



IG | Instituto de Geociências

Recursos não convencionais de petróleo (óleo e gás) e seu potencial nas bacias sedimentares brasileiras

Prof. Carlos E. de Souza Cruz



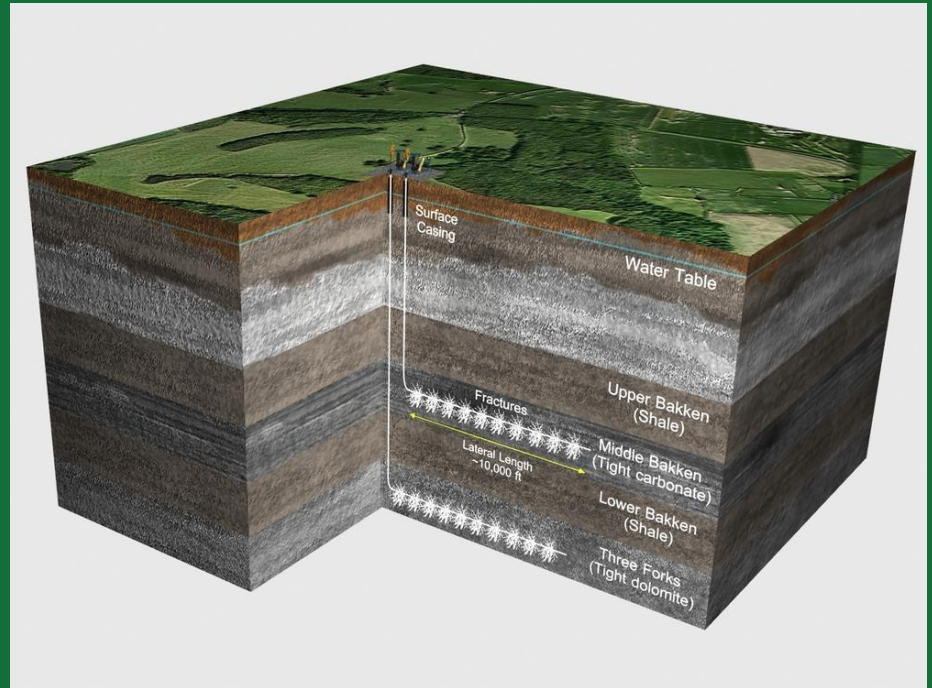
Empresa de Pesquisa Energética



AGENDA

- CONCEITOS GEOLÓGICOS
 - SISTEMAS PETROLÍFEROS NÃO-CONVENCIONAIS
- FRATURAMENTO HIDRÁULICO
 - CONCEITOS E EXEMPLOS DOS EUA
- BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS
 - PRÉ-CAMBRIANO
 - PALEOZÓICO
 - MESOZÓICO
- CONCLUSÕES

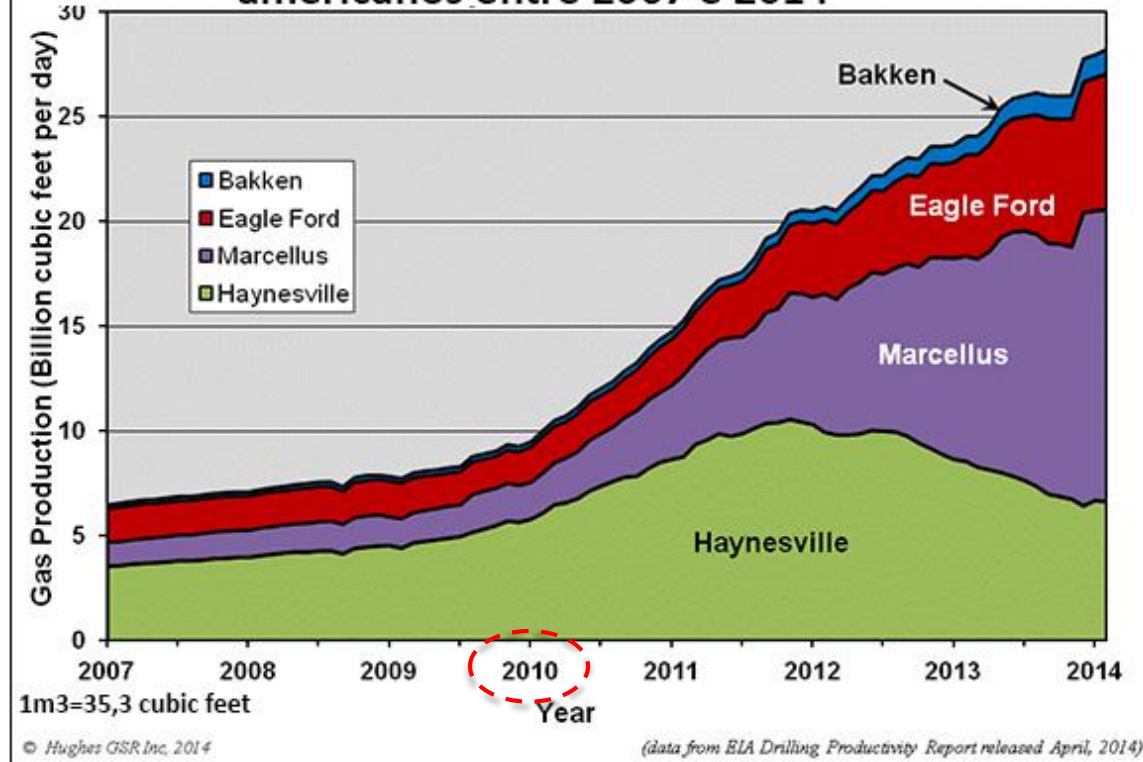
CONCEITOS GEOLÓGICOS



Reservatórios Não Convencionais

- São reservatórios com baixíssima permeabilidade que exigem estimulação para a produção de hidrocarbonetos.
- São recursos petrolíferos em que a tecnologia deve ser utilizada para aumentar a razão k/μ , para atingir taxas comerciais de fluxo. Onde a $k(\text{md})$ é aumentada pelo *fracking* e μ (cp) é diminuída pelo calor.
- Comum nos Estados Unidos, Canadá e atualmente no Reino Unido e Argentina, pouco difundida no Brasil, a exploração deste tipo de reservatório tem levantado novos desafios para a indústria e para a geologia.

Produção de gás dos folhelhos americanos entre 2007 e 2014

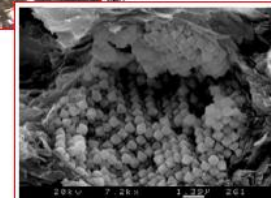
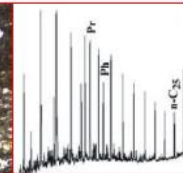
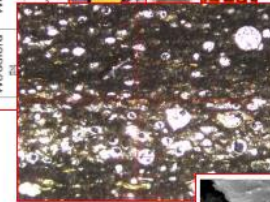
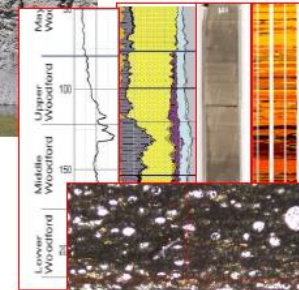
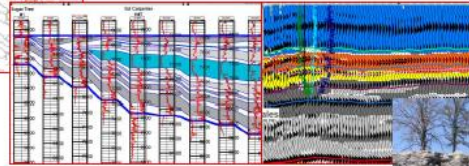
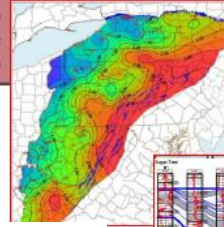
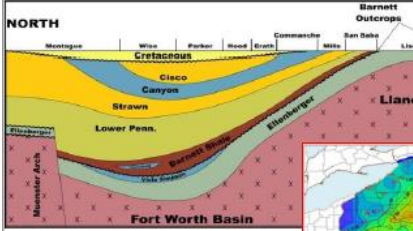


A produção de gás natural nos EUA a partir do *play* não convencional de gás, em 2010, era maior que 2,75 Tcf / ano. Em 2014 já havia triplicado este valor.

Recursos de óleo e gás não convencionais

- **Shale gas** (gás de folhelho), ocorre em folhelhos em diferentes estágios de maturação térmica, inclusive em folhelhos imaturos portadores de **gás biogênico**; podem ser rochas siliciclásticas, carbonáticas ou mistas (margas).
- **Shale oil** (óleo de folhelho), óleo natural encontrado em folhelhos em condições de maturação para óleo;
- **Oil shale** (folhelho betuminoso – erroneamente chamado de “**xisto betuminoso**”), rocha rica em matéria orgânica com baixo estágio de maturação térmica que pode gerar óleo após mineração e retortagem. (Ex.: Fm. Irati, Bc. do Paraná);
- **Tight gas sandstones** (arenitos gaseíferos fechados) encontrados nos centros das bacias sedimentares com baixíssimas permo-porosidades e portadores de gás;
- **Oil sand/Tar sand** (arenitos oleígenos), arenitos impregnados de óleo pesado/extra pesado (**Tar sand**) extraído in-situ por aquecimento ou processos pós-mineração.
- **Coalbed methane** (metano de carvão) compreende gás gerado e armazenado em camadas de carvões;
- **Gas hydrates** (hidratos de gás), são agregados de “clatratos”, cuja estrutura cristalina da água, similar ao gelo, tem capacidade de trapear gás (99% metano) de origem biogênica, estáveis a baixas temperaturas e altas pressões, formadas abaixo do assoalho oceânico (talude e bacia) e *permafrost* em regiões polares. As bacias de Pelotas e Foz do Amazonas tem as melhores ocorrências.

CARACTERIZAÇÃO MULTIESCALAR DOS RESERVATÓRIOS NÃO CONVENCIONAIS (Gás de folhelho (*gas shale*) e de arenitos fechados (*tight sandstone*))



Bacia

Regional

Subregional

Poço

Amostra

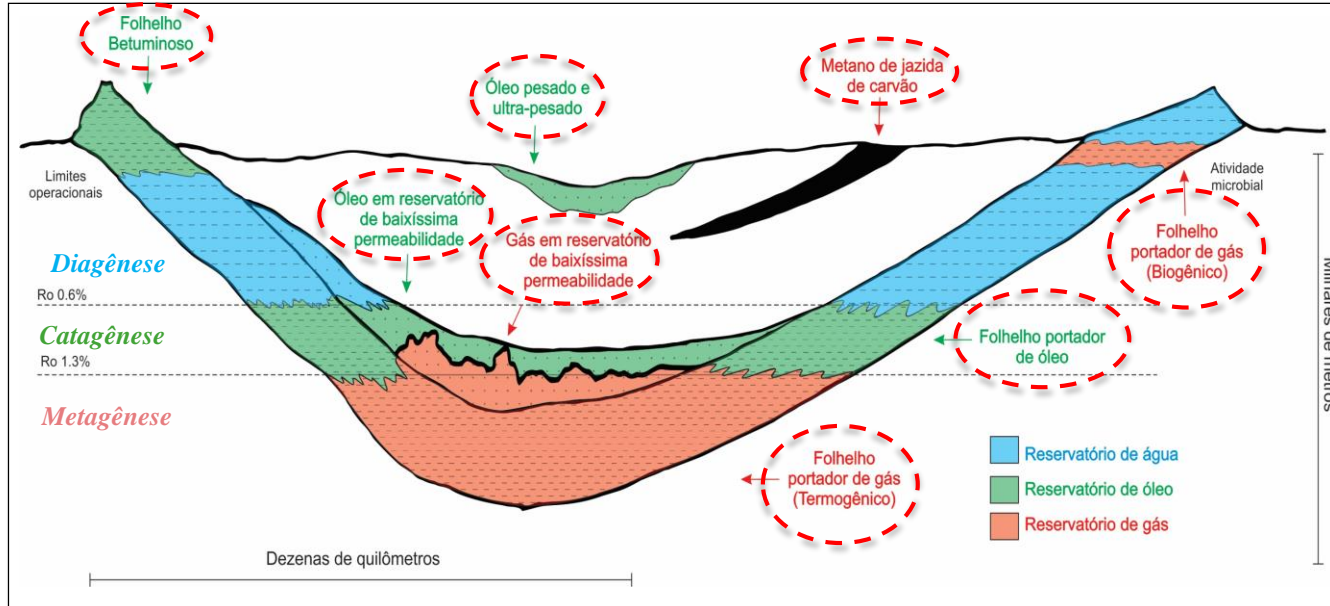
Poros



CONCEITOS GEOLÓGICOS

- Sistemas Petrolíferos Não-Convencionais

i) as permeabilidades são muito baixas; ii) a viscosidade do óleo é muito alta; iii) a matéria orgânica está imatura, iv) o hidrocarboneto encontra-se no estado sólido (Meckel, 2013)



Esquema com os principais sistemas petrolíferos não-convencionais. Notar que o tipo de fluido presente no reservatório está diretamente relacionado com a maturidade térmica da rocha geradora, atividade microbiana ou limites operacionais (mod. de Miranda, 2013).

