todos os elementos do sistema petrolífero contribuíram, porém a história tectônica ativa da região não preservou a trapa e os hidrocarbonetos não se acumularam e migraram por falhas ao longo do tempo geológico. É claro que cabeças rolaram.

Richard Bay, o então presidente da Sohio lamentou: “Nós perfuramos no lugar certo. Só estávamos 30 milhões de anos atrasados.”

### LEITURA DA TERRA: GPR

No método sísmico, descrito na edição de janeiro de 2013 do Fala da Terra, vimos que uma onda mecânica é gerada, se propaga pelas rochas e a cada interface (contraste de propriedades físicas), uma parte é refletida, voltando para a superfície, e outra é transmitida e continua viajando terra a dentro até encontrar outra interface, sobre a qual o processo de reflexão e transmissão ocorre novamente. As interfaces citadas no método sísmico marcam diferenças de propriedades que estão relacionadas a rigidez da rocha e sua densidade. Assim, no contato de uma rocha muito dura com outra mais mole, ou o contato de uma rocha muito densa com outra menos densa, haverá o efeito da reflexão e transmissão, ou partição da energia.

Existe uma categoria de métodos geofísicos que utiliza, não as ondas mecânicas do método sísmico mas, as ondas eletromagnéticas. Um destes métodos é o radar de penetração no solo (*Ground Penetrating Radar* (GPR)). Empregando-se algumas simplificações possíveis em meios resistivos - alguns solos, rochas e minerais com baixa condutividade - este método pode ser comparado com o método sísmico. Uma onda eletromagnética é emitida, se

propaga pelo meio rochoso e a cada interface parte da energia é refletida e outra é transmitida terra a dentro.

Contudo as propriedades “enxergadas” pelo método GPR não são mais rigidez e densidade, mas sim a permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) e a permeabilidade magnética ( $\mu$ ), duas variáveis que estão relacionadas à velocidade das ondas eletromagnéticas. Quanto maiores  $\epsilon$  e  $\mu$  menor a velocidade da onda eletromagnética na rocha. Aprendemos na escola que a velocidade da luz no vácuo, a mais alta possível, é de 300 mil Km/s ou 0,3 m/ns (metros por nanosegundos). No ar a velocidade destas ondas é próximo à do vácuo.

Nas rochas as ondas eletromagnéticas têm velocidades decrescentes com a profundidade pois permeabilidade magnética e permissividade dielétrica tendem a crescer. A tabela 1 abaixo exhibe a velocidade destas ondas em alguns materiais.

material	v·(m/ns)
ar	0,3
Água destilada	0,033
Água doce	0,033
Água do mar	0,01
Areia seca	0,15
Areia saturada	0,06
Calcáreo	0,12
Folhelho	0,09
Silte	0,07
Argila	0,06
Granito	0,13
Sal puro	0,13
Gelo	0,16

Tabela 1: Velocidade de ondas eletromagnéticas em alguns materiais nas frequências de 25 a 2500 MHz.

A Figura 5 exhibe um resultado de perfilagem com GPR. No eixo horizontal temos a distância relativa ao início da linha em metros (uma referência lá no campo onde foi feito o levantamento), e no eixo vertical temos o tempo, neste caso em milisegundos (ms) que a onda levou para descer e subir em cada interface no subsolo. A Figura 6 exhibe uma rara oportunidade de observarmos um afloramento adjacente ao local da linha de aquisição do GPR.



# Fala da Terra

Assim é possível comparar as feições observadas com esta ferramenta geofísica (Figura 5) e a realidade das rochas.

**Brincando de explorador:** O martelo na Figura 6 tem cerca de 50 cm de comprimento. A base do afloramento desta Figura 6 coincide com a linha azul na Figura 5. Você tem os elementos para estimar a velocidade média das ondas eletromagnéticas nestas rochas. Tente.

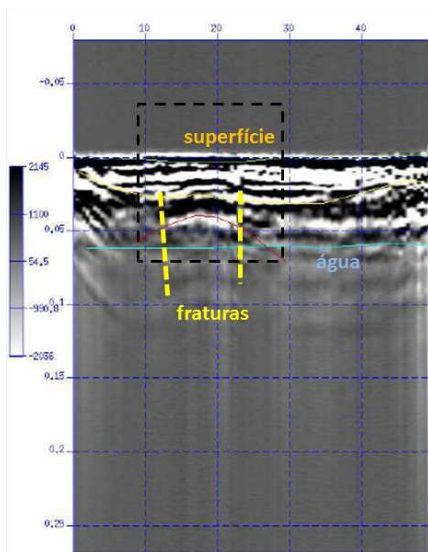


Figura 5: Seção (de afastamento comum) de GPR em uma frequência de 100 MHz em rochas sedimentares (predominantemente de arenitos). Eixo vertical em tempo (no qual destacam-se algumas camadas, o contato com o lençol freático (linha azul) e um bloco delimitado por duas fraturas (linhas amarelas tracejadas). O retângulo negro pontilhado destaca a fotografia da Figura 6.

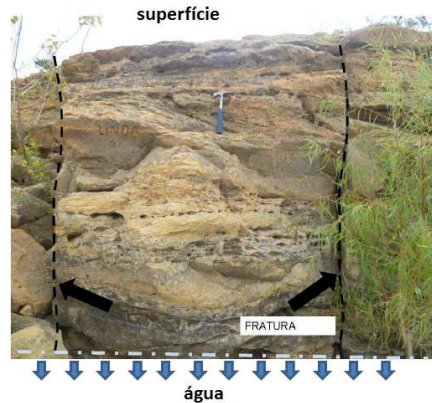


Figura 6: Corte adjacente à linha de aquisição de GPR (da Figura 5) onde é possível ver a mesma fratura identificada na seção de GPR da Figura 5.

## ARTE DA TERRA: Lago Assal



Terremotos e erupções vulcânicas são comuns em Djibuti, um pequeno país às margens do Golfo de Aden. Ele está em uma área tectonicamente ativa. A mesma tectônica relacionada à separação da África e da Península Arábica. Djibuti tem sua linha de costa cortada pelo Golfo de Tadjoura. Os montes Danakil constituem uma represa natural, separando o Lago Assal das águas marinhas do Golfo de Tadjoura. Esta represa impede que as águas do Golfo invadam o lago em epígrafe, pois este encontra-se 155 m abaixo do nível do mar.



## Fala da Terra

No verão as temperaturas podem chegar a 57 °C, fato que torna a região uma das mais quentes do mundo. Com a evaporação, sobretudo no verão, eleva-se sobremaneira a concentração de sais nas águas do lago. Não é raro observar leitos salgados de cintilantes cristais brancos. O contraste dos cristais de halita (sal) com os basaltos negros circunjacentes proporciona belíssimas fotos. Vale a pena visitar !!

### Referências

Bright, M., 2009 - 1001 Natural wonders you must see before you die.

Leinz, V. e Amaral, S. S., 2003 – Geologia Geral.

Yergin, D., 2003 – The prize. The epic quest for oil, money and power.

### Resposta ao Brincando de Explorador

Você deve ter achado uma velocidade em torno de 0,1 m/ns (metros por nanosegundos).