

# **Captura, Usos e Armazenamento de CO<sub>2</sub> (CCUS) Cadeia Produtiva do Carvão Mineral**

## **Oportunidades & Desafios**

**Workshop MME - SPE**

**Brasília, 13 de Setembro de 2019**

# Motivação para o armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> CCUS

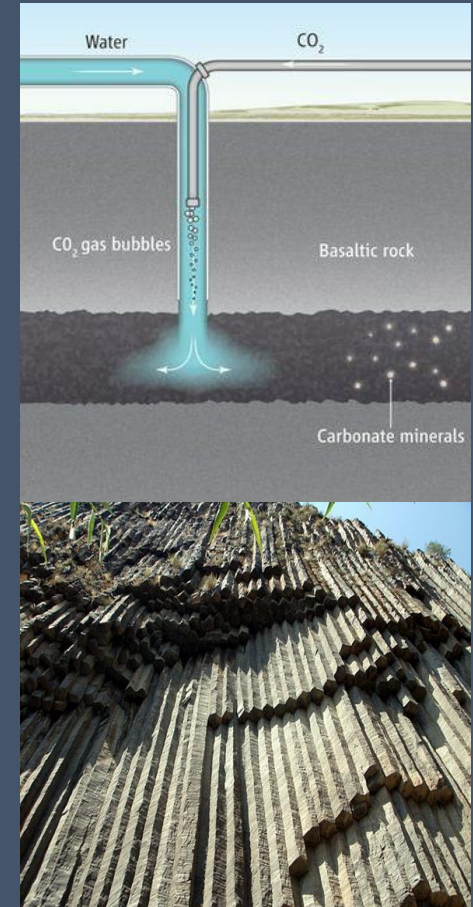
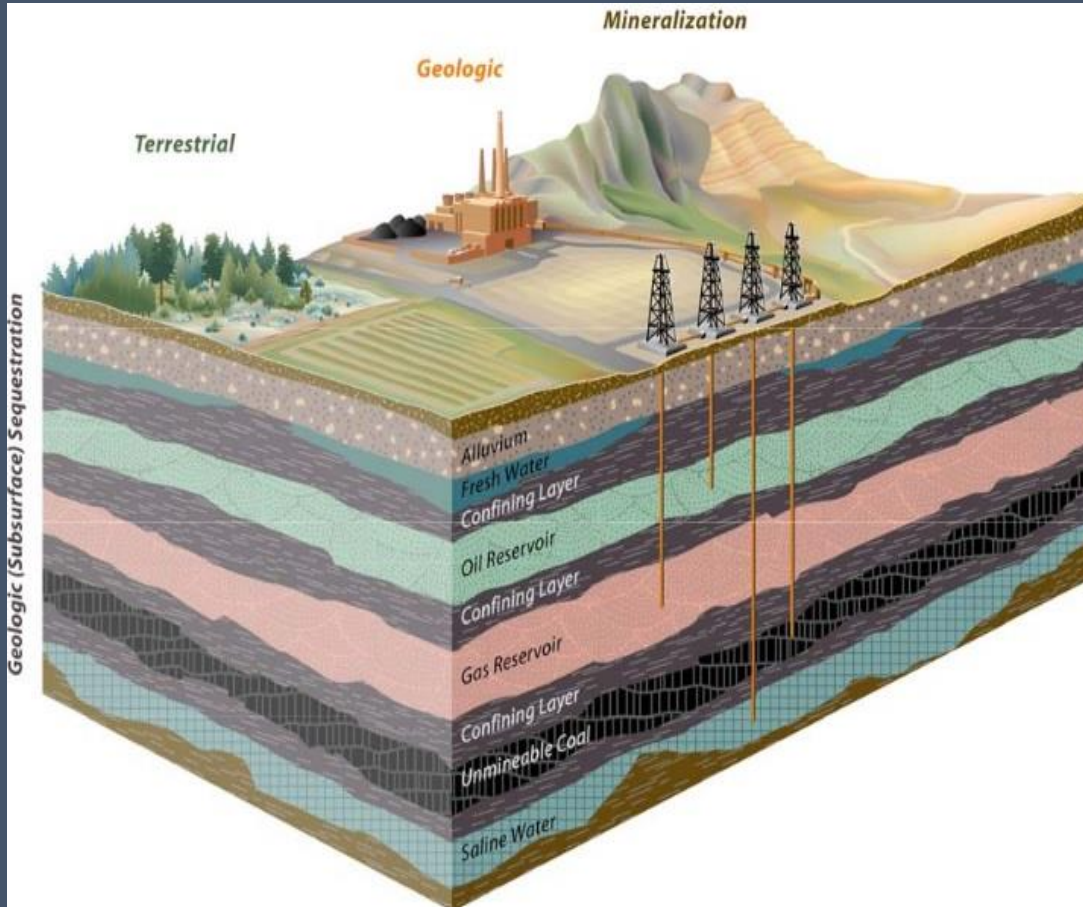
**Ambiental: redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE)**

**Econômica: indústria do gás natural e petróleo (CBM/ECBM/EOR)**

**Social/Tecnológica: Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I)**

**Cadeia produtiva do Carvão Mineral Nacional  
SUSTENTÁVEL**

# Alvos para o armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> – CCUS



# Etapas para o armazenamento de CO<sub>2</sub>– CCUS

## 1 Capture

CO<sub>2</sub> capture separates CO<sub>2</sub> from gas, before it is emitted, using a chemical solvent. The captured CO<sub>2</sub> is separated from the solvent and compressed into a liquid form for transport.

## 2 Transport

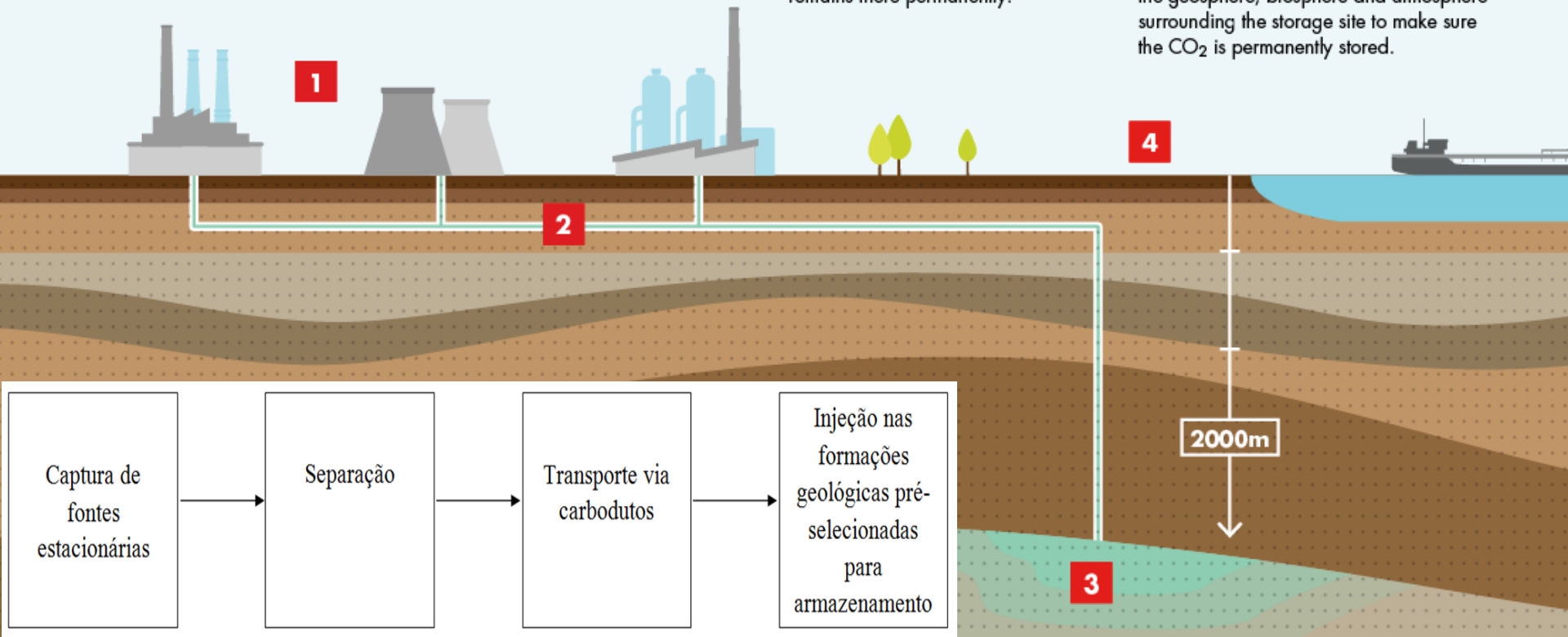
CO<sub>2</sub> is generally pumped along a pipeline, taking the CO<sub>2</sub> from the industrial site where it has been produced, to its storage site which may be onshore or offshore.

## 3 Storage

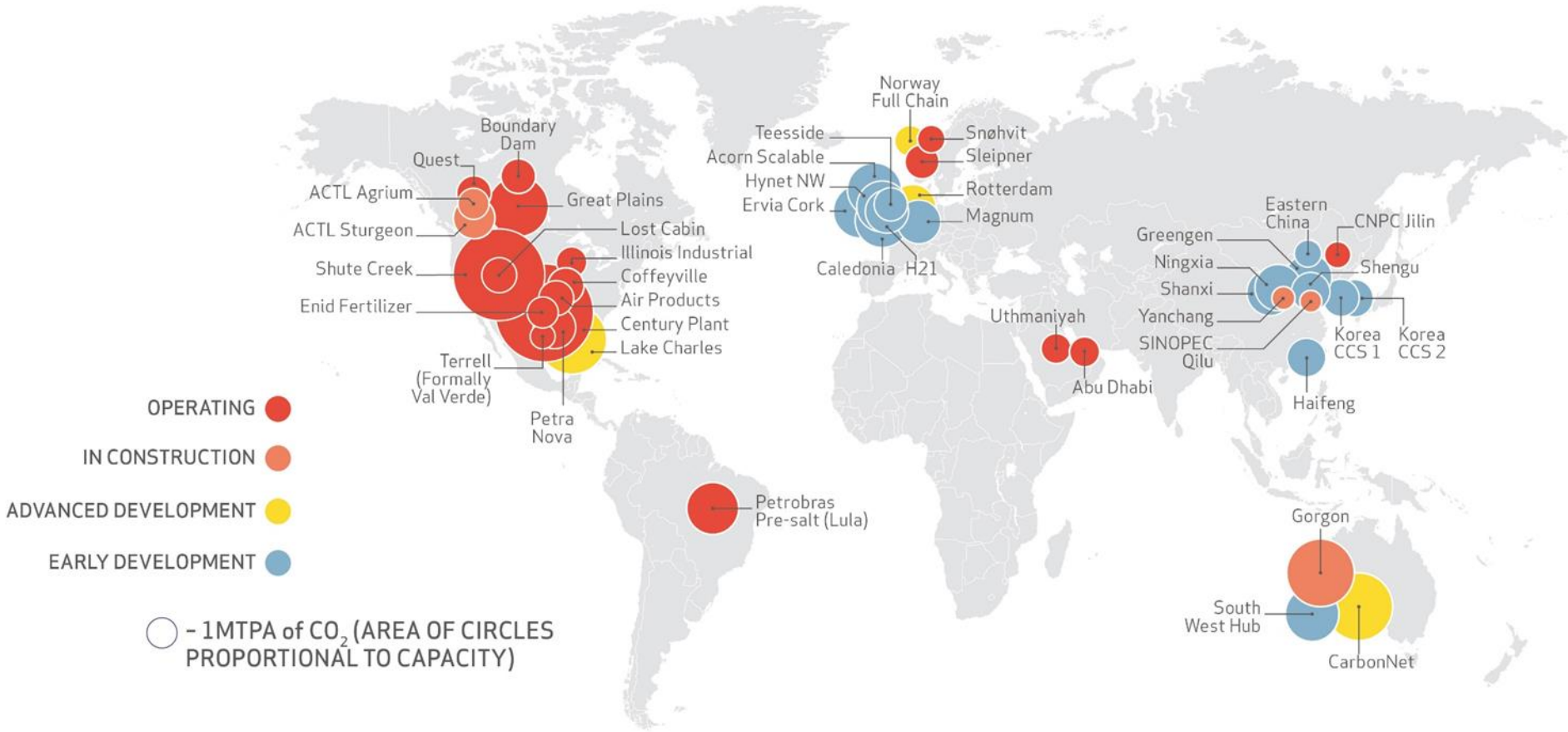
CO<sub>2</sub> is injected deep underground into the microscopic spaces in porous rocks. A layer of impermeable rock, called a cap rock, lies directly above the porous rocks ensuring that the CO<sub>2</sub> remains there permanently.