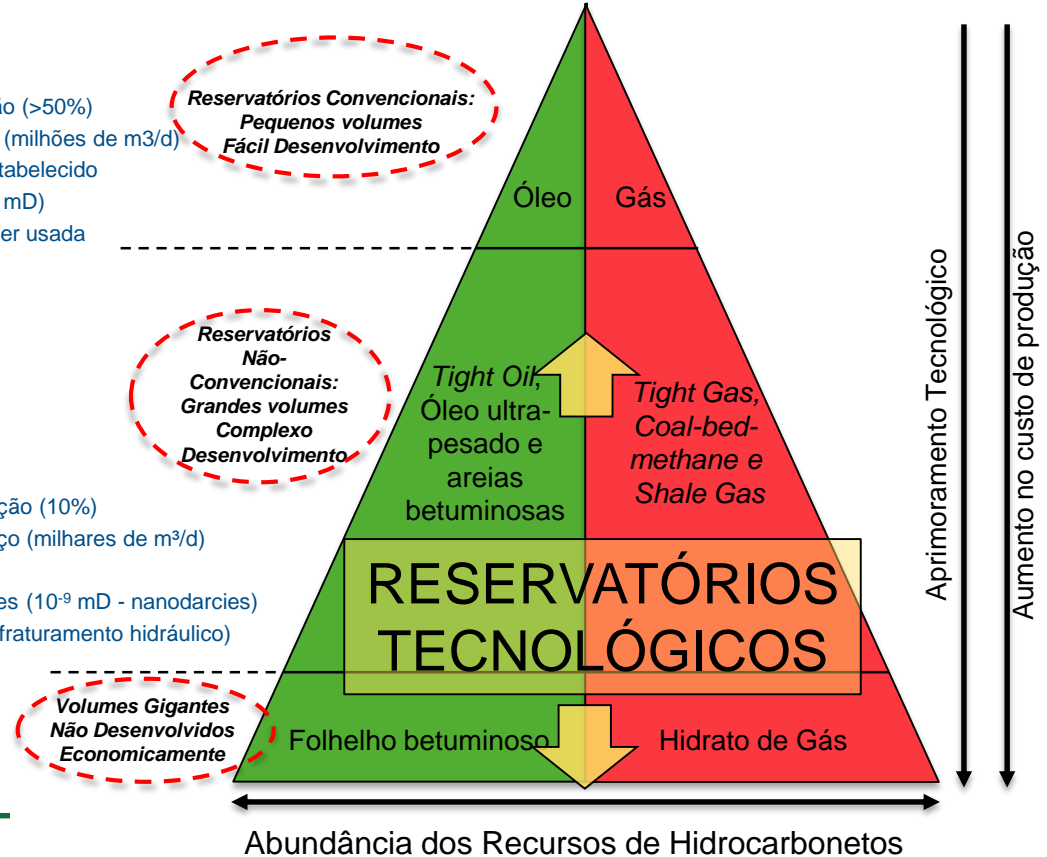
CONCEITOS GEOLÓGICOS

CONVENCIONAIS

- ▶ Volumes menores
- ▶ Menor investimento inicial
- ▶ Altos fatores de recuperação (>50%)
- ▶ Alta performance de poços (milhões de m³/d)
- ▶ Controle ambiental bem estabelecido
- ▶ Boa permeabilidade (100's mD)
- ▶ Estimulação pode ou não ser usada
- ▶ **Alto Risco Geológico**
- ▶ **Baixo Risco Economico**

NÃO-CONVENCIONAIS

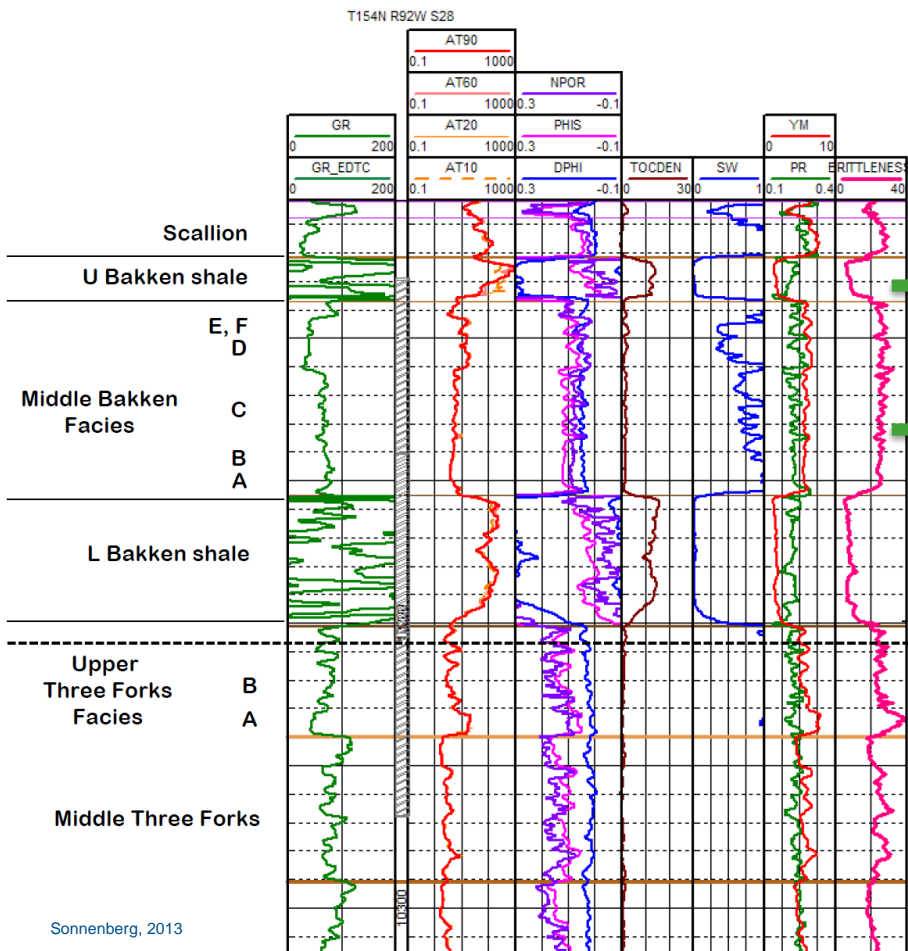
- ▶ Grandes Volumes
- ▶ Alto investimento inicial
- ▶ Baixos fatores de recuperação (10%)
- ▶ Baixa produtividade por poço (milhares de m³/d)
- ▶ Sensibilidade ambiental
- ▶ Baixíssimas permeabilidades (10⁻⁹ mD - nanodarcies)
- ▶ Estimulação é necessária (fraturamento hidráulico)
- ▶ **Baixo Risco Geológico**
- ▶ **Alto Risco Econômico**



CONCEITOS GEOLÓGICOS – Recursos Não-convencionais

► Sumário do Sistema Petrolífero – Modelo híbrido

- *The Oreo Cookie Model = Hybrid/Interbedded*



Sonnenberg, 2013



S

Source Rock

R

Reservoir Rock

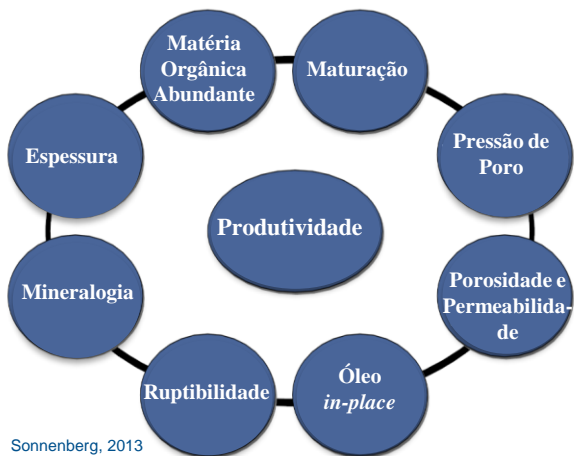
Bakken

| | |
|---------------------|-----------------|
| Age | Late Dev/Miss |
| Lithology | silt, dolostone |
| Depth | 9-10,000 ft |
| Thickness | 70 ft |
| Porosity | 5-10% |
| Perm | <0.1 md |
| TOC | 8-11 wt.% |
| Fractures | yes |
| Matrix contribution | yes |
| Spacing | 1280 |
| Oil Gravity | 42° |
| Pressure | Mod-High |
| Costs | \$8-10 MM |
| EUR (BOE) | 200-700 |



IG | Instituto de Geociências

CONCEITOS GEOLÓGICOS – Recursos Não-convencionais



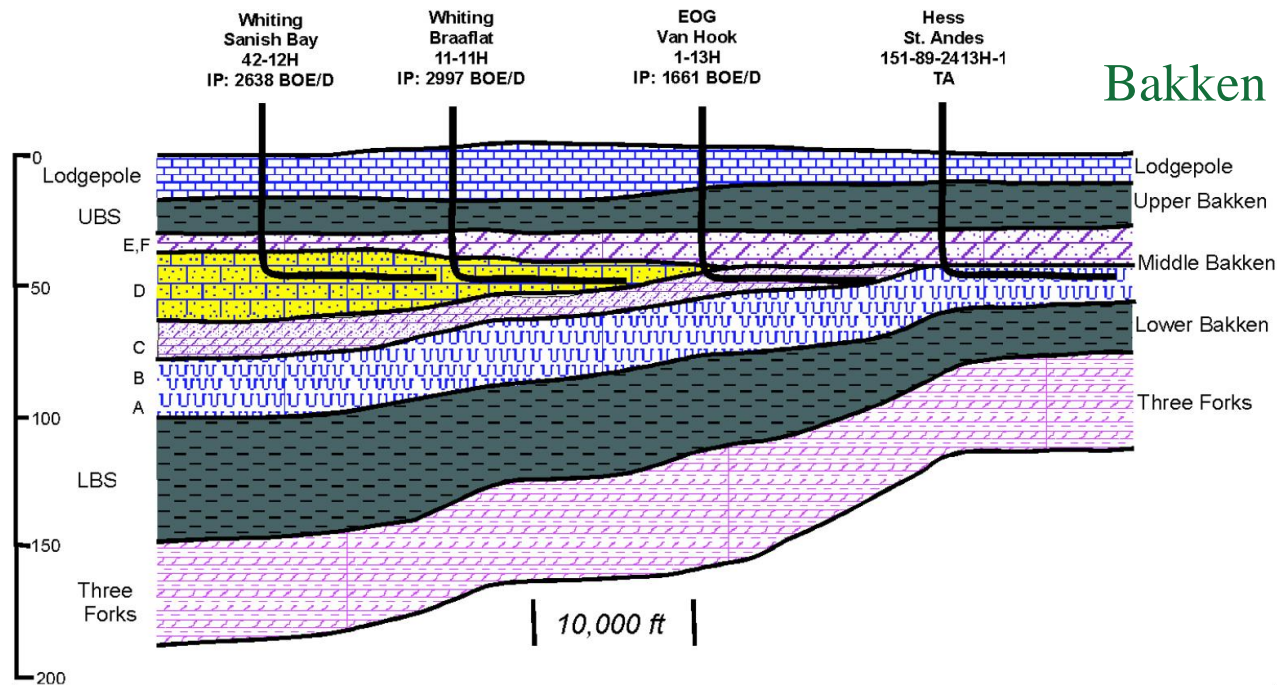
SWEET SPOT
(Melhor Combinação)



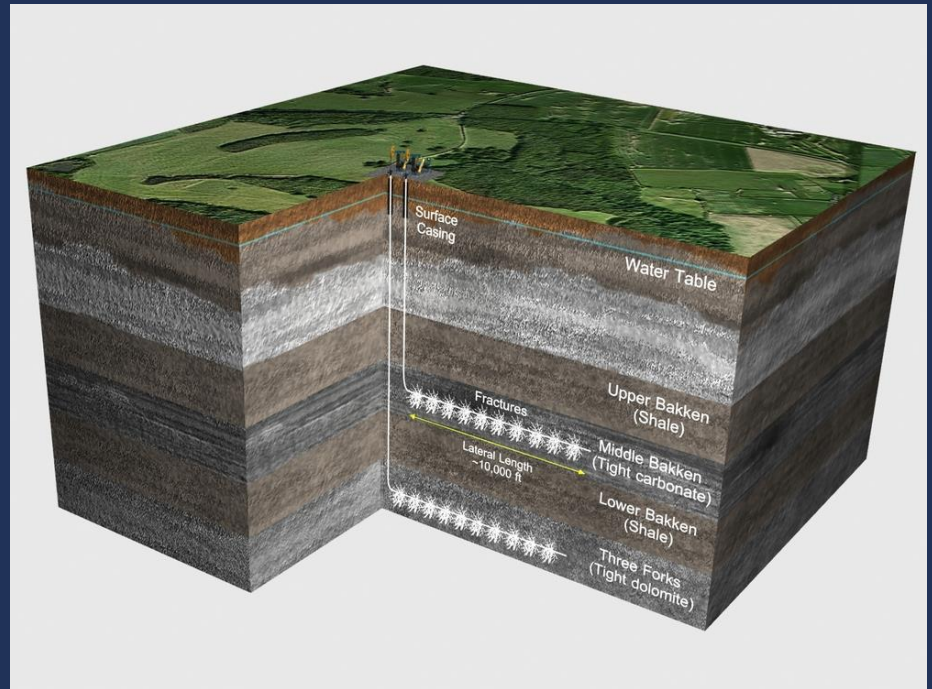
...como completar os poços



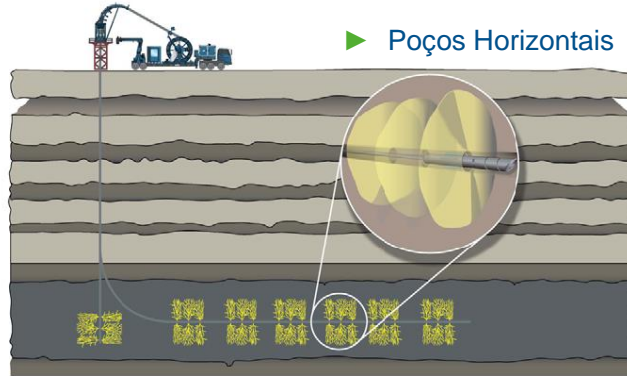
TECNOLOGIA DE RESERVATÓRIOS



FRATURAMENTO HIDRÁULICO



FRATURAMENTO HIDRÁULICO– Como?



Requisito de fluido para Frat. Hidráulico:
Exploração = 300 m³ - 3.000 m³ (1-2 estágios)
Desenvolv. = 3000 m³ - 15.000 m³ (10 estágios)

Requisito de Transporte:
Exploração = 25- 200 *truck trip* (1-2 estágios)
Desenvolv. = 250- 1000 *truck trip* (10 estágios)

Fluido de Retorno (*flowback*): (10 – 50%)
Exploração = 30 m³ – 1.500 m³ (1-2 estágios)
Desenvolv. = 300 m³ – 7.500 m³ (10 estágios)



FRATURAMENTO HIDRÁULICO– *Proppant* & Seleção de Fluidos

- ▶ Benefícios de longo prazo: custos mais altos = melhor Recuperação Final



Ottawa



Low Density

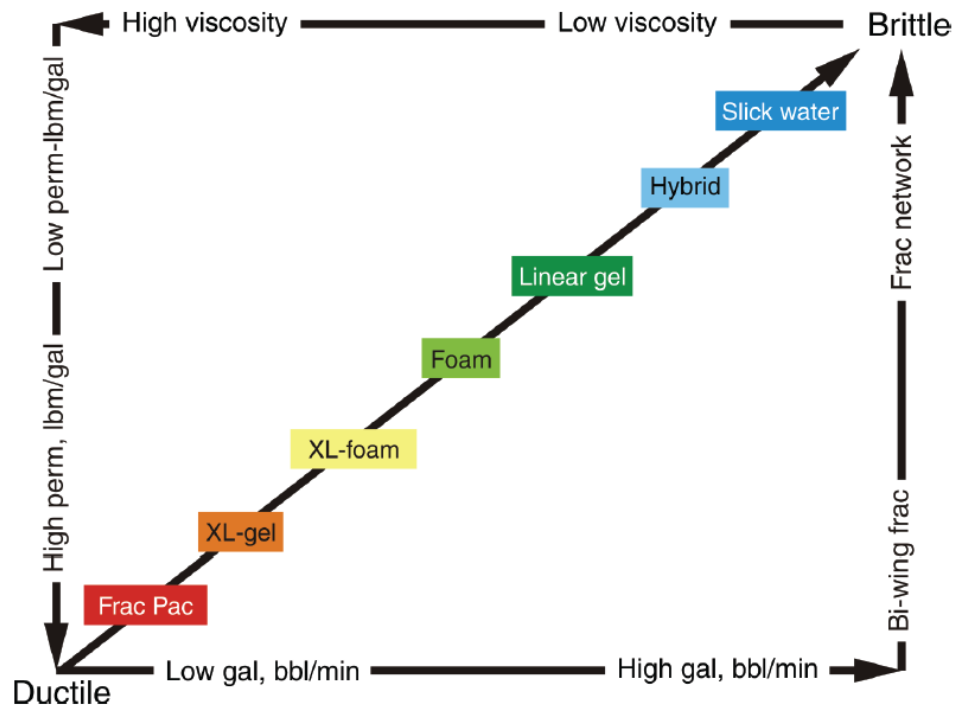


Resin Coated



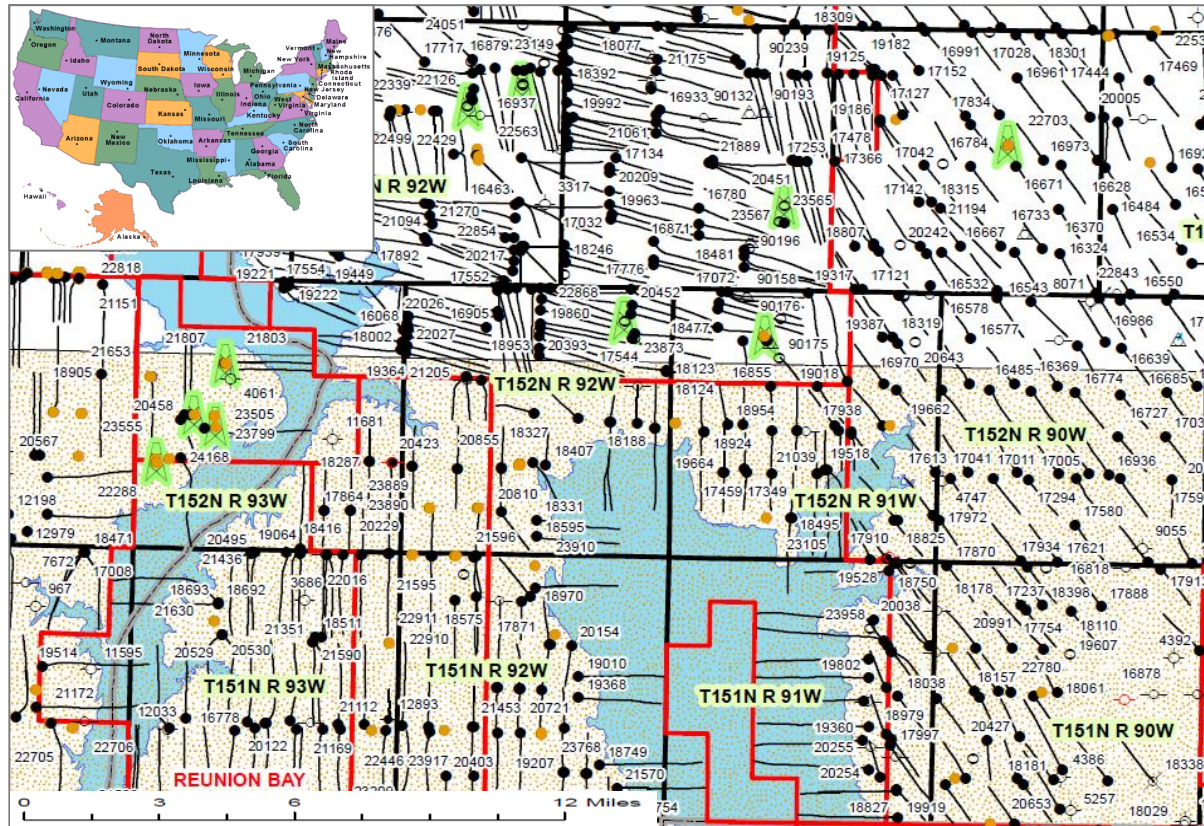
Bauxite

Fig. 4—Common industrial proppants used in hydraulic fracturing to maintain fractures.



Como?

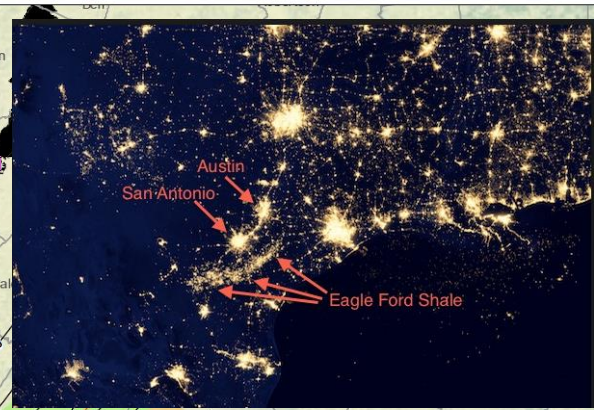
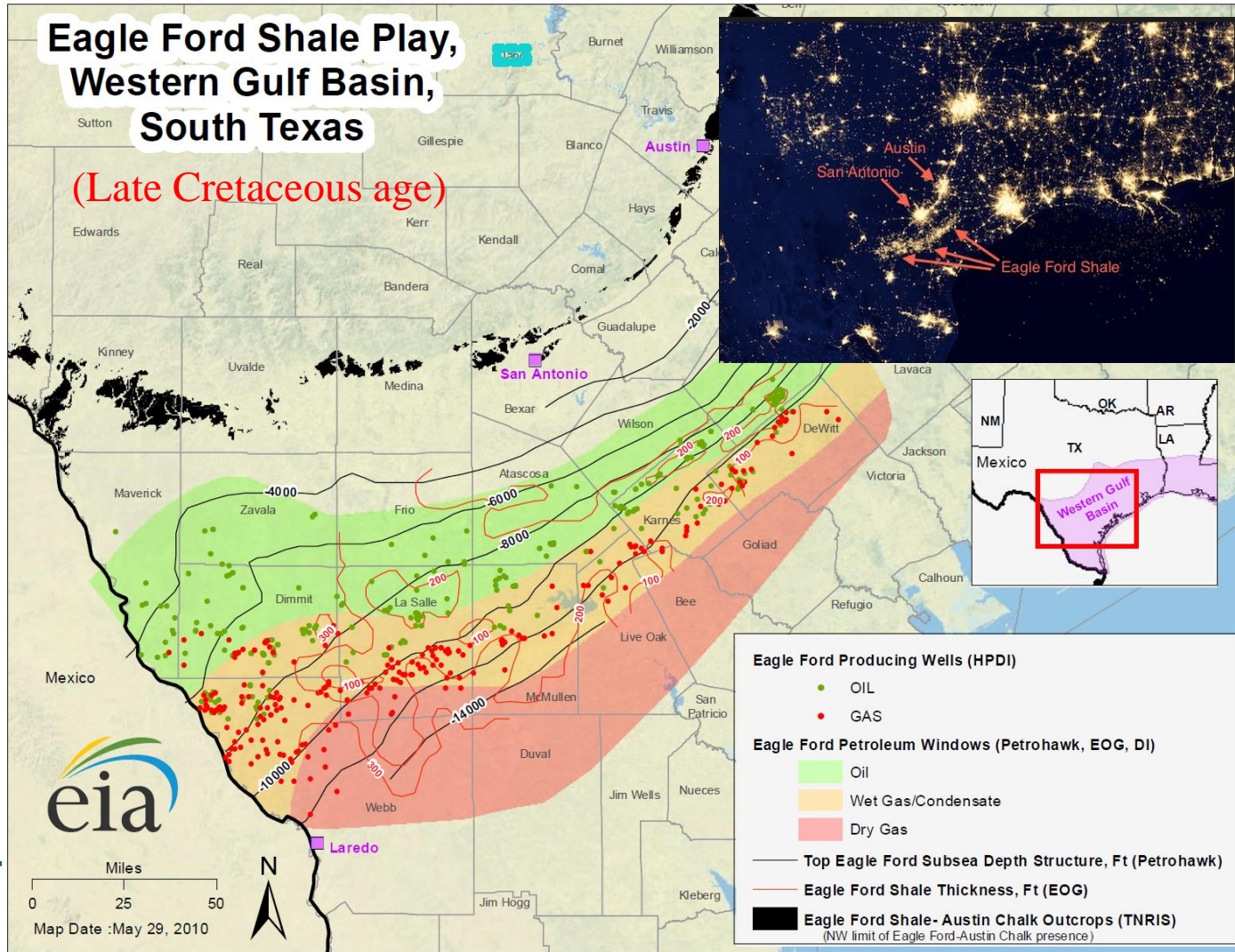
► Bakken Play - mapa de poços