## 4 Measuring, monitoring & verification (MMV)

Monitoring of storage sites takes place within the storage reservoir, as well as at the injection well, where sensors can detect small changes in pressure or CO<sub>2</sub> levels. In addition, a number of monitoring technologies can be incorporated within the geosphere, biosphere and atmosphere surrounding the storage site to make sure the CO<sub>2</sub> is permanently stored.



# Projetos de pesquisa – CCUS



Source: Global CCS Institute 2018

# Captura, Usos e Armazenamento de carbono no Brasil - CCUS

Associação fontes emissoras-reservatórios;

Capacidade teórica;

Integridade de poços;

Reservatórios: camadas de

Carvão e aquíferos salinos;

Avaliação de rochas selo;

Modelagem de fluxo de CO<sub>2</sub>;

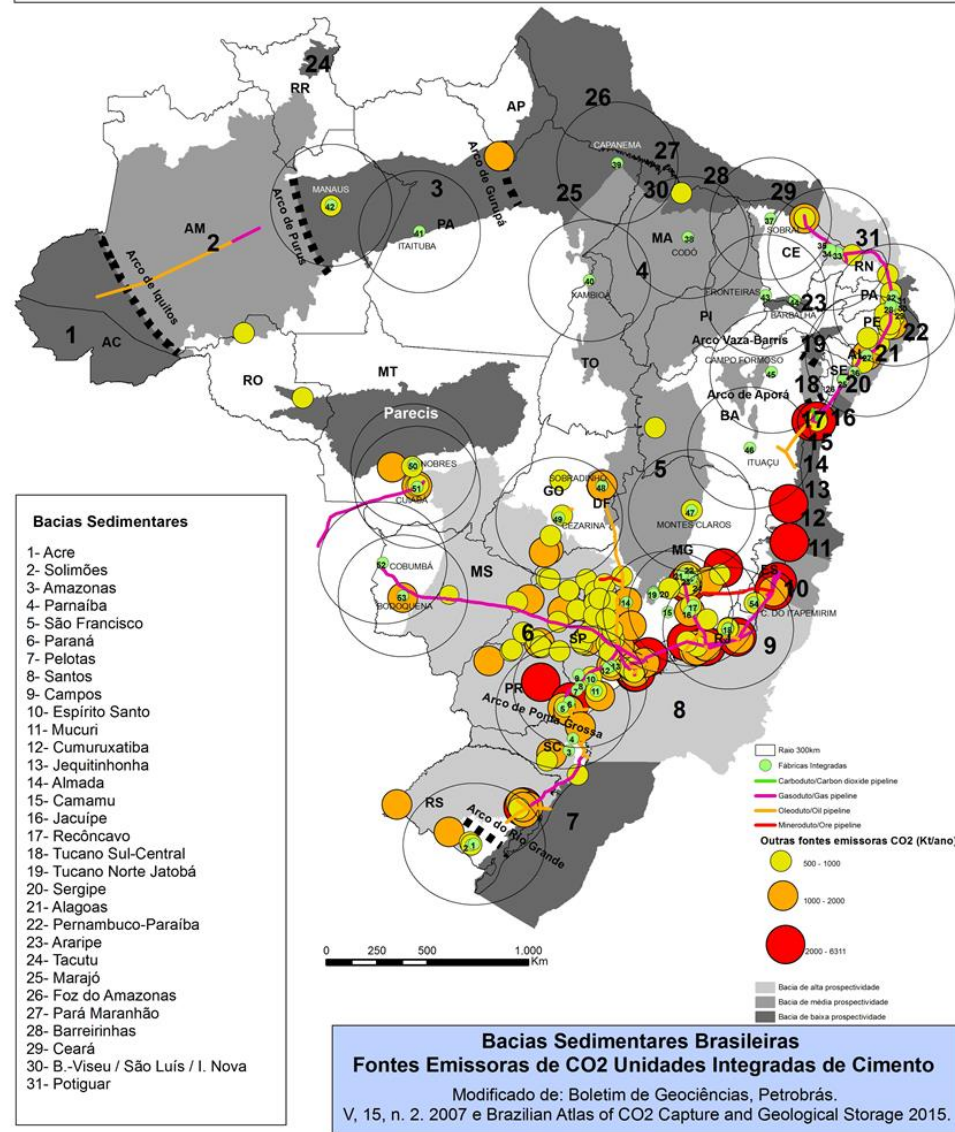
Injeção em Projetos Piloto.



# Captura e Armazenamento de carbono no Brasil – CCUS

## Fontes Emissoras - Bacias Indústrias do Cimento

Municípios unidades integradas				
1- Pinheiro Machado (RS)	12- Salto de Pirapora (SP)	23- Pedro Leopoldo (2 UI-MG)	34- Baraúna (RN)	45- Campo Formoso (BA)
2- Candiota (RS)	13- Santa Helena (SP)	24- Vespasiano (MG)	35- Quixeré (CE)	46- Ituaçu (BA)
3- Vidal Ramos (SC)	14- Itaú de Minas (MG)	25- N. Sra. do Socorro (SE)	36- Pacatuba (SE)	47- Montes Claros (MG)
4- Pomerode (PR)	15- Ijaci (MG)	26- Laranjeiras (SE)	37- Sobral (CE)	48- Sobradinho (ZUI-DF)
5- Balsa Nova (PR)	16- Barroso (MG)	27- São Miguel dos Campos (AL)	38- Codó (MA)	49- Cezarina (GO)
6- Rio Branco do Sul (PR)	17- Carandaí (MG)	28- Goiana (PE)	39- Capanema (PA)	50- Nobres (MT)
7- Adranópolis (PR)	18- Cantagalo (3 UI-RJ)	29- Caaporã (PB)	40- Xambioá (TO)	51- Cuiabá (MT)
8- Apiaí (SP)	19- Carmoal (MG)	30- Pitimbu (PB)	41- Itaituba (PA)	52- Corumbá (MS)
9- Itapeva (SP)	20- Arcos (2 UI-MG)	31- Alhandra (PB)	42- Manaus (AM)	53- Boduena (MS)
10- Ribeirão Grande (SP)	21- Sete Lagoas (MG)	32- João Pessoa (PB)	43- Fronteiras (PI)	54- C. do Itapemirim (ES)
11- Cajati (SP)	22- Matozinhos (MG)	33- Mossoró (RN)	44- Barbalha (CE)	



# CCUS nas Bacias Carboníferas do Brasil

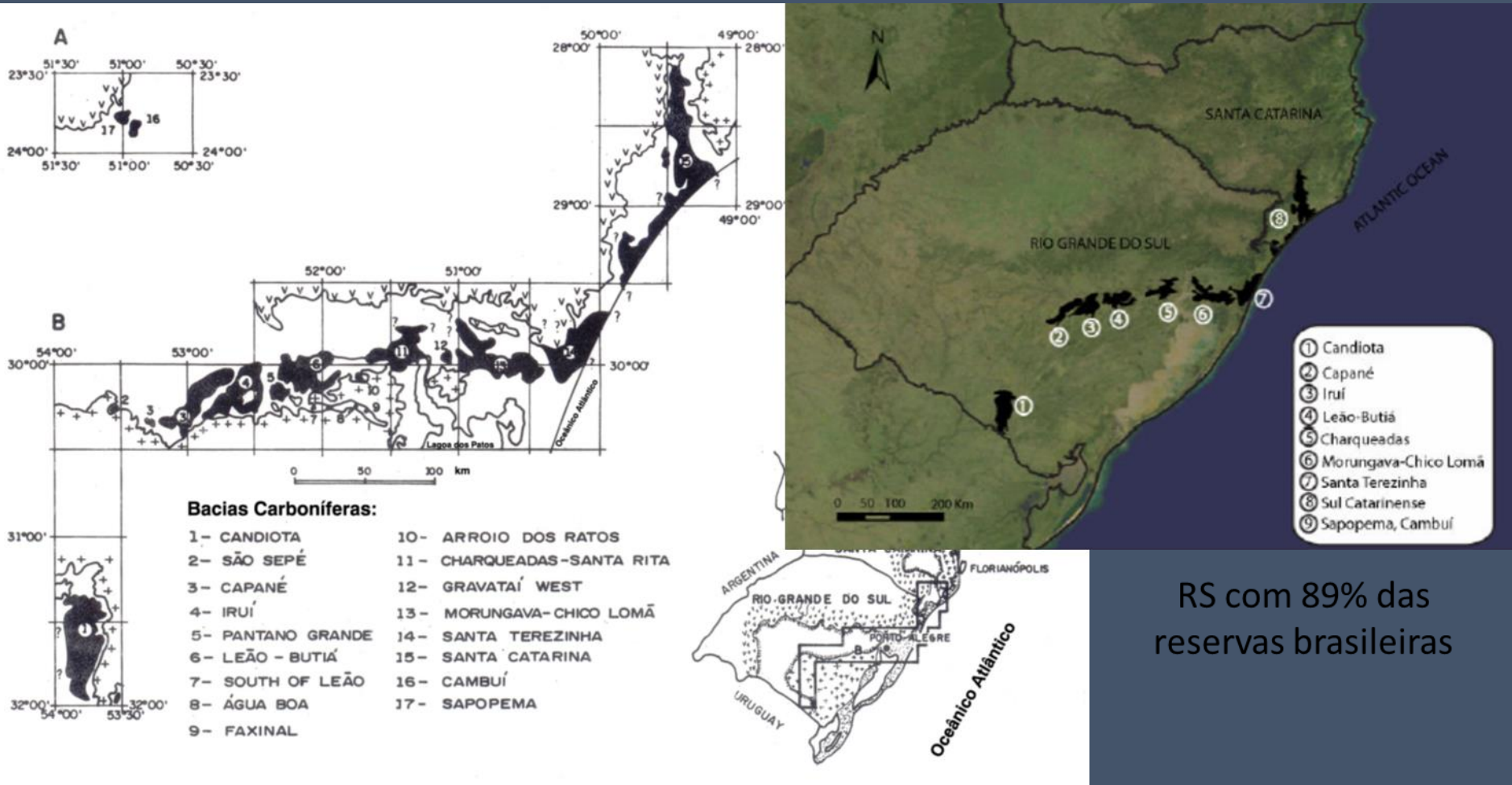


Stage	Lithostratigraphy	
KUNGURIAN	Passa Dois Group	Irati Formation
	Guatá Group	Palermo Formation
ARTINSKIAN		
SAKMARIAN	Itararé Group	Rio do Sul Formation