Dakota Industrial Commission, Department of Mineral Resources, Oil and Gas Division, 2012

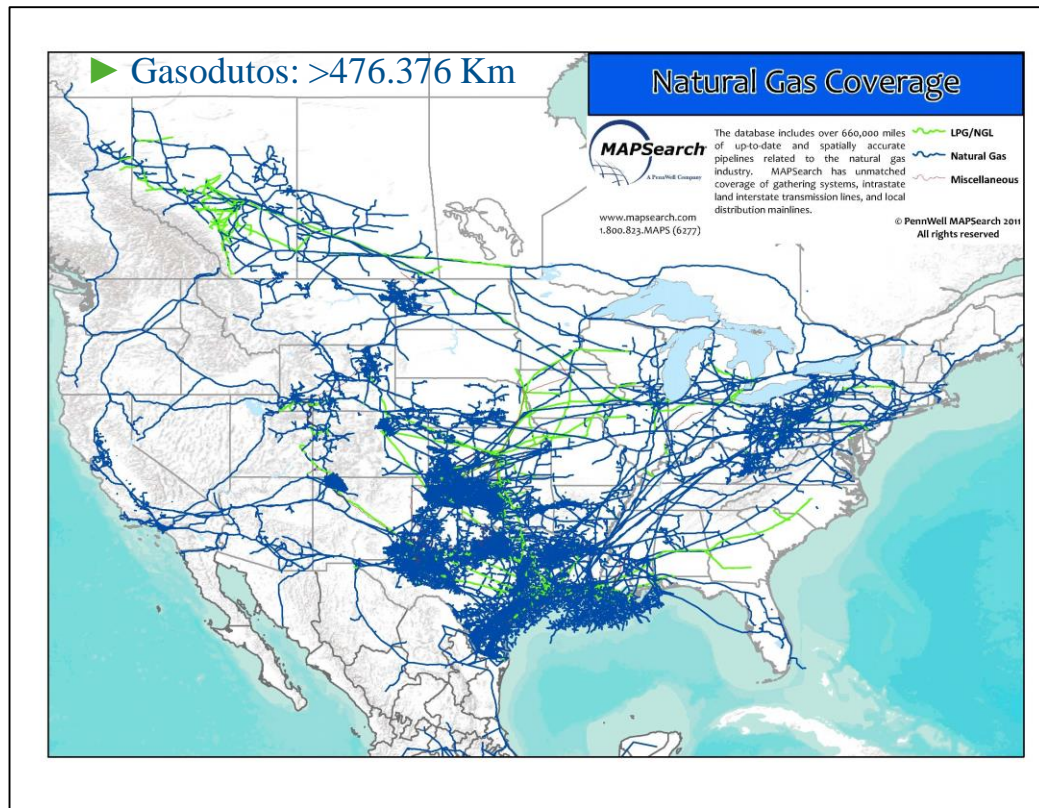
Eagle Ford Shale Play, Western Gulf Basin, South Texas

(Late Cretaceous age)



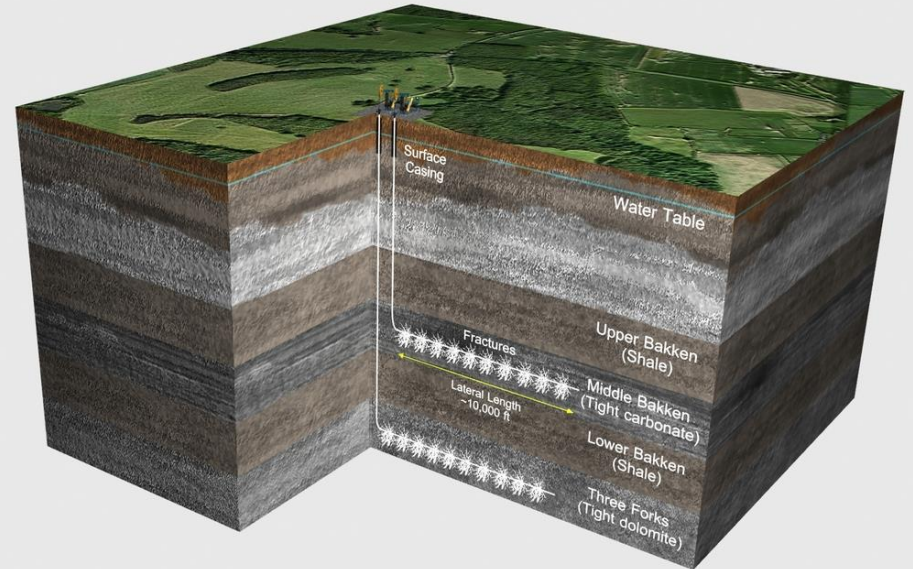
FRATURAMENTO HIDRÁULICO – Alcançar Resultados Economicos

- Infraestrutura é um parâmetro chave para o sucesso

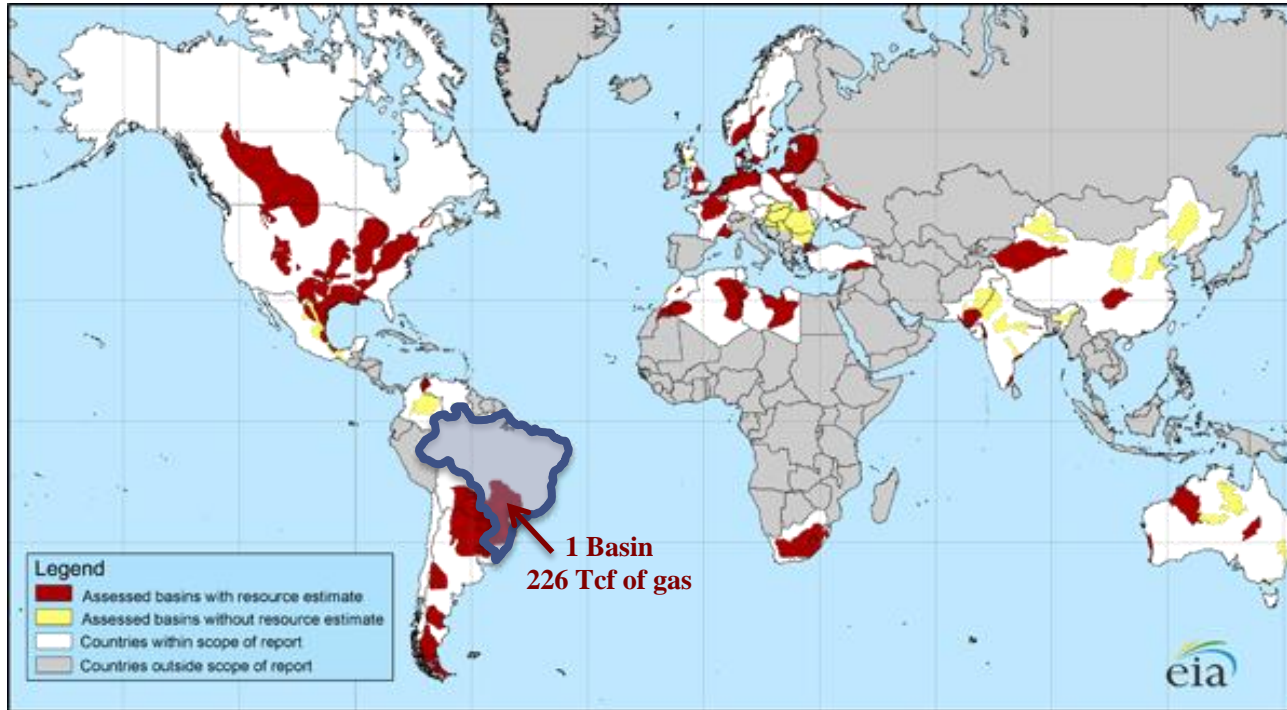


Fonte: ANP, 2013.

BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS



Estimativa de Recursos



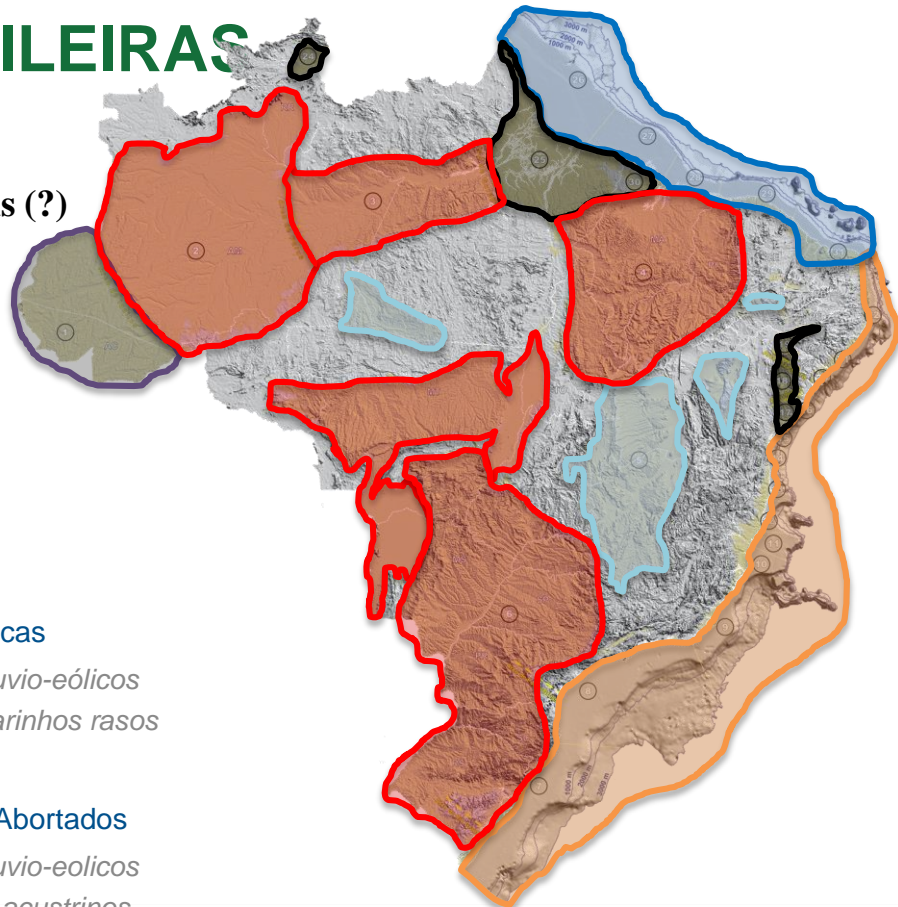
Mod. de World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States EIA, 2011.

BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS

- Margem Extensional Meso-Cenozóica
- Margem Transformante
- Riftes Mesozóicos Abortados
- Foreland Andino
- Bacias Policíclicas
- Sinéclises Paleozoicas

Reservas não-convencionais (?)

| BASIN | Tcf |
|---------------|------------|
| Parnaíba | 64 |
| Parecis | 124 |
| Recôncavo | 20 |
| São Francisco | 80 |
| Paraná | 226* |
| TOTAL | 514 |



Reservas Convencionais:

► Margem Extensional Meso-Cenozóica

1. Turbiditos Meso-cenozoicos
2. Carbonatos Aptiano/Albiano
3. Microbiolitos do "Pre-sal"

► Margem Transformante

1. Reservatórios Fraturados(?)

► Sinéclises Paleozoicas

1. Arenitos Fluvio-eólicos
2. Arenitos marinhos rasos

► Riftes Mesozóicos Abortados

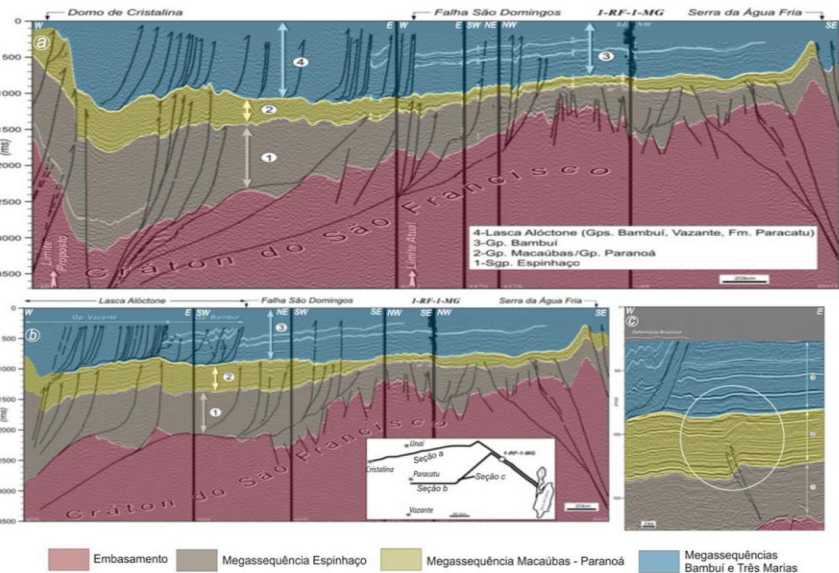
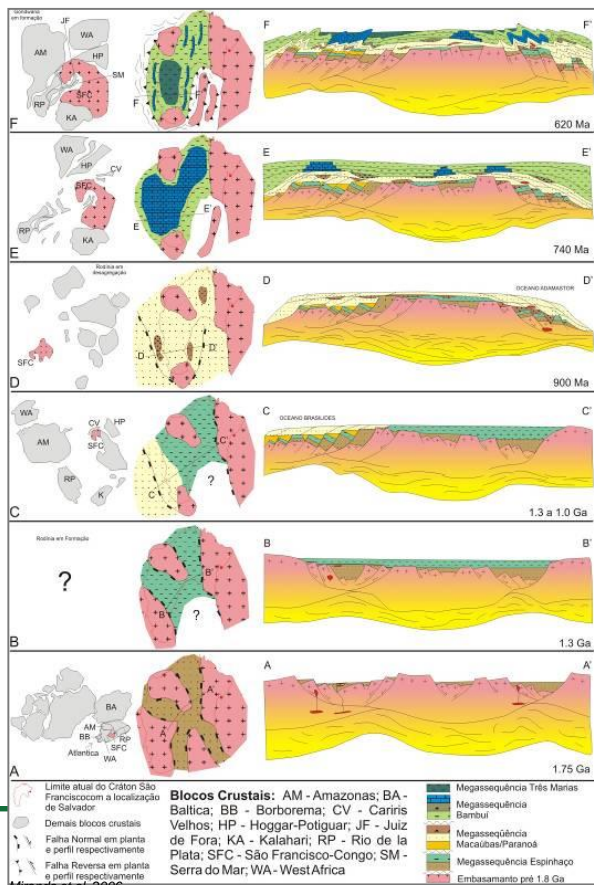
1. Arenitos Fluvio-eolicos
2. Turbiditos Lacustrinos

Mod. de Bacias Sedimentares Brasileiras Cartas Estratigráficas:
Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15, 2007

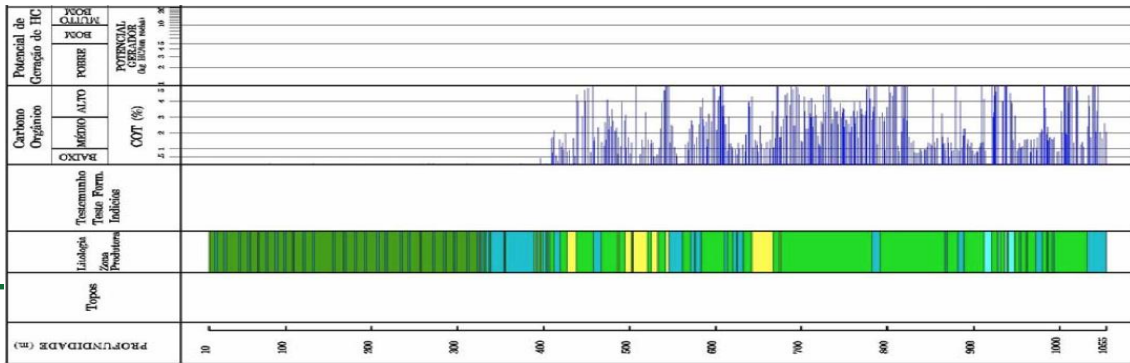
- BACIA DO SÃO FRANCISCO



- **Neoproterozoico (Marinho)**
- **Espessura – ?**
- **TOC – 0.5 a 15%**
- **Ro – Senil**
- **Prof. Média – 1000m ?**



Modified from Romeiro-Silva & Zalán, 2005



SISTEMAS PRECAMBRIANOS

• BACIA DO PARECIS



| Geocron. | Litoestratigrafia | | Evolução tectônica | Ambiente deposicional |
|---|-------------------------|----|----------------------|------------------------|
| Período | NW | SE | | |
| Terciário | Fm. Araguaia | | Fluvial | Fluvial/ Eólico |
| Cretáceo | Fm. Parecis | | | |
| Jurássico | Fm. Anari | | Eólico | Eólico |
| | Fm. Rio Ávila | | | |
| Triássico | Fm. Fazenda Casa Branca | | Fluvial/ Eólico | Lacus-trino |
| Permiano | | | | |
| Carbonífero | Fm. Pimenta Bueno | | Supramarino Néfitico | Glacial |
| | | | | |
| Devoniano | Fm. Ponta Grossa | | Marinho | Leque Abaxial/ Marinho |
| | Fm. Furnas | | | |
| Siluriano | Fm. Cacoal | | Marinho | Raso |
| | | | | |
| Neoproterozóico (Ribeirão/Vendiano) | Gr. Alto Paraguai | | Sinéclise | Marinho raso |
| | Gr. Caiabá | | | |
| Proterozóico Inferior Médio ao Arqueano | | | Sinéclise | Fluvial |
| | | | | |

Modificado de: Boletim de Geociências da Petrobras, no. 1, vol. 8, 1994.



► Folhelho Sepotuba

► Neoproterozóico (Marinho)

- Espes. – ?
- TOC – ?
- Ro – ?
- Prof. – ?

► Folhelho Ponta Grossa

► Devoniano (Marinho)

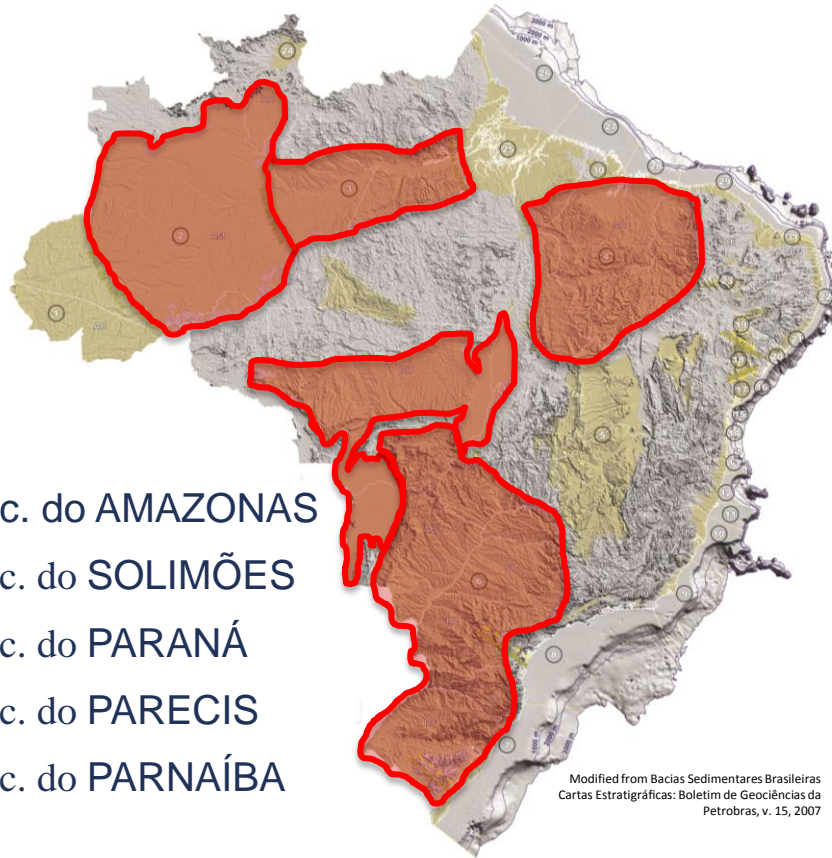
- Espessura – ?
- TOC – ?
- Ro – ?
- Prof. – ?



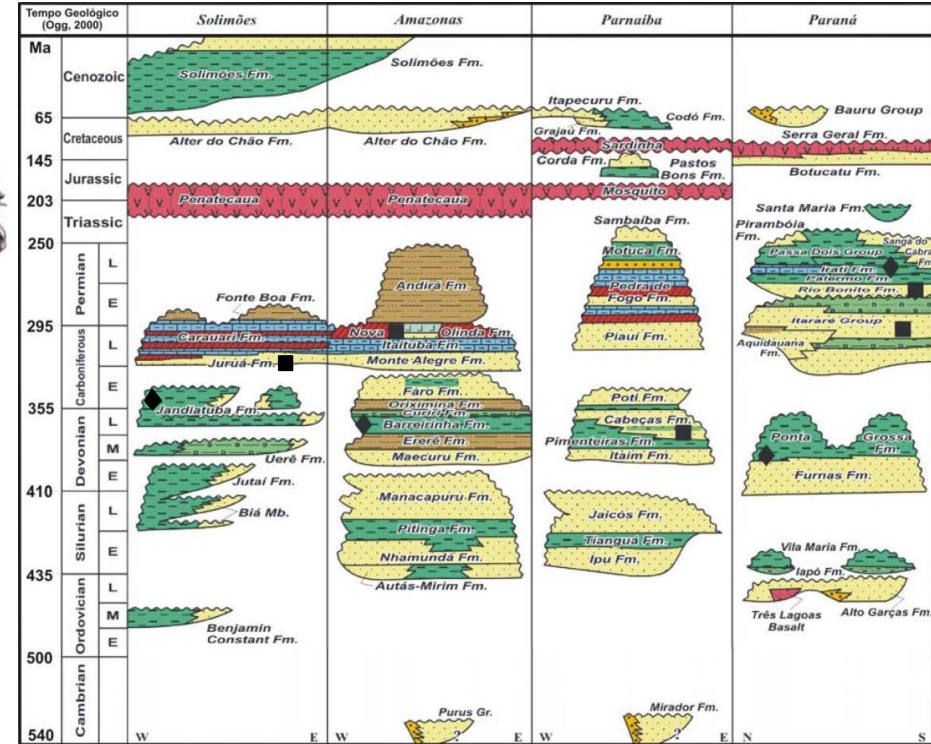
SISTEMAS PALEOZOÍCOS

► >2.680.000 Km² (31,5% do território brasileiro)