*lithostratigraphy after Schneider et al. (1974)*



# CCUS nas Bacias Carboníferas do Brasil



# Desafios e alternativas para o aproveitamento das camadas profundas de carvão

- Baixo preço do carvão no mercado;
- Elevada cobertura e reduzidas taxas de extração de minério;
- Altos custos de tecnologias de lavra (câmaras e pilares/*longwall*);
- Excesso de restrições ambientais bloqueando os recursos da União

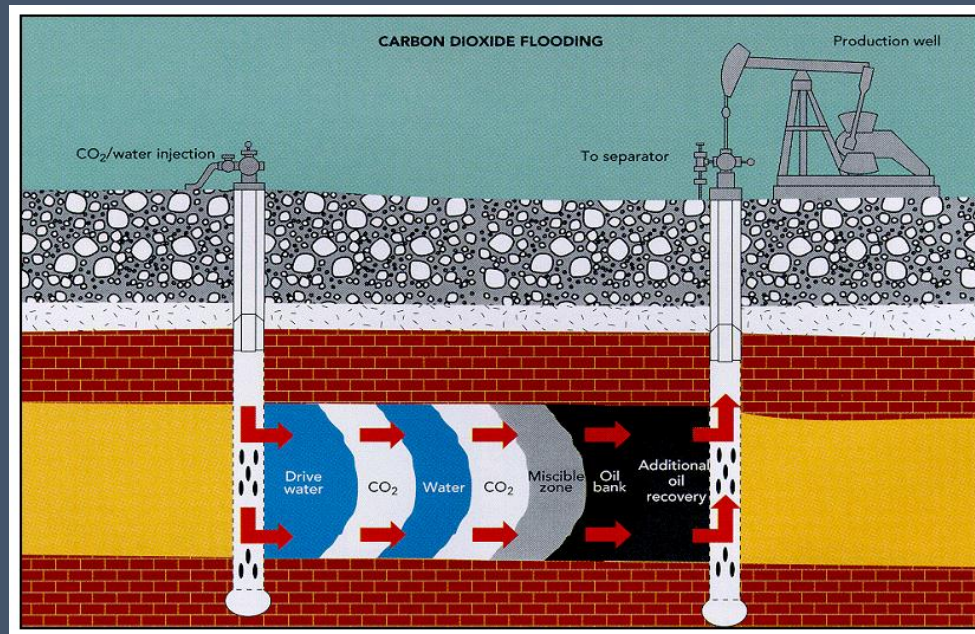
Alternativas potenciais para a exploração das camadas de carvão:

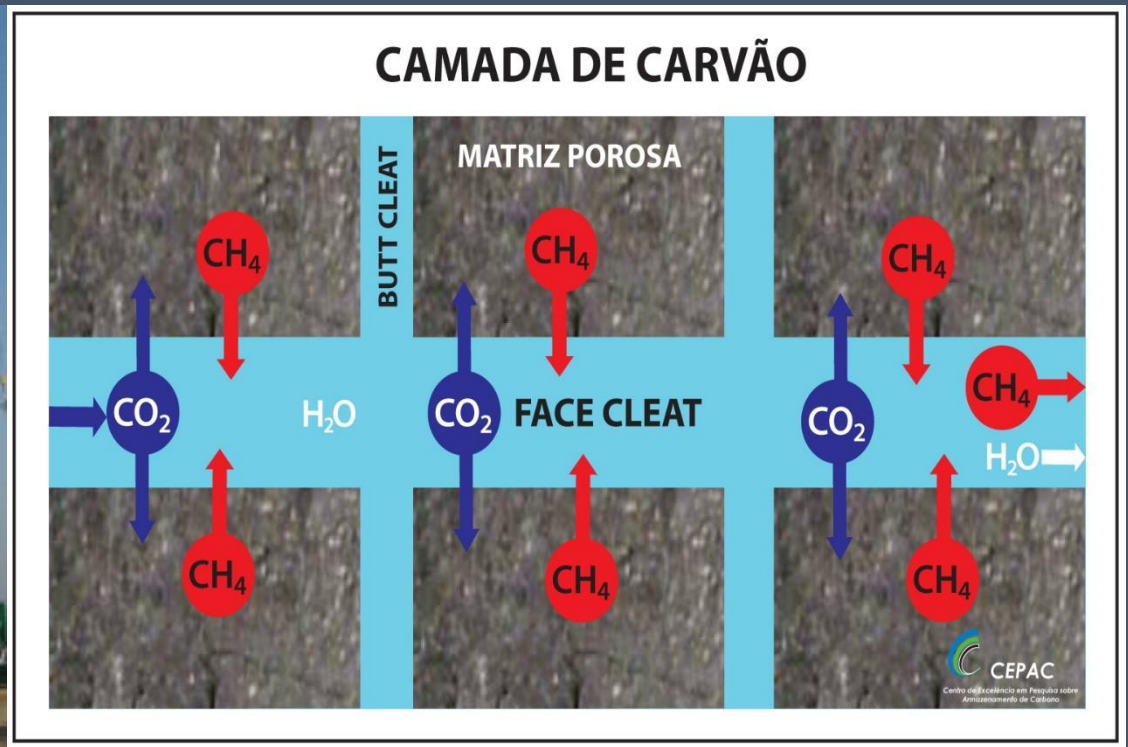
## *Clean Coal Technologies (CCT)*

- *Coalbed Methane (CBM)*;
- *Enhanced Coalbed Methane (ECBM)*;
- Gaseificação *in situ* de carvão mineral (UCG);
- Usinas termelétricas com CCUS acoplado.

# CBM – ECBM - CCUS

- CBM – redução da pressão hidrostática na camada de carvão com o metano sendo liberado do carvão em função do gradiente de pressão;
- ECBM – recuperação avançada de metano remanescente contido em camadas de carvão através da injeção de dióxido de carbono (ECBM).



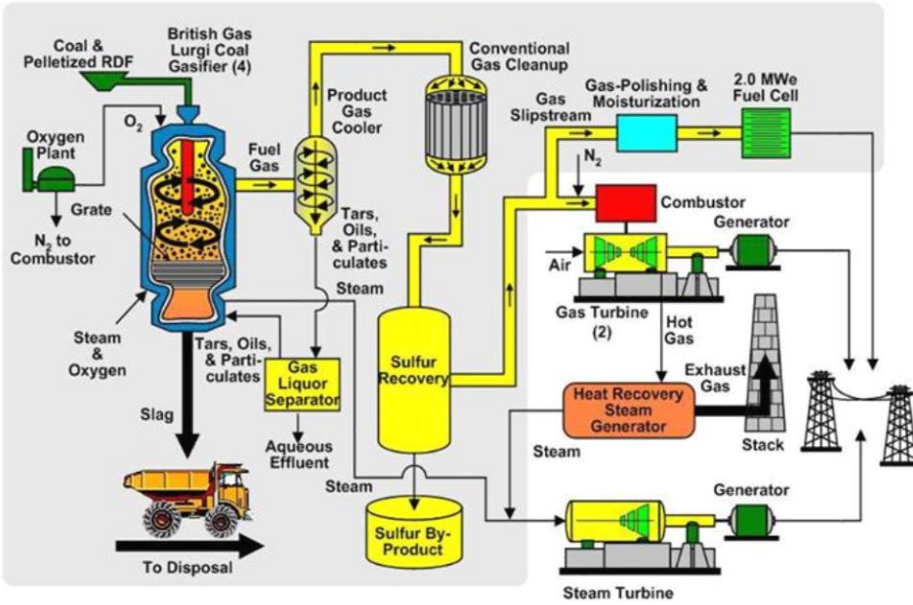


**Depleção dos poços de CBM;**

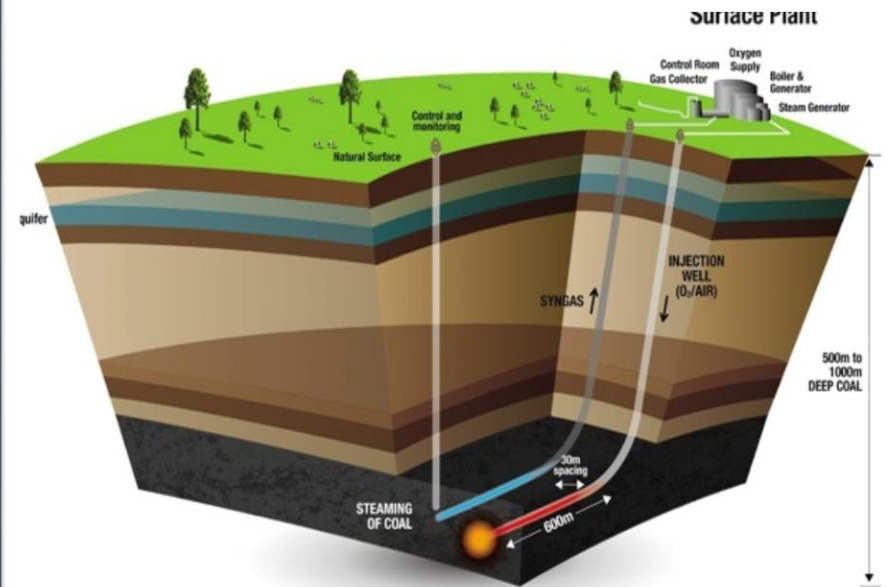
**Injeção de CO<sub>2</sub>, adsorção de CO<sub>2</sub> e dessorção do CH<sub>4</sub> (relação 2:1 CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>);**

**Aumento da taxa de produção de CH<sub>4</sub> e, como subproduto, o CO<sub>2</sub> fica armazenado nas formações geológicas.**

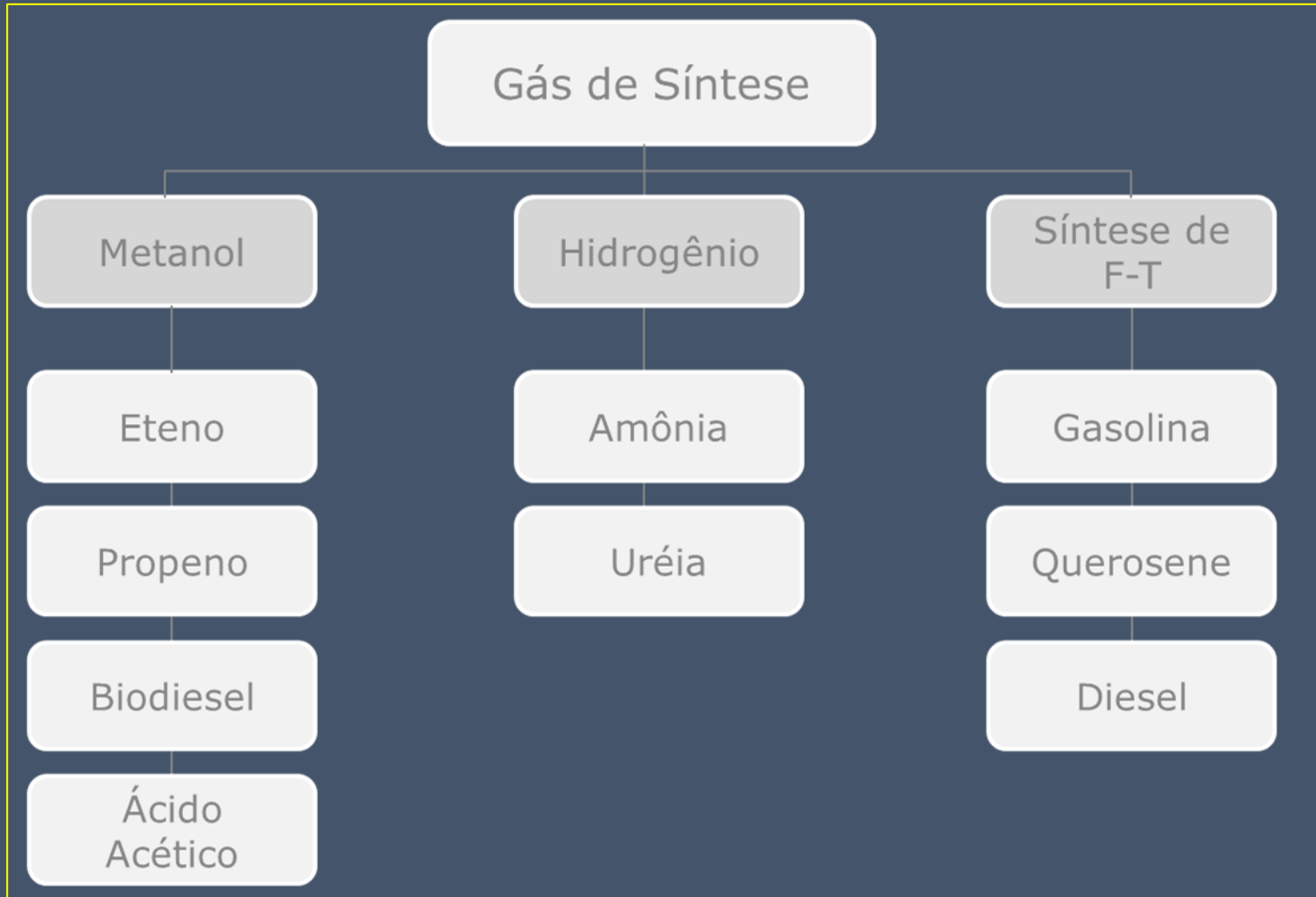
## Gaseificação de carvão mineral em superfície



## Gaseificação de carvão mineral *in situ* (UCG)

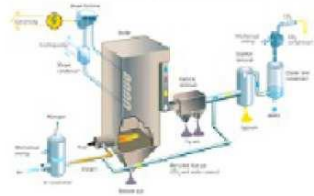


# Gás de síntese (SYNGAS)



# Armazenamento do CO<sub>2</sub>

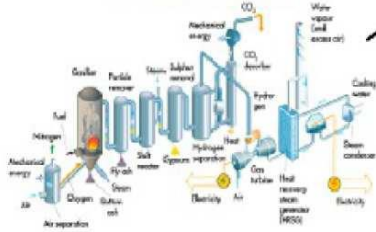
## Oxy-combustion



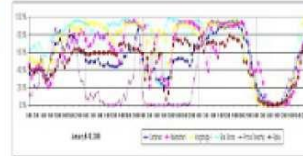
## Post-Combustion



## Pre-combustion

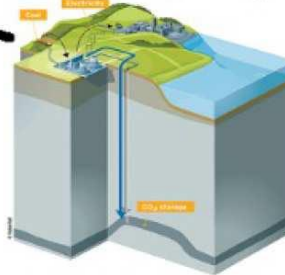


## Intermittent Renewables

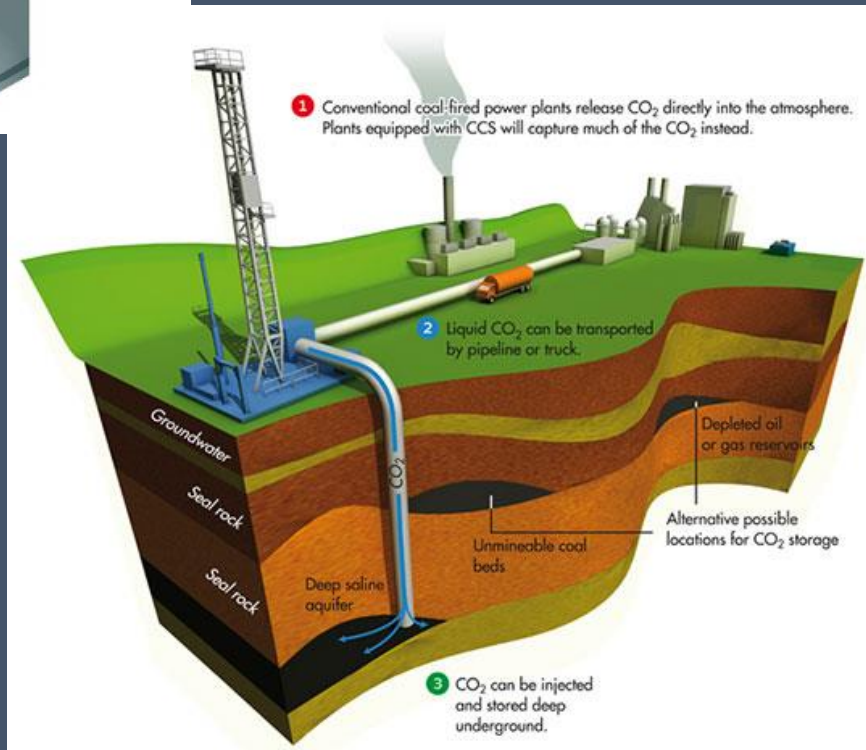


## CO<sub>2</sub> Transport

## CO<sub>2</sub> Storage



1 Conventional coal-fired power plants release CO<sub>2</sub> directly into the atmosphere. Plants equipped with CCS will capture much of the CO<sub>2</sub> instead.



2 Liquid CO<sub>2</sub> can be transported by pipeline or truck.

3 CO<sub>2</sub> can be injected and stored deep underground.

Depleted oil or gas reservoirs  
Unmineable coal beds

# Áreas de pesquisa, desenvolvimento e inovação

1. Carbon Capture, Use and Storage (CCUS)
2. Exploração e produção de Gás (CBM – UCG – PCTs - Shale Gas)
3. Monitoramento ambiental (MMV)
4. Biotecnologia
5. Desenvolvimento de protótipos e equipamentos



1. Modelagem Geológica & Geoquímica
2. Monitoramento Ambiental (rochas selo)
3. Geofísica Aplicada
4. Cadeia produtiva e logística (infraestrutura, carbodutos)
5. Desenvolvimento de novos materiais (polímeros, entre outros)



# Exploração de reservatórios não-convencionais

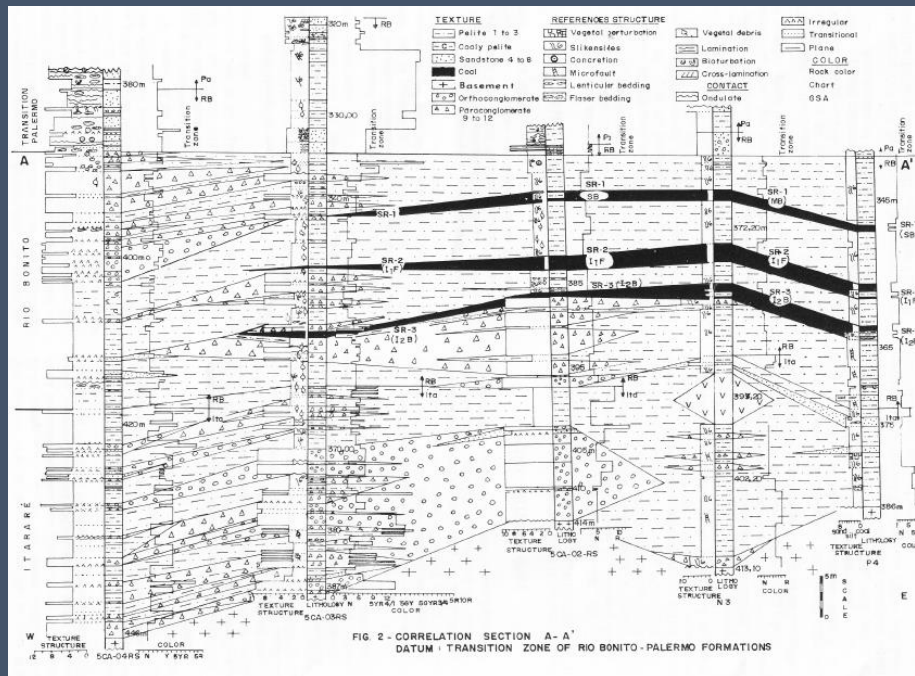
## Caracterização Geológica dos Potenciais Alvos

Continuidade das unidades/formações

Espessura - Cobertura

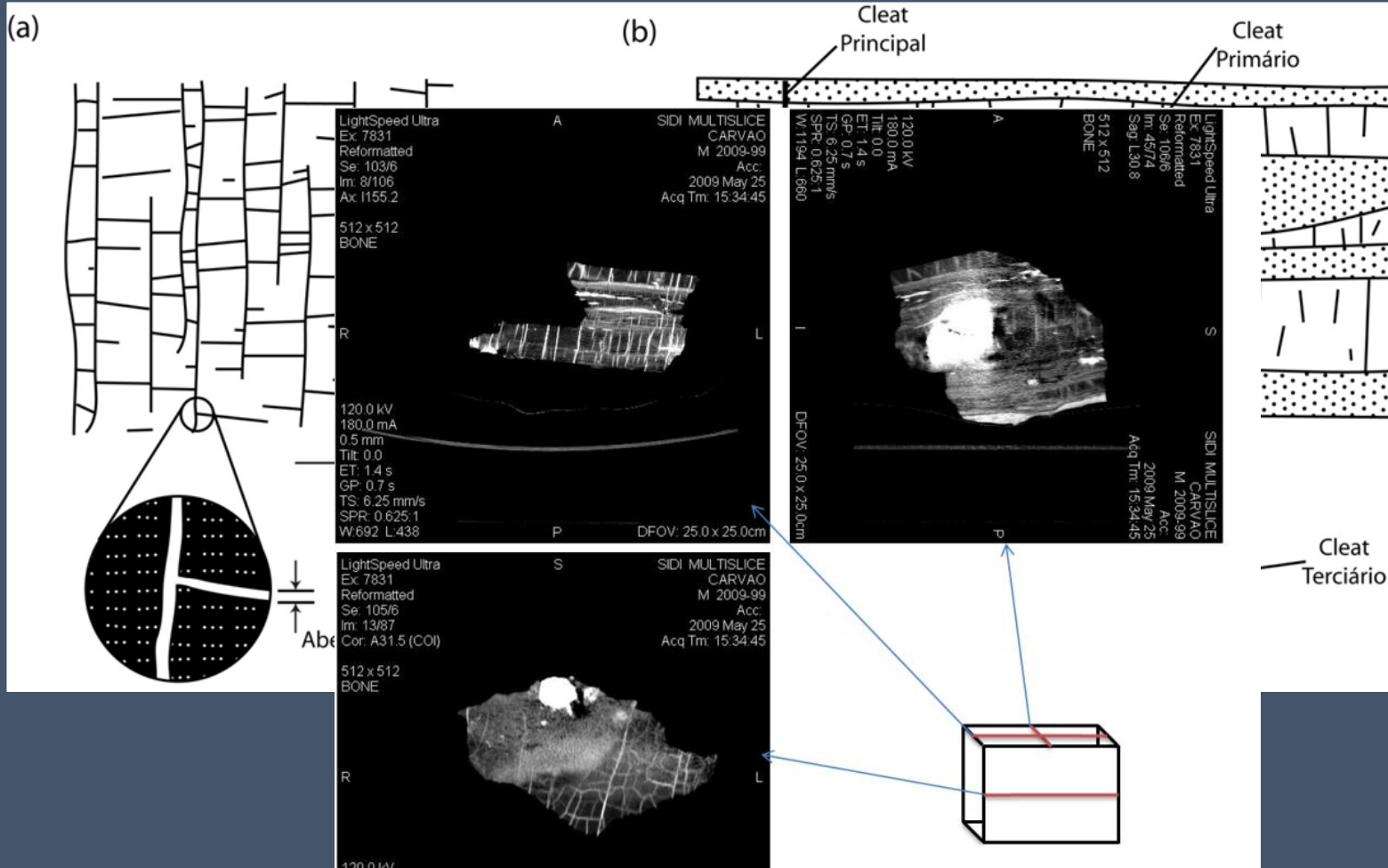
Potenciais “Rochas selo”