- Bc. do AMAZONAS
- Bc. do SOLIMÕES
- Bc. do PARANÁ
- Bc. do PARECIS
- Bc. do PARNAÍBA



Modified from Bacias Sedimentares Brasileiras
Cartas Estratigráficas: Boletim de Geociências da
Petrobras, v. 15, 2007



SISTEMAS PALEOZÓICOS

• BACIA DO PARANÁ

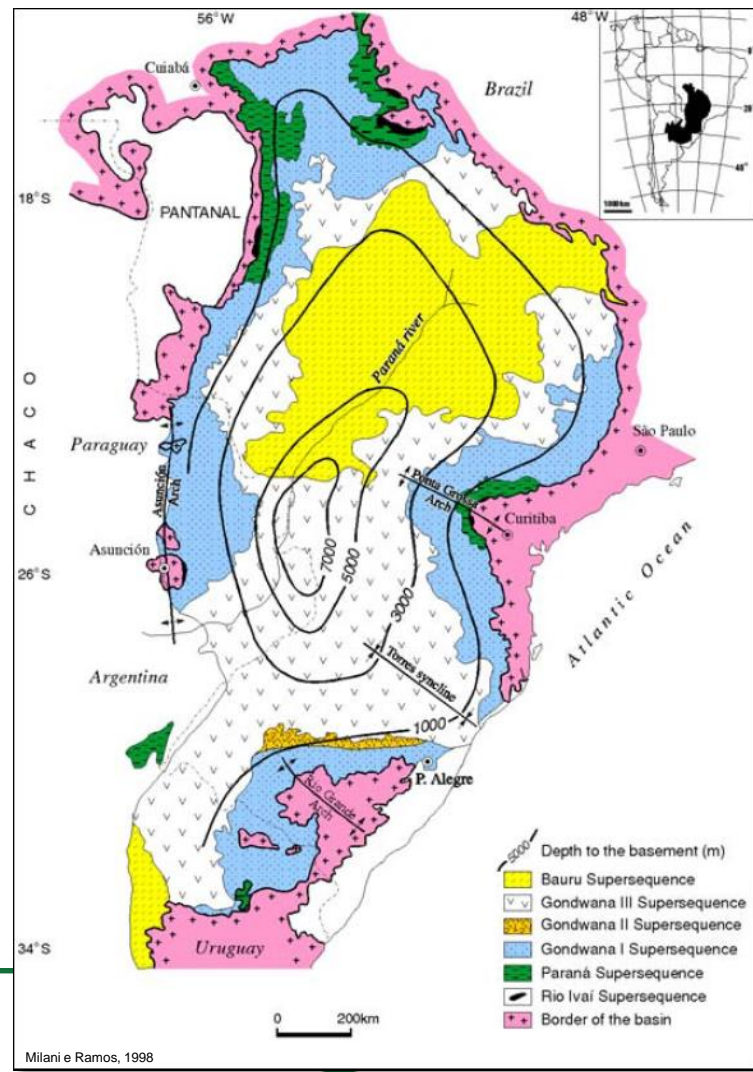
► Folhelho Ponta Grossa

- Devoniano (Marinho)
- Espessura – 70m
- TOC – 3% (Tipo II)
- Ro – Imaturo a senil
- Prof. média – 3000m
- Efeito das intrusões magmáticas + soterramento



► Folhelho Irati

- Permiano (Marinho/Lacustrino)
- Espessura – 70m
- TOC – 8 a 13% (até 24% - Tipo I)
- Ro – imaturo a senil
- Prof. média – 2300m
- Efeito das intrusões magmáticas
- 60+ anos de Pirólise do folhelho betuminoso (Oil Shale Pyrolysis)
- 2.2 Milhões de ton/ano de folhelho (+tires recycling)
- Produção Média 6.000 boe/dia

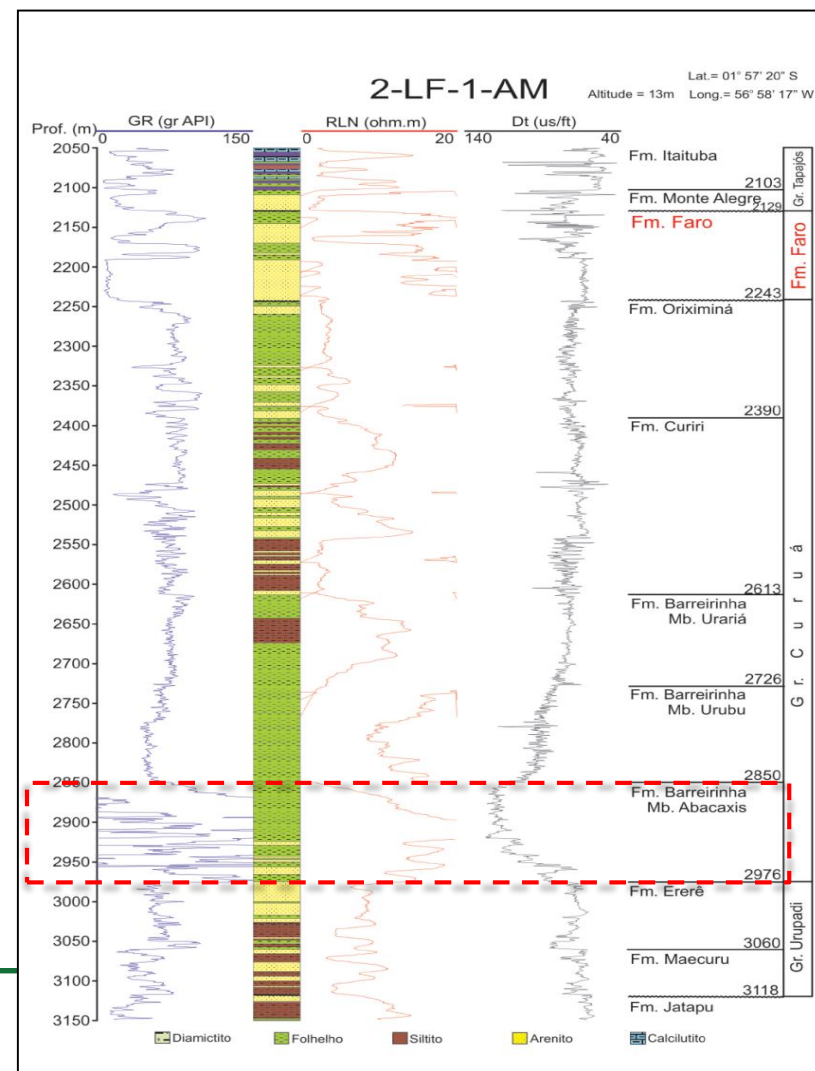
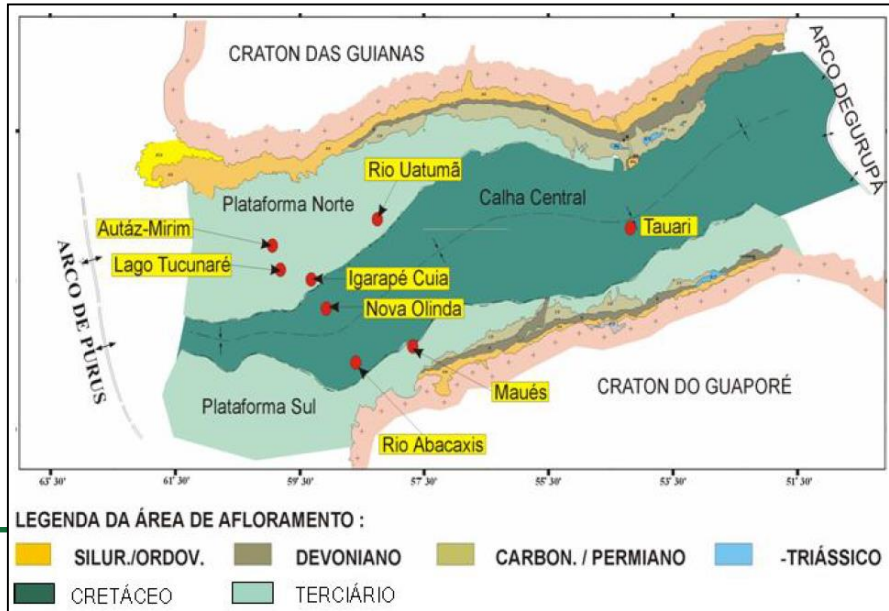


SISTEMAS PALEOZÓICOS

• BACIA DO AMAZONAS

► Folhelho Barreirinha

- *Devonian Superior (Marinho)*
- *Espessura – 30 a 60m*
- *TOC – 3 a 8% (Tipo II)*
- *Ro – Maturo a senil*
- *Prof. média – 2750m*

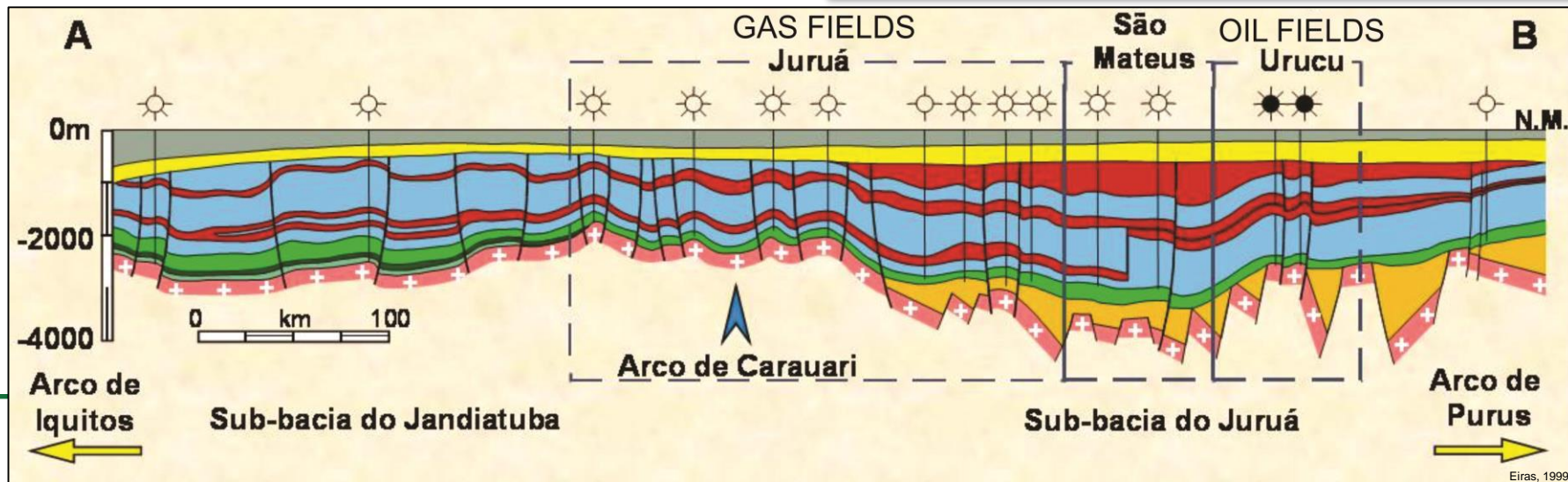
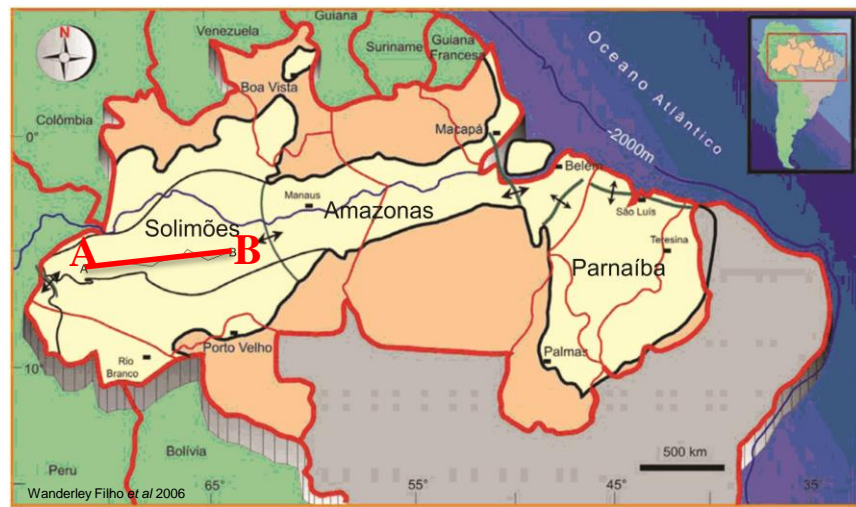
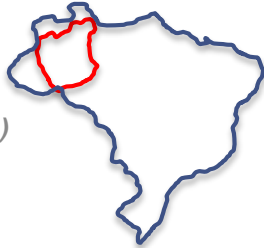