Geologia estrutural - Contexto hidrogeológico local e regional



# Exploração de reservatórios não-convencionais

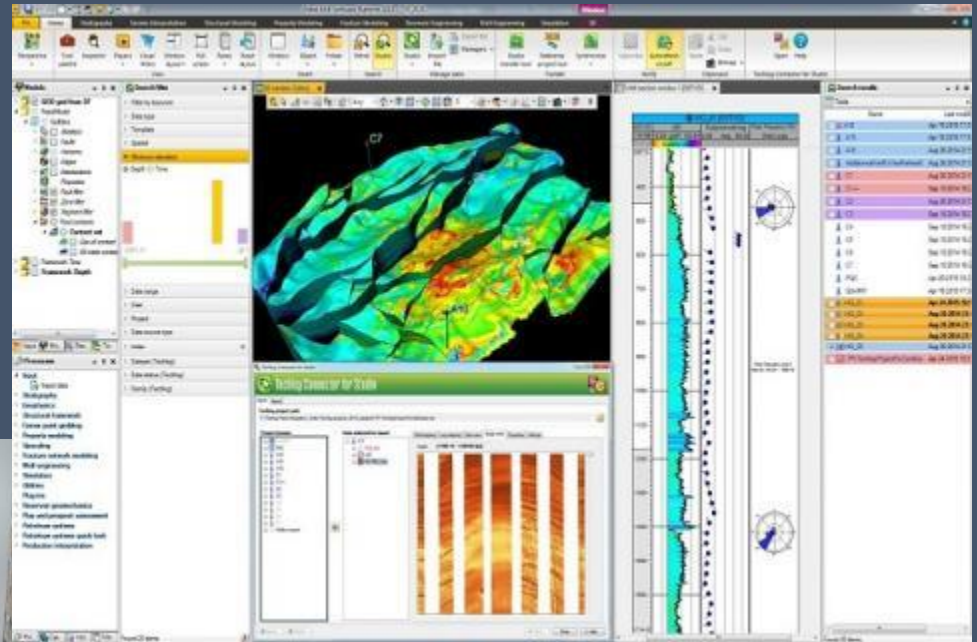
## Análise do sistema de cleats do carvão



# Exploração de reservatórios não-convencionais

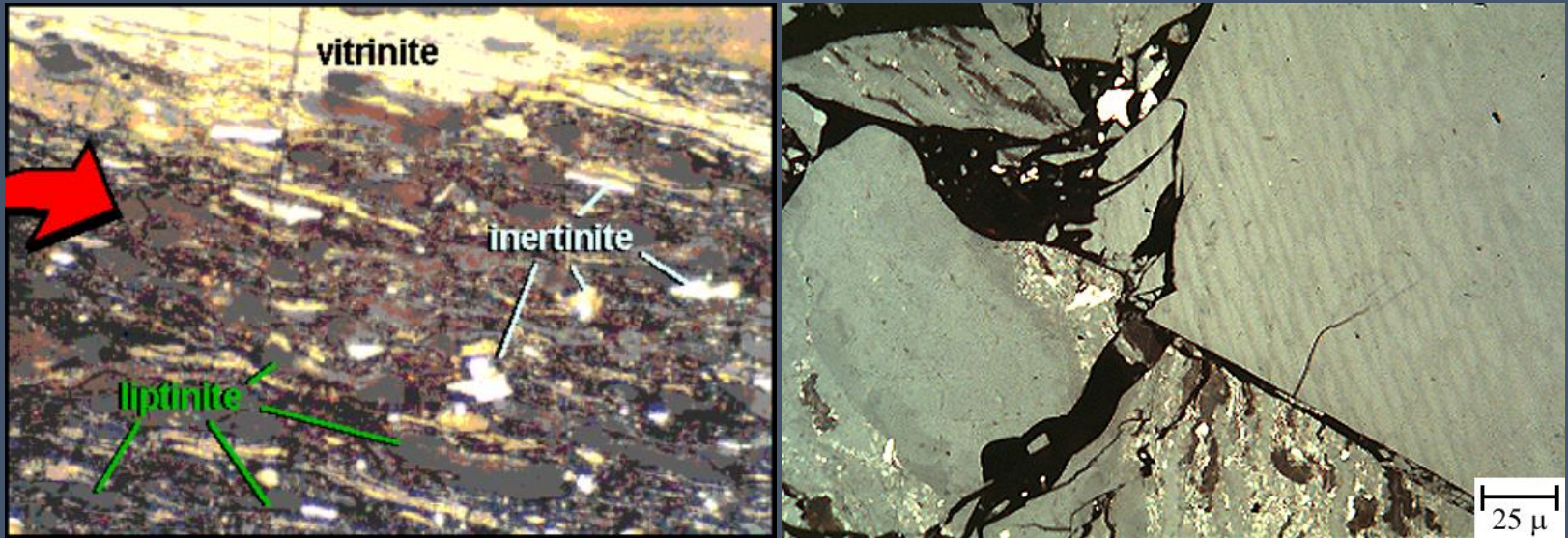
Caracterização petrofísica dos reservatórios (CBM, CCS, Shale Gas, rochas selo)

Simulação da capacidade de armazenamento e produção de gás



# Influência da composição macerática

Petrografia de amostras de carvão x Isotermas  
composição macerática (grupo maceral vitrênio – liptinita – inertinita e matéria mineral)



Em amostras com maiores teores de vitrinita o grau de adsorção de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> é maior

# Adsorção

- A adsorção é um processo de acumulação e concentração de um ou mais constituintes contidos num gás ou líquido sobre superfícies sólidas.

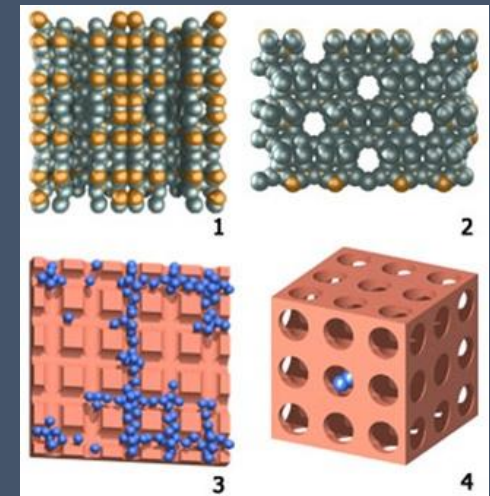
Do que depende o grau de adsorção de um gás em carvão mineral?

Temperatura;

Pressão;

*Rank* – grau de carbonificação;

Área superficial.



# Análises Geoquímicas

Análises de isótopos estáveis (C, O, H, N, S)

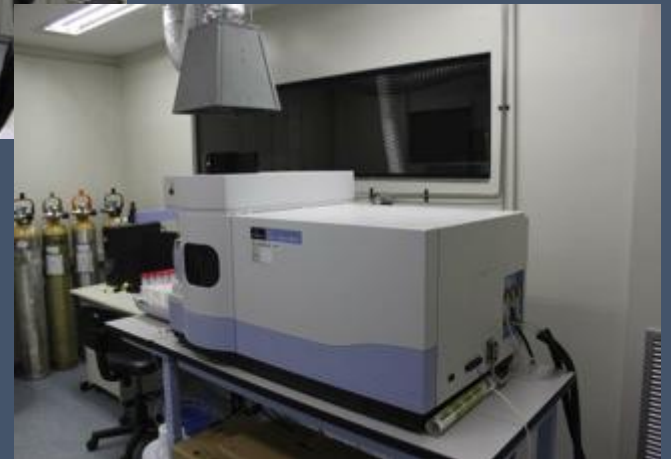
Análises de amostras de gases (C1-C5, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, traçadores, etc)

Análises de água (ICP-EOS e Cromatografia iônica)

Análises elementares (C, H, N, S, COT)

Análises termogravimétricas pressurizadas (300 bar)

Análises de Infravermelho (FTIR)



# Análise do comportamento de carvão sob influência da injeção de $\text{CO}_2$



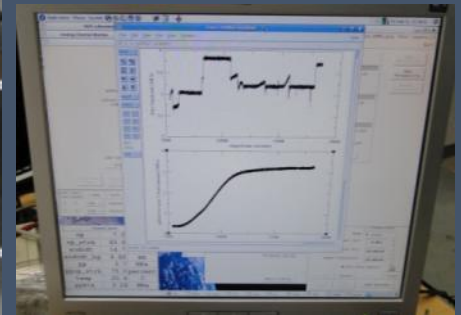
Plugs para micro-CTs



Análise de isotermas



Medições de permeabilidade de alta precisão

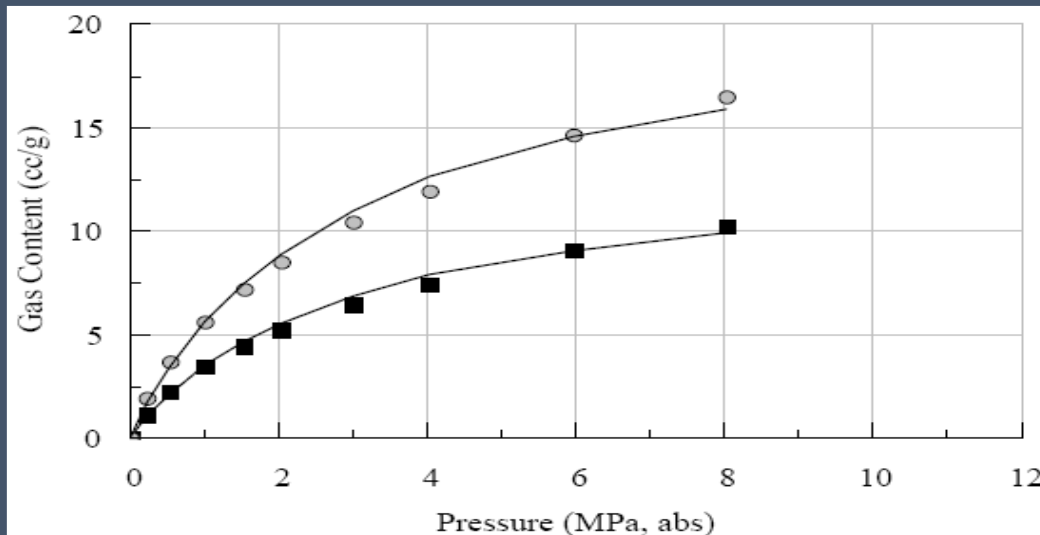


## Isoterma de adsorção

Curvas que descrevem a quantidade de gás adsorvido em função da pressão (ou concentração) do gás, medido à temperatura constante.