SISTEMAS PALEOZÓICOS

• BACIA DO SOLIMÕES

► Folhelho Jandiátuba

- *Devonian Superior (Marinho)*
- *Espessura – 40m*
- *TOC – 4 a 8% (Tipo II)*
- *Ro – Maduro to senil*
- *Prof. média – 2300m*
- *Efeito das intrusões magmáticas (acima)*



SISTEMAS PALEOZÓICOS

• BACIA DO PARNAÍBA

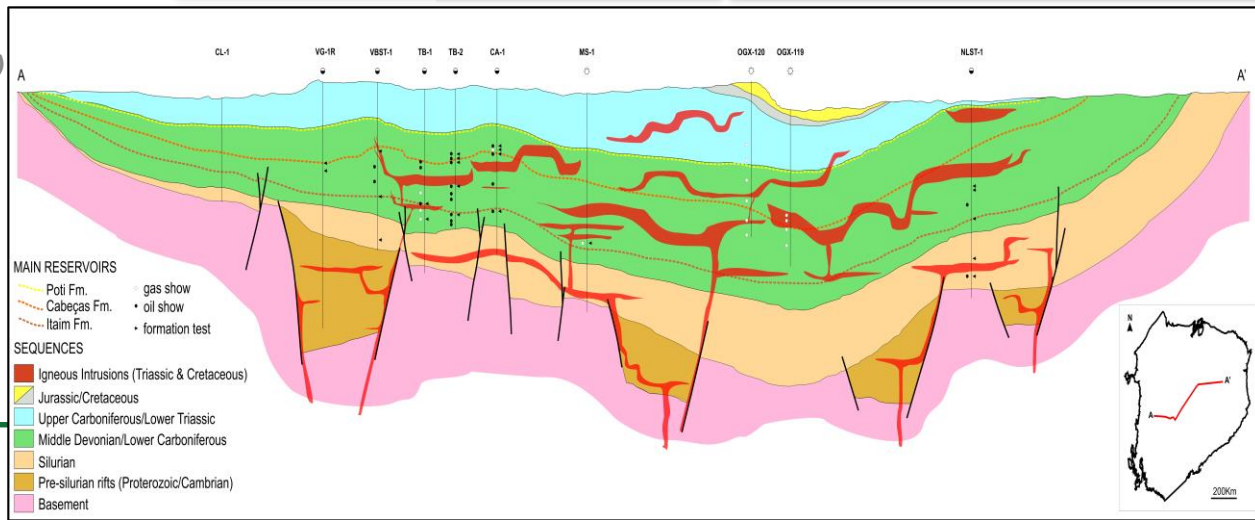
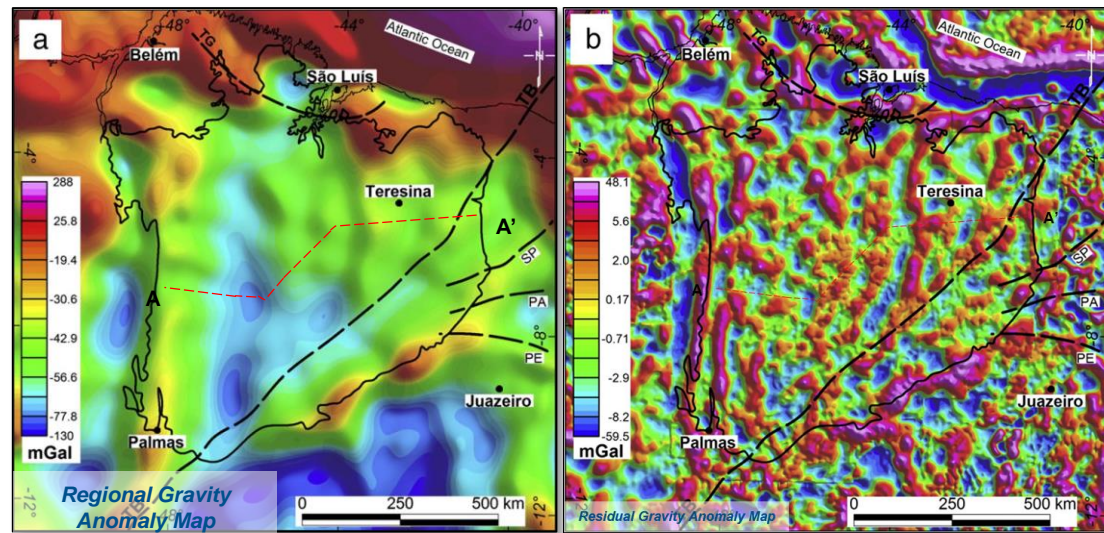


► Folhelho Pimenteiras

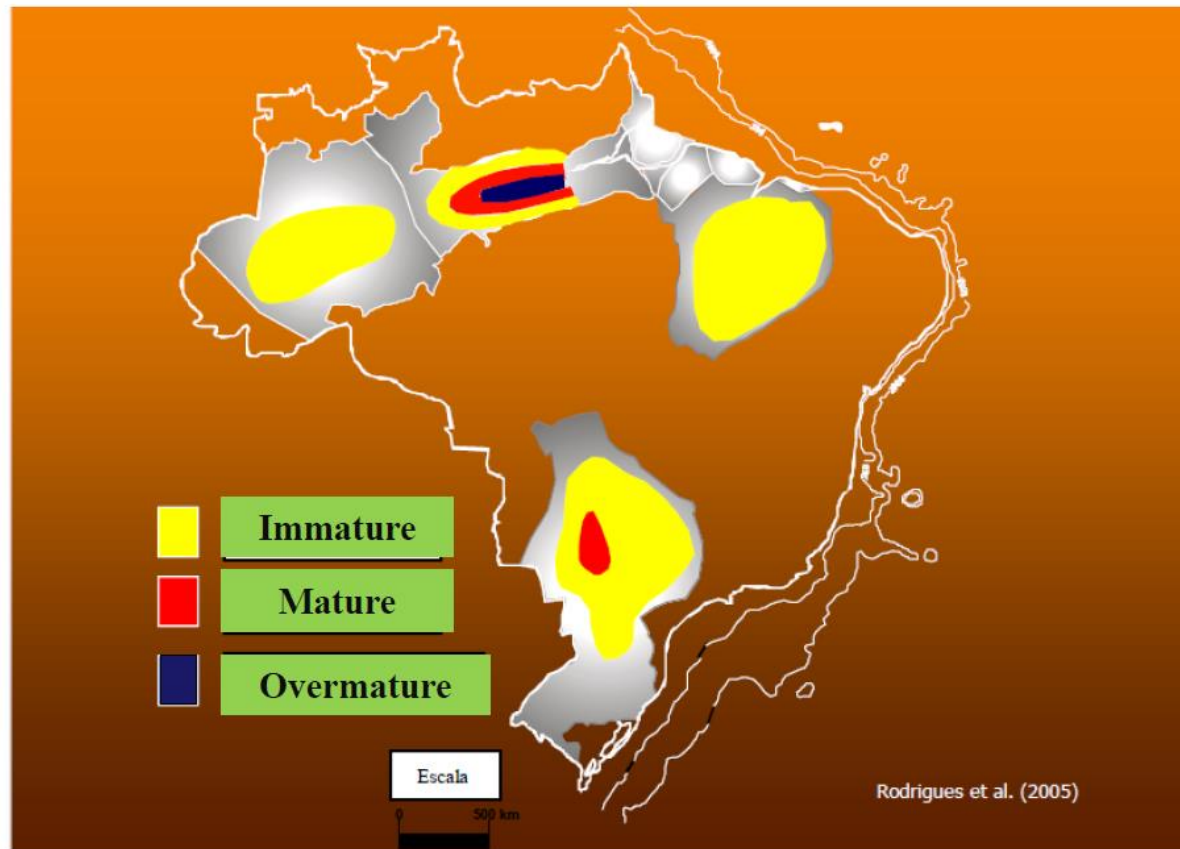
- Devonian Médio/Superior (Marinho)
- Espessura – 200m (40m rico em MO)
- TOC – 0,5 a 5% (Tipo II e III)
- Ro – maturo a senil
- Prof. média – 2000m
- Efeito das intrusões magmáticas

► Folhelho Codó (MESOZÓICO)

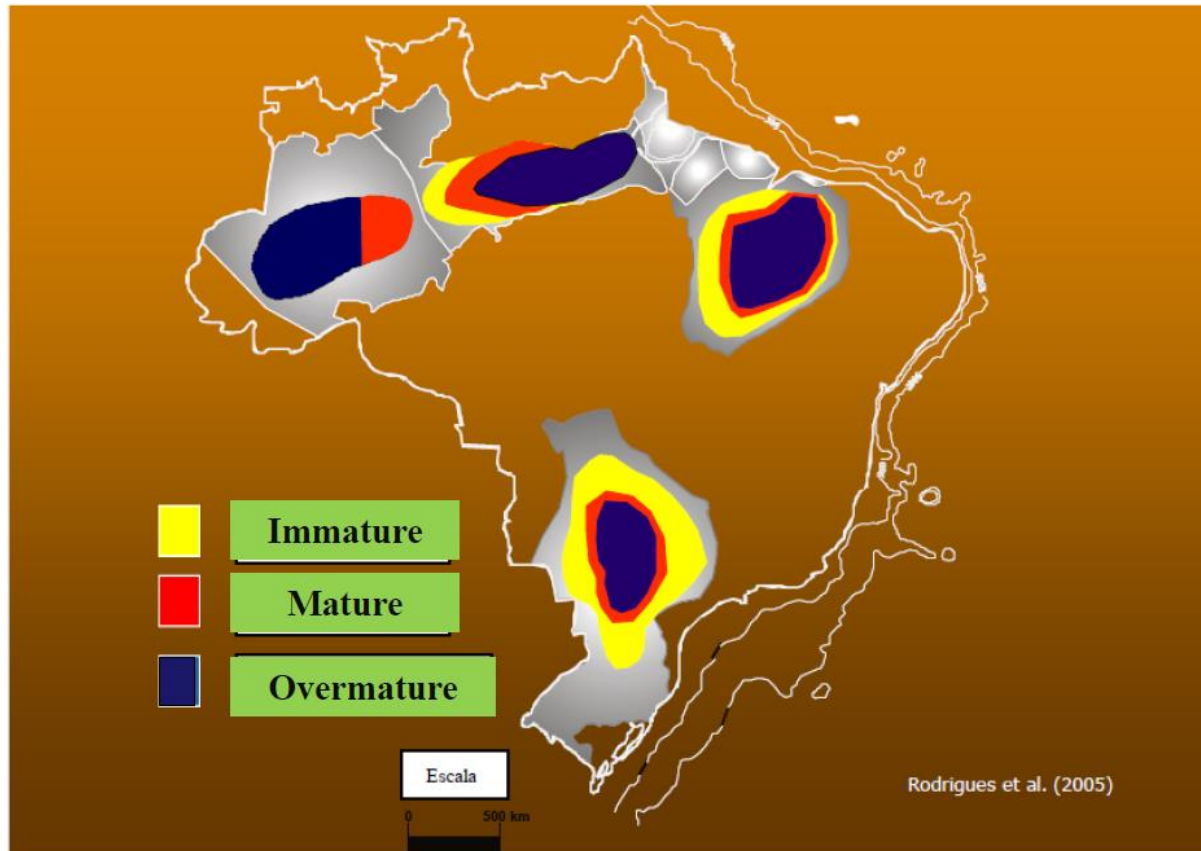
- Aptiano/Albiano (Lacustrino Salgado)
- Espessura – 180m
- TOC – 2 a 27% (Tipo I)
- Ro – imaturo
- Prof. média – 700m