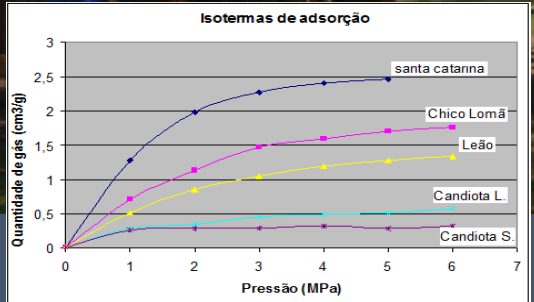
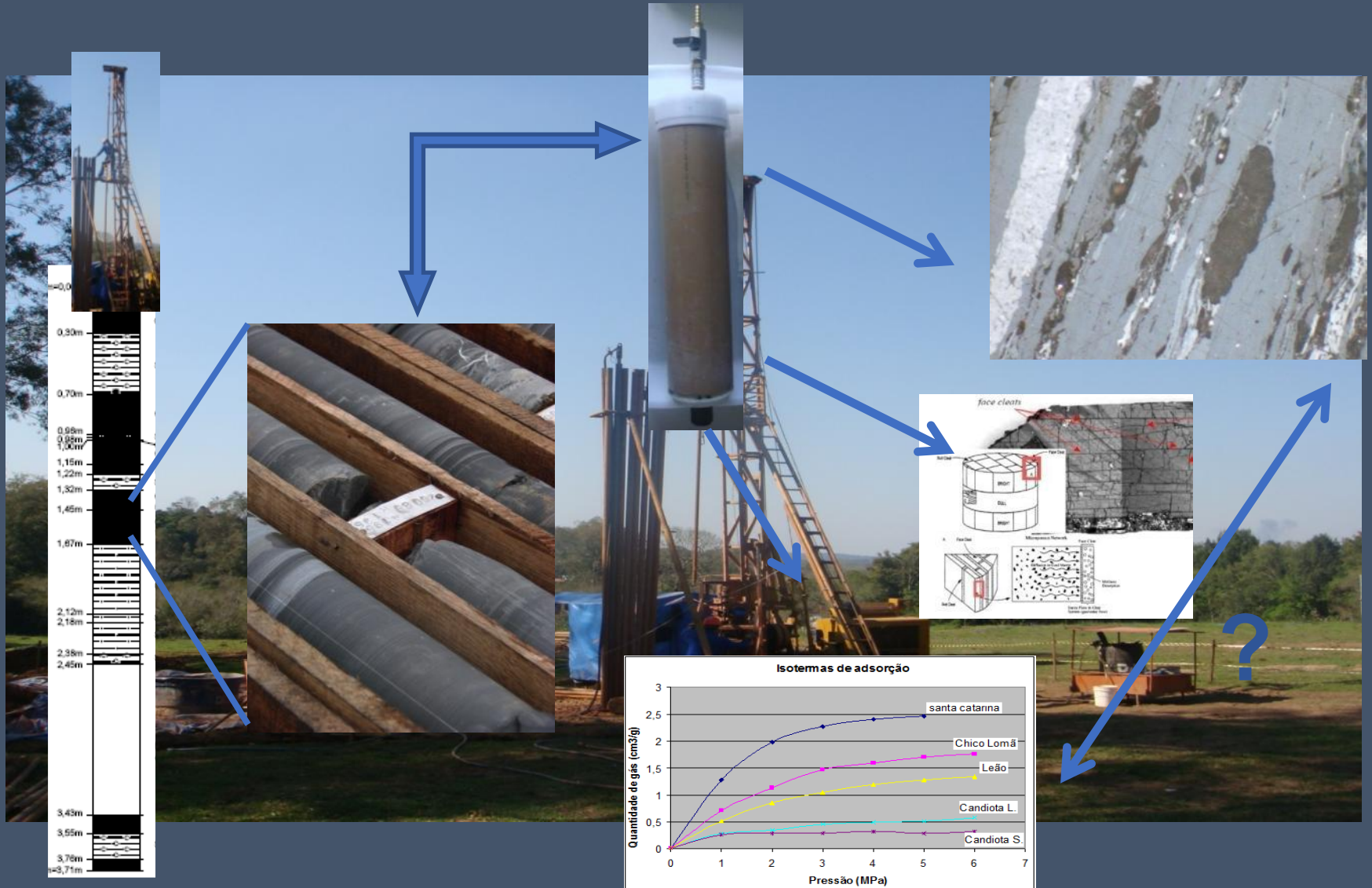
Análises termogravimétricas pressurizadas (300 bar) (PTGA – Balança de suspensão magnética)  
Teste indireto na investigação de CCGS, CBM/ECBM e shale gas

- Determinar a capacidade de armazenamento máxima de gas em camadas de carvão a diferentes pressões;
- Estimar o grau de saturação pela diferença entre capacidade máxima e o volume real de gas;
- Determinar a pressão crítica de dessorção e condições operacionais em poços de produção;





# Relação entre composição, litotipos e conteúdo de gás

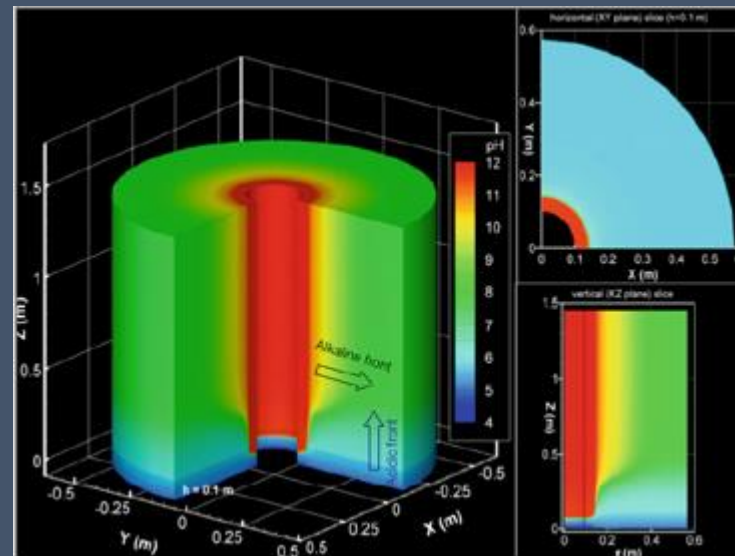
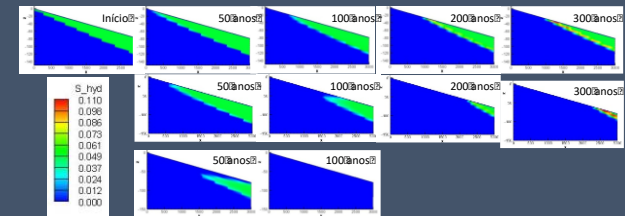
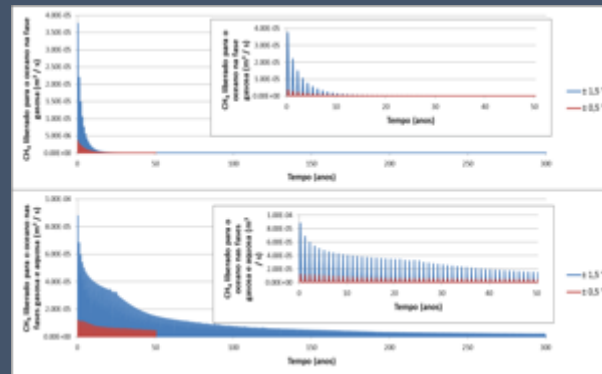