Bacias Paleozóicas - maturação das rochas geradoras sem o efeito das rochas ígneas intrusivas



Bacias Paleozóicas - maturação das rochas geradoras com o efeito das rochas ígneas intrusivas



SISTEMAS MESOZÓICOS

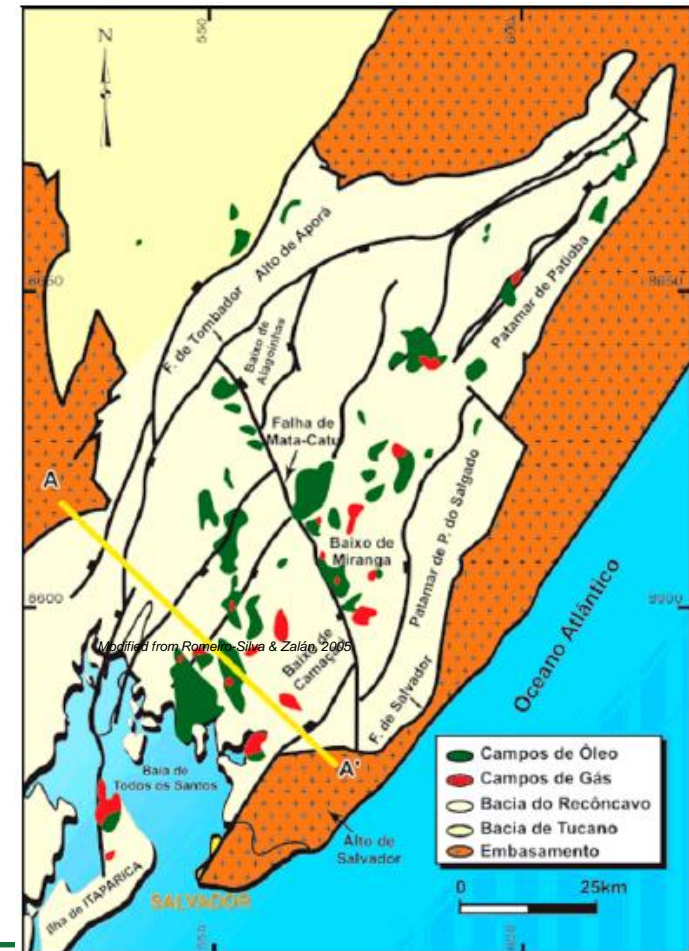
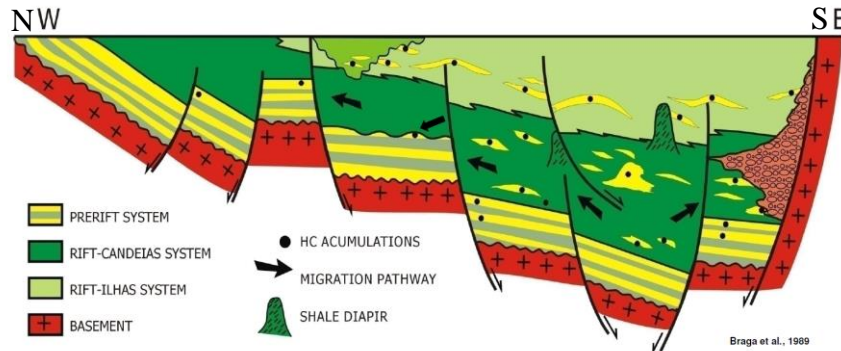
- BACIA DO RECÔNCAVO

- ▶ Folhelho Candeias

- *Cretáceo Inferior (Lacustrino)*
- *Espessura – até 1850m*
- *TOC – 1-2% (Tipo I)*
- *Ro – Imaturo a Maturo*
- *Prof. média – 1500m (variável)*
- *Produtor de óleo em folhelho fraturado (Campo de Candeias) e gás em “tight sand”*
- *Convencional desde 1937 (1º. campo de óleo brasileiro)*



Modelo Generalizado de Acumulações Trapeamento e Migração

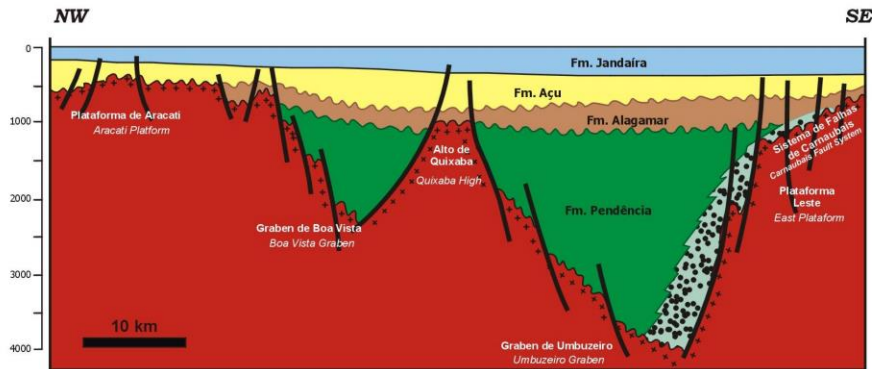


SISTEMAS MESOZÓICOS

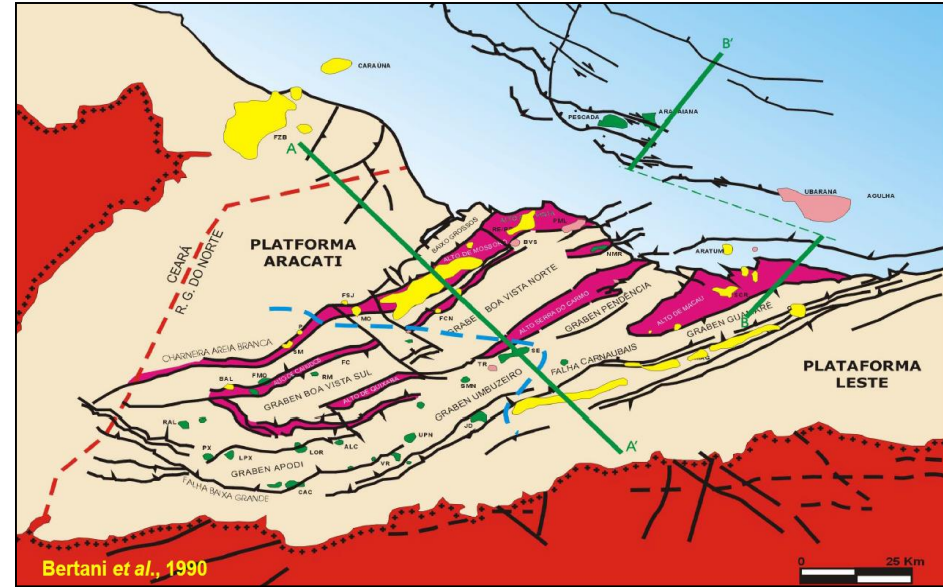
- BACIA POTIGUAR

- ▶ Folhelho Pendência

- *Cretáceo Inferior (Lacustrine)*
 - *Espessura – até 6500m*
 - *TOC – 4% (Tipo I e II)*
 - *Ro – Imaturo a Maturo*
 - *Prof. media – 2000m (variável)*



Bertani et al., 1989



Bertani et al., 1990

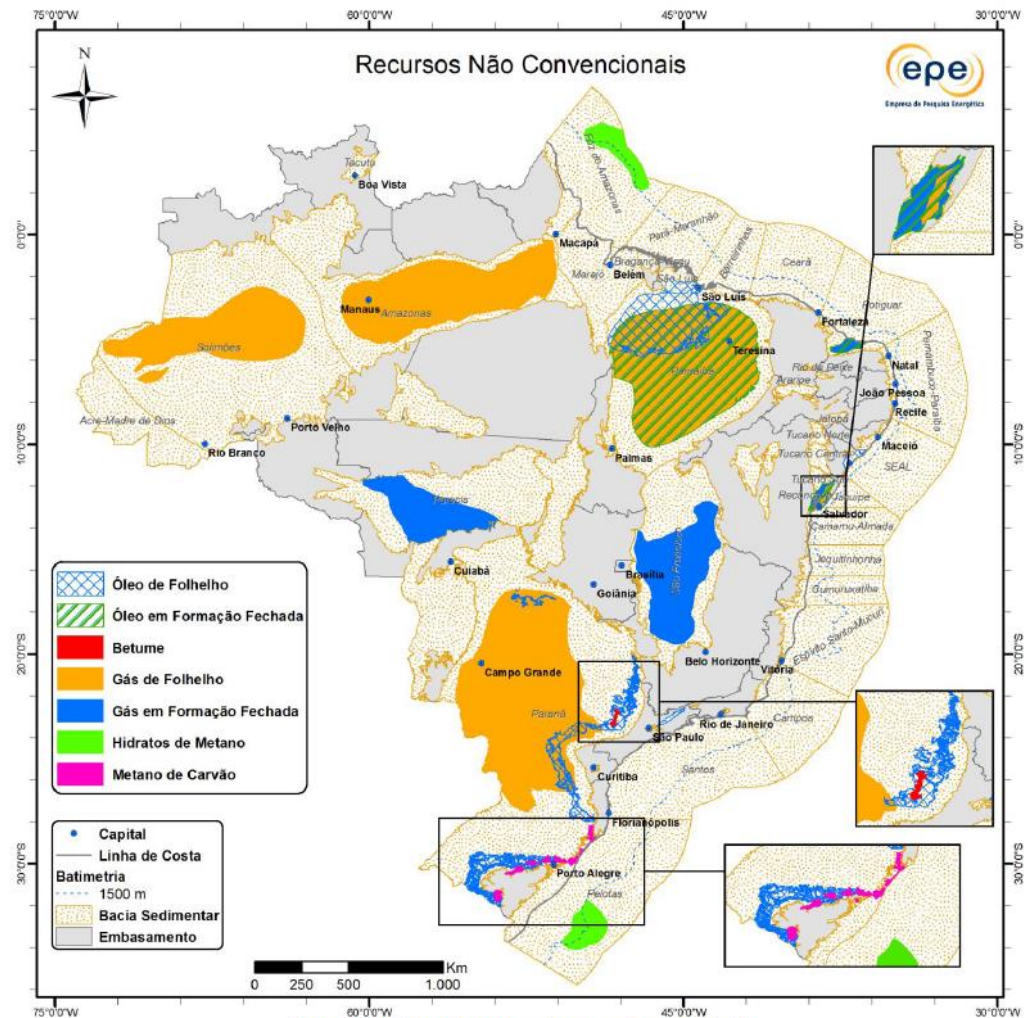


Figura 2. 555: Plays de recursos não convencionais no Brasil.

Potencial de exploração de recursos petrolíferos não convencionais no Brasil

- **Bacias Pré-cambrianas** (São Francisco e Parecis), rochas “anchimetamórficas” que, apesar de possuir bom COT, o índice de hidrogênio (IH) é inexpressivo ou inexistente. As ocorrências de gás são muito ricas em nitrogênio e possivelmente de origem mantélica, fraturamento hidráulico (*fracking*) quase impossível.
- **Bacias Paleozoicas** (área > 2,5 milhões de Km²) permanecem ainda incertas. As bacias do Paraná e do Parnaíba alcançaram maturidade térmica devido à intrusão de soleiras em contato com a rocha geradora. Nas bacias do Solimões e Amazonas, também ocorreu a maturidade devido à intrusão de soleiras sobrejacentes (400m acima). Seria interessante testar os *plays* Irati e Codó para gás biogênico.
- Devido ao abrupto aquecimento pelas intrusivas (1000 °C), a capacidade de adsorção do gás pelo querogênio parece diferir das rochas soterradas lentamente. Necessita ser testado.
- **Bacias do Recôncavo e Potiguar**, há um potencial comprovadamente moderado para *tight gas sandstones*.
- **Bacias do Recôncavo e Potiguar** e talvez em **Sergipe-Alagoas**, há, comprovadamente, potencial significativo para *shale gas* e *shale oil*.
- Nas outras bacias, por problemas operacionais (infraestrutura, quantidade de dados, etc.), é altamente improvável um aproveitamento econômico a curto e médio prazo.

Acumulação de gás de Barra Bonita, PR.
Gás gerado na Fm. Ponta Grossa pela
intrusão das soleiras de diabásio