# Modelagem experimental



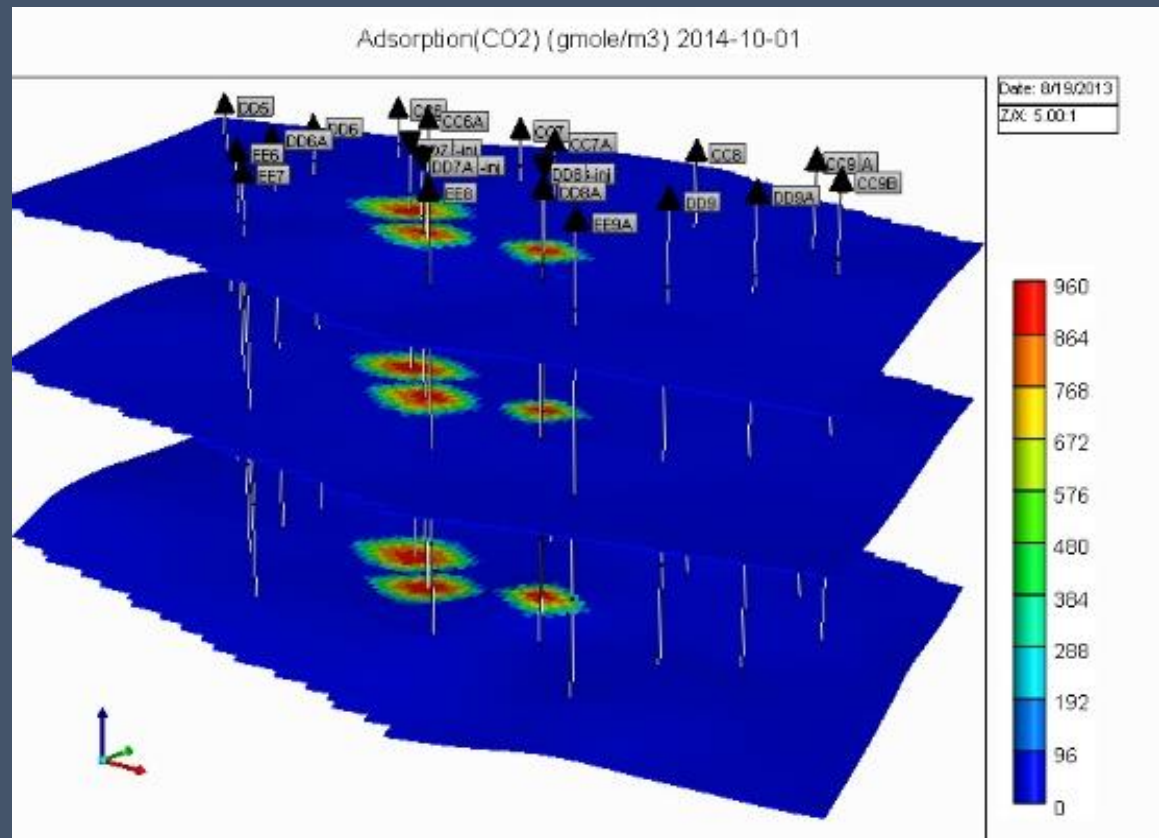
# Modelagem Geoquímica

Experimentos de fluxo,  
Autoclaves e modelagem numérica de reservatórios

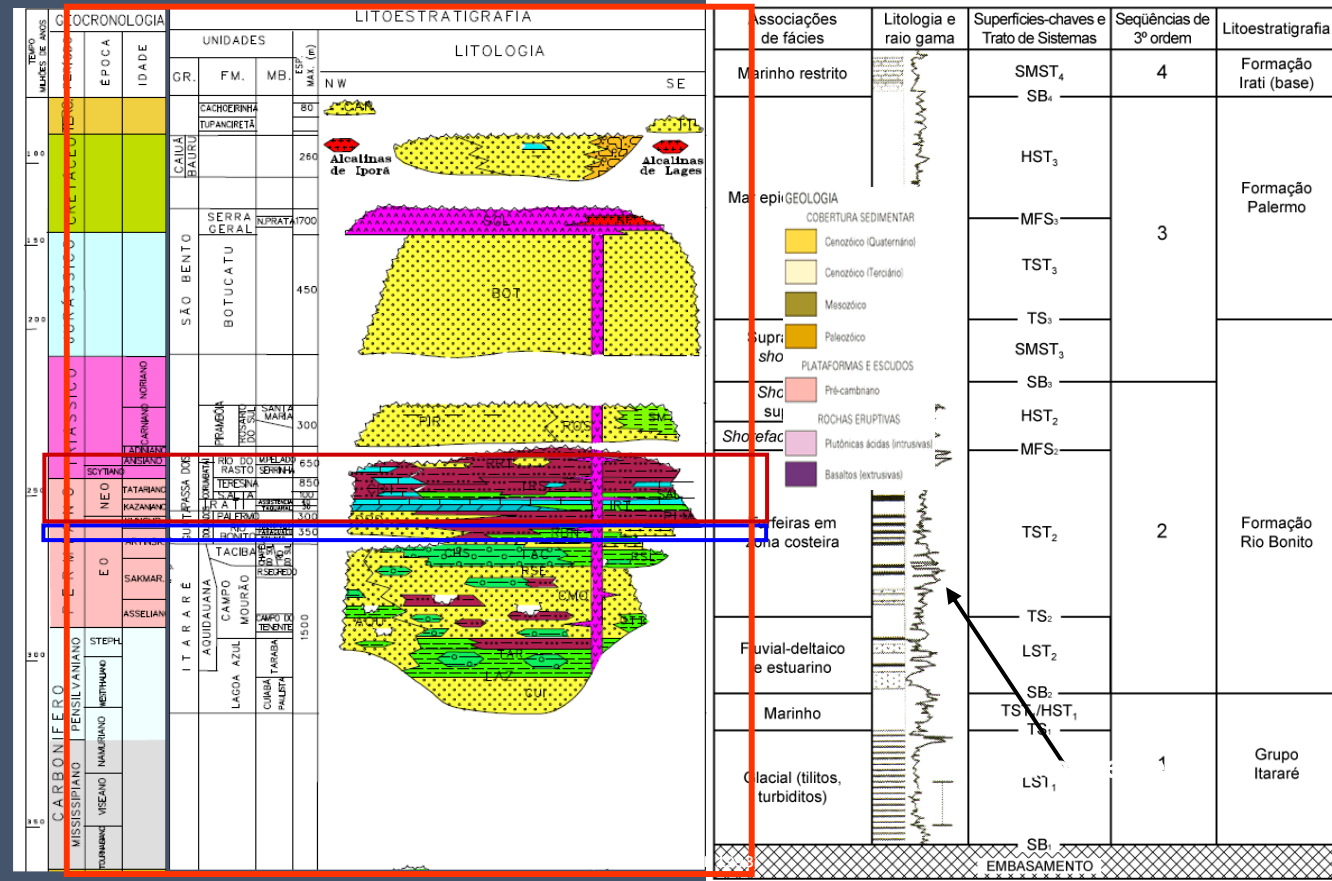


# Modelagem de fluxo de CO<sub>2</sub>

Interações CO<sub>2</sub>-água-rocha;  
Integridade de poços;  
Modelagem de fluxo de CO<sub>2</sub>;  
Simulação de vazamentos de CO<sub>2</sub>  
Utilização de traçadores.



# Potenciais rochas selo

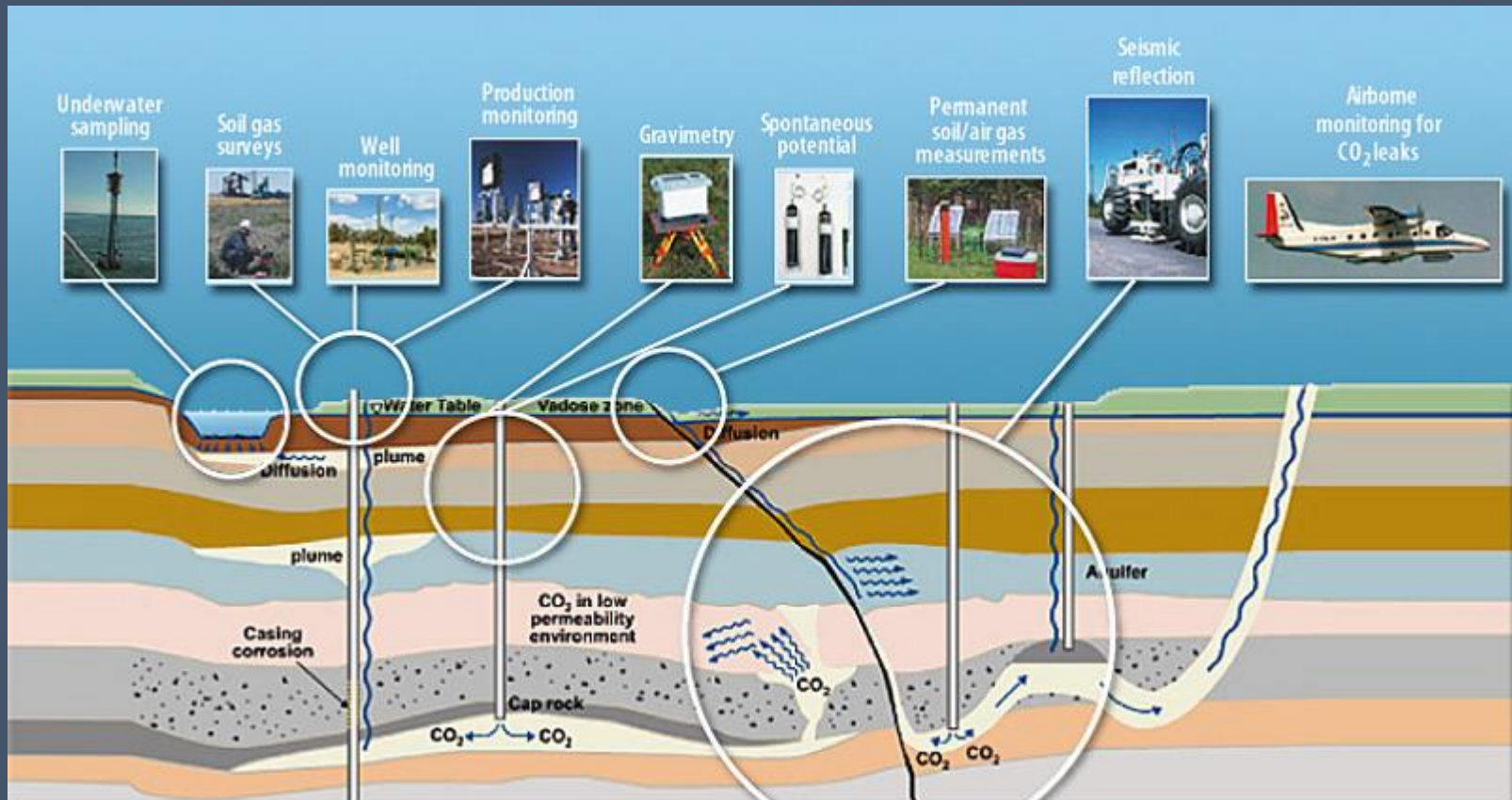


Difusão – ruptura – capilaridade – abertura de fraturas – reatividade – permeabilidade – mineralogia - conectividade e homogeneidade

# Monitoramento e avaliação de impactos ambientais em projetos de CCS

## Experimentos controlados simulando vazamento CO<sub>2</sub>

- MMV CO<sub>2</sub> ar, solo e poços;
- MODELAGEM NUMÉRICA E TAXAS DE INJEÇÃO;
- MEDIÇÃO CONTÍNUA DA ELETRORESISTIVIDADE;
- INJEÇÃO DE TRAÇADORES GASOSOS;
- EQUIPAMENTOS ATMOSFÉRICOS (LIDAR, LOGGER CAMPBELL E SENSORES CARBONCAP)



# Monitoramento e avaliação dos potenciais impactos ambientais

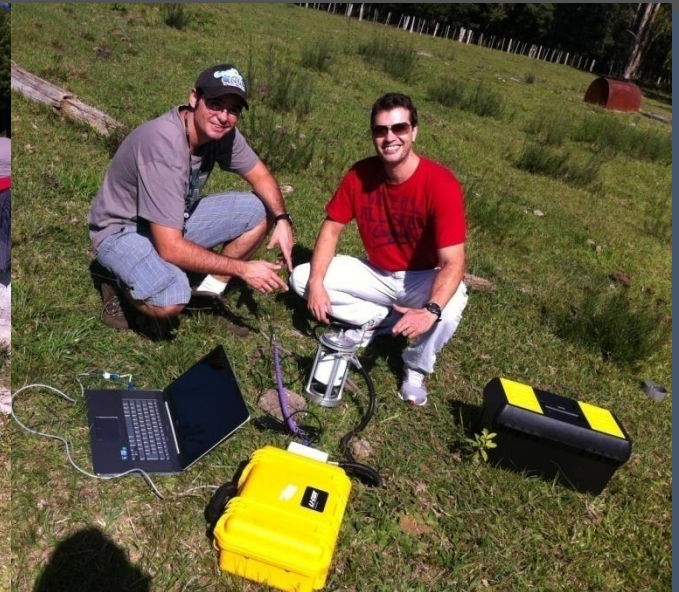
## Medidas de concentração e fluxo de CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> do solo

Medidas de concentração e fluxo de CO<sub>2</sub> do solo

Sistema da LI-COR contendo uma câmara de fluxo dinâmica e um analisador infravermelho - Soil CO<sub>2</sub> Flux Chamber (LI8100-A)



O método consiste em colocar a câmara de fluxo sobre colares de PVC de 10 cm de diâmetro interno, inseridos a 3,1 cm no solo. A câmara tem um volume interno de 955 cm<sup>3</sup>, com uma área exposta para o solo de 83,7 cm<sup>2</sup>



# Monitoramento Ambiental Gases

Amostragem de água e concentrações de gases em poços de monitoramento





# Monitoramento Ambiental Recursos Hídricos

## Amostragem de água e concentrações de gases em poços



# Estratigrafia genômica comparada (Bacia do Paraná)

Extração e sequenciamento de DNA (amostras de formações geológicas)

Análise de DNA e RNA de comunidades microbianas e virais

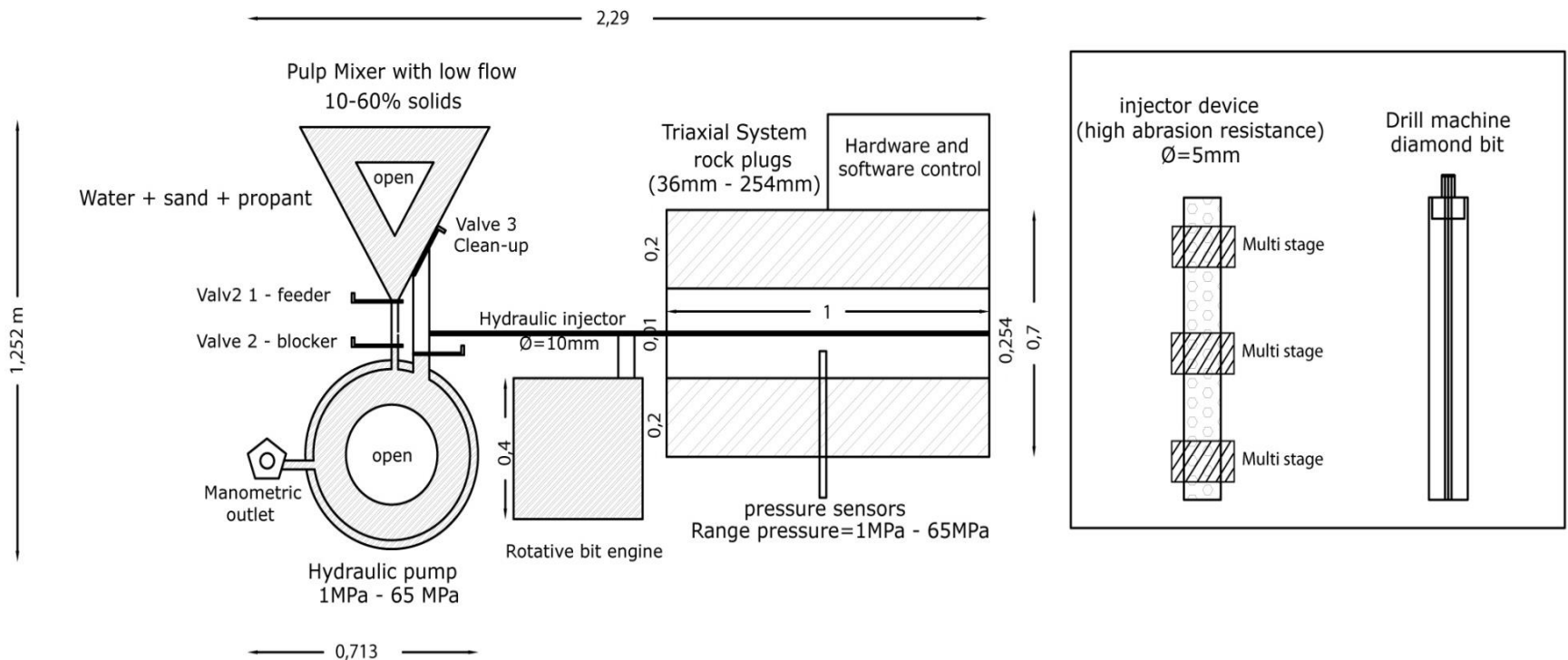


Conversão de CO<sub>2</sub> em combustíveis por bactérias engenheiradas sinteticamente.

# Desenvolvimento de protótipos e equipamentos

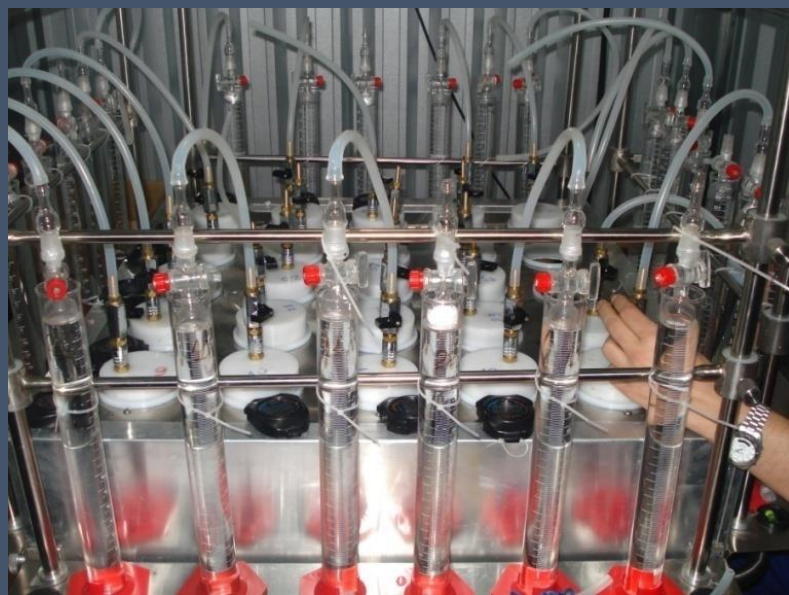
**Protótipo para simular o comportamento geomecânico de rochas selo e reservatórios “não convencionais” durante o fraturamento hidráulico e a injeção de CO<sub>2</sub>**

**(ajustes de fatores de segurança e operacionais para o processo de injeção de CO<sub>2</sub> e exploração de recursos “não convencionais”)**



# Testes Piloto para o armazenamento de CO2 e produção CH4

Metano contido em camadas de carvão (CBM/ECBM).  
Exploração de folhelhos gasógenos e oleígenos



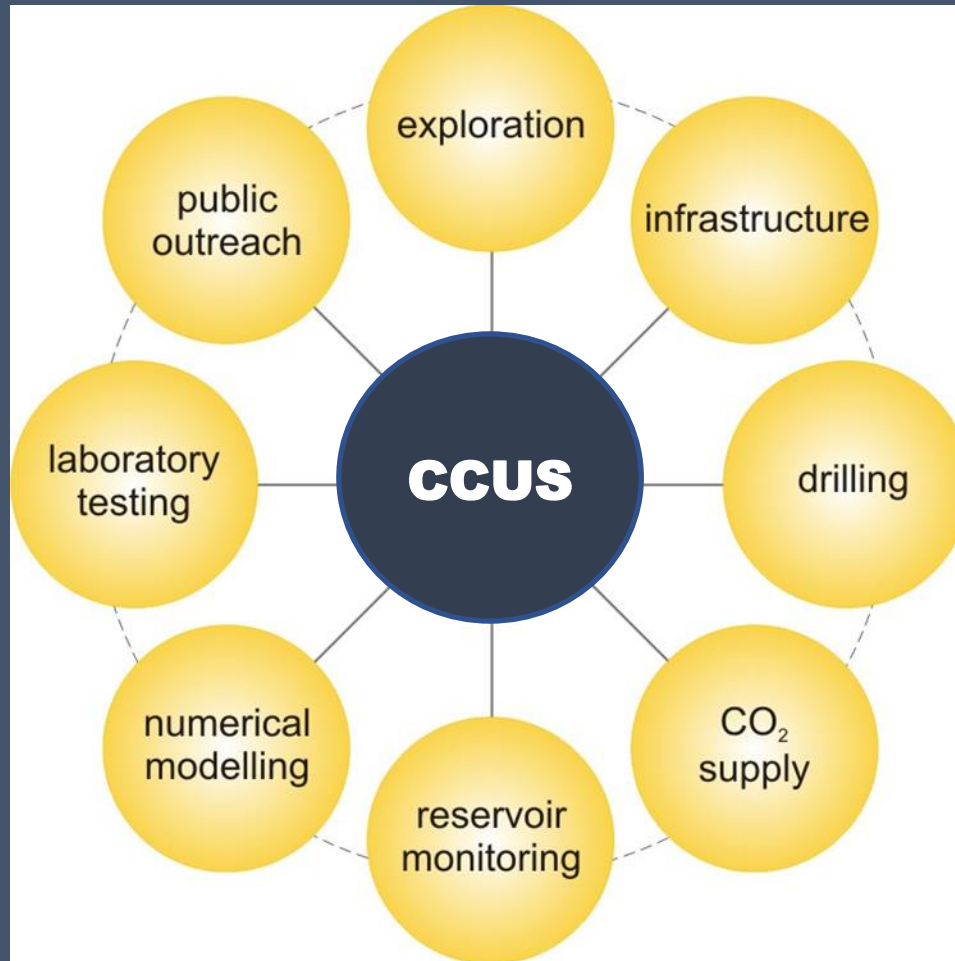
## **Desafios para viabilidade técnica de projetos**

- 1. Análises geomecânicas e petrofísicas de potenciais reservatórios considerando a distribuição vertical e horizontal e as rochas selo**
- 2. Determinação das litofácies "GEO MEC-REATIVAS E PETROFÍSICAS"**
- 3. Simulação do comportamento de rochas selo durante estimulação, fraturamento e injeção de CO<sub>2</sub>**
- 4. Eficiência e up-scaling de tecnologias de captura e separação acopladas a centrais termelétricas**
- 5. Logística e custo de transporte da corrente de CO<sub>2</sub> por carodutos**

**Seleção de áreas para testes de armazenamento de CO<sub>2</sub> em escala piloto**

**Desenvolvimento de soluções tecnológicas mais eficientes e de baixo custo (modernização e novas plantas)**

# Ciclo Testes Piloto CCUS



## Desafios para aplicação de projetos CCS

- Desenvolvimento de cadeia produtiva do CCS: tecnologia nacional para sondagem direcional, ferramentas de monitoramento ambiental, desenvolvimento de materiais para separação e resistentes a corrosão CO<sub>2</sub>, recursos humanos capacitados, infraestrutura de transporte e logística;
- Regulação para todas as etapas da atividade de CCS, incluindo a pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica: política, transporte, prospecção, seleção e caracterização de sites, detalhamento de associação emissões fontes estacionárias-reservatórios (CO<sub>2</sub> “*matching*”), desenvolvimento de técnicas de monitoramento ambiental;
- Elevados custos das etapas de captura e separação, mas também de transporte e armazenamento de dióxido de carbono, principalmente quando consideramos a relação emissões tonCO<sub>2</sub>/receita de vendas (intensidade carbônica por valor do produto), onde o carvão supera a indústria de óleo/gás, alumínio, aço e energia;

## Desafios para aplicação de projetos CCS

- Aceitação pela sociedade e instituições ambientais com relação à segurança e efetividade de uma tecnologia complexa e dispendiosa como o CCS (importância de projetos piloto);
- Possíveis custos elevados de transporte de CO<sub>2</sub>, com ressalva a utilização de consórcios com outras fontes emissoras (etileno, etanol, cimento, siderúrgicas, refinarias, amônia, processamento de gás natural e recuperação avançada de óleo (EOR), diluindo os custos de investimento e operacionais (CAPEX e OPEX);
- Articulação setorial nacional robusta em favor da construção de uma agenda política para o CCS acoplado a novas usinas, incluindo a tributação, incentivos fiscais, mecanismos de desenvolvimento limpo, projetos de lei, entre outros;



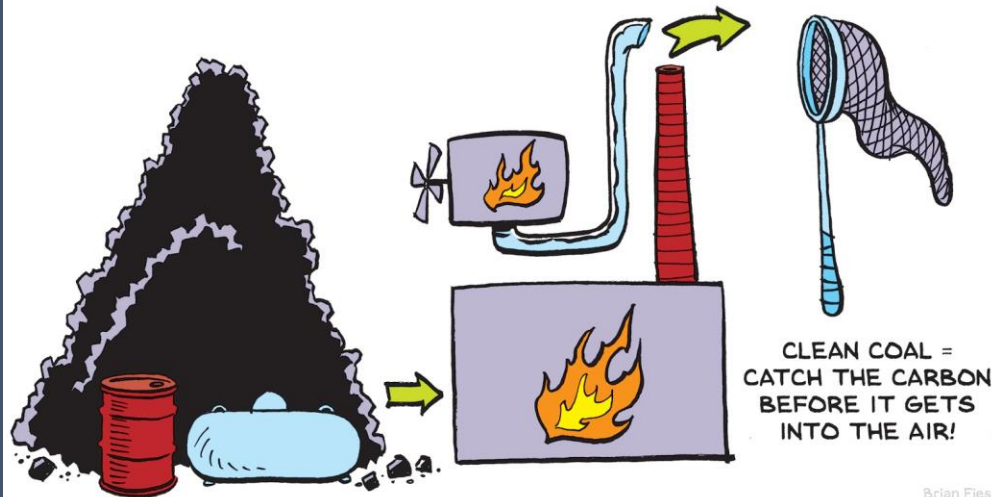
# Muito Obrigado pela Atenção!

## CLEAN COAL

**HYDROCARBONS**  
Hydrogen (H) + Carbon (C)  
Coal, oil, natural gas

**COMBUSTION**  
Add Oxygen (O) to  
burn hydrocarbons

**EXHAUST**  
H<sub>2</sub>O (water)  
CO (carbon monoxide)  
CO<sub>2</sub> (carbon dioxide)



Brian Fies

[robertoheemann@carboniferacatarinense.com.br](mailto:robertoheemann@carboniferacatarinense.com.br)