

DANIEL AUGUSTO HAGE TEIXEIRA

SEQUESTRO GEOLÓGICO DE CARBONO

**São Paulo
2011**

DANIEL AUGUSTO HAGE TEIXEIRA

SEQUESTRO GEOLÓGICO DE CARBONO

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Petróleo do curso de graduação do
Departamento de Engenharia de Minas e
de Petróleo da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Siguemasa Iramina

**São Paulo
2011**

RESUMO

O aumento dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera e as suas consequências estão entre os maiores alertas feitos pela comunidade científica atualmente. Grande parte das emissões desse gás para a atmosfera é proveniente da queima e da própria produção de combustíveis fósseis. Assim, o setor petrolífero tem uma responsabilidade por todas essas emissões, mas também possui uma oportunidade de colaborar com a redução dos níveis de gás carbônico emitido para a atmosfera e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas com o aumento do efeito estufa. Essa oportunidade está no sequestro de carbono, que consiste em processos de captura de dióxido de carbono e posterior armazenamento em formações e reservatórios adequados.

Esses processos podem ser realizados de várias maneiras e em diversas partes do mundo, inclusive no Brasil. O país é um dos maiores emissores de CO₂, uma das maiores economias do mundo e apresenta um destaque no cenário internacional crescente. Então, é importante o país se manter atualizado nas pesquisas sobre temas de desenvolvimento e crescimento econômico aliados com sustentabilidade ambiental e estar familiarizado com as tecnologias e conhecimentos mais recentes na área. Esse trabalho pretende contribuir nesse ponto, com uma análise das perspectivas de realização de projetos desse tipo nas bacias e campos de produção de petróleo no Brasil.

Palavras-chave: sequestro de carbono, captura e armazenamento de dióxido de carbono

ABSTRACT

Among the biggest alerts made by the scientific community there is the increasing of carbon dioxide concentration in the atmosphere. The greatest part of emissions comes from the production and burn of fossil fuels. Thus, the oil sector has responsibility for these emissions, but it also has the opportunity to cooperate with reduction of carbon dioxide levels and the mitigation of climate change effects caused by greenhouse effect. This opportunity lies within the carbon sequestration, it is made through carbon dioxide capture and its storage in adequate geological formations and reservoirs.

It is possible to perform these processes in many parts of the world, including Brazil. Brazil is one of the largest CO₂ emitters with one of the biggest economy standing out for its growth. Therefore it is important for the country to be updated about development and research efforts involving economic growth and sustainability being familiarized with the newest technologies and knowledge in the area. This study seeks to contribute in this aspect, with a perspective analysis on the realization of this kind of projects in Brazilian oil fields and basins.

Key words: carbon sequestration, capture and storage of carbon dioxide

Sumário

1.	Introdução	6
2.	Objetivos	8
3.	Materiais e métodos	8
4.	Técnica de sequestro de carbono	8
4.1	Captura	9
4.1.1	Pré-combustão	10
4.1.2	Pós-combustão	10
4.1.3	Oxcombustão	10
4.2	Compressão e transporte	10
4.2.1	Gasodutos ou carbodutos	10
4.2.2	Navios	10
4.3	Armazenamento e Monitoramento	11
5.	Armazenamento geológico	12
5.1	Aquíferos salinos	13
5.2	Camadas de carvão	14
5.3	Reservatórios exauridos de óleo e gás	14
5.4	Recuperação avançada de óleo e gás	14
5.5	Potencial brasileiro	16
5.6	Setor petrolífero brasileiro	17
5.6.1	Bacia de Campos	18
5.6.2	Bacia do Recôncavo	19
5.7	Riscos	20
5.7.1	Condições perigosas à saúde humana	21
5.7.2	Condições perigosas ao meio ambiente	21
5.7.3	Segurança e monitoramento	21
5.8	Alternativas de armazenamento	22
5.8.1	Armazenamento nos oceanos	22
5.8.2	Armazenamento mineral	22
5.8.3	Processos Industriais	22
6.	Perspectivas econômicas e custos	23
6.1	Captura	23
6.2	Transporte	23
6.3	Injeção e armazenamento	24
6.4	Custos totais	24
6.5	Panorama brasileiro	25
7.	Resultados e discussões	25

8. Conclusões	26
Bibliografia	27

1. Introdução

Uma das maiores preocupações do mundo atual está relacionada à questão ambiental. E, nesse contexto, o aumento dos níveis de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera e as conseqüentes mudanças climáticas vem sendo extensamente discutidas. Alguns dados comprovam que há motivos para se preocupar. Estudos demonstram a relação entre o aumento da temperatura terrestre e dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera, devido a ações do homem. As figuras abaixo mostram os aumentos do nível do gás na atmosfera e o aumento da temperatura média da superfície terrestre

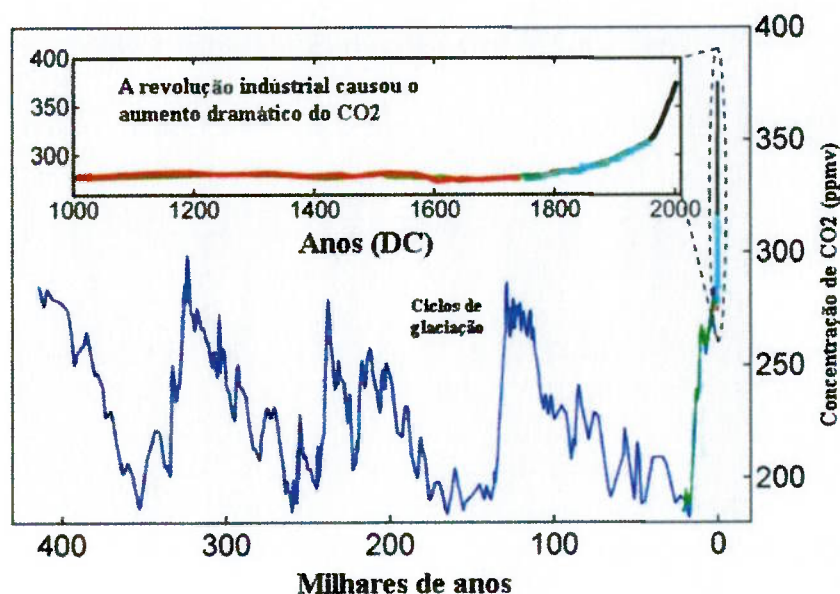


Figura 1: Variação da concentração de CO_2 na atmosfera durante os últimos 400 milhares de anos com base em amostras estratigráficas de gelo Fonte: Alterações climáticas e agricultura apud IPCC, 2007

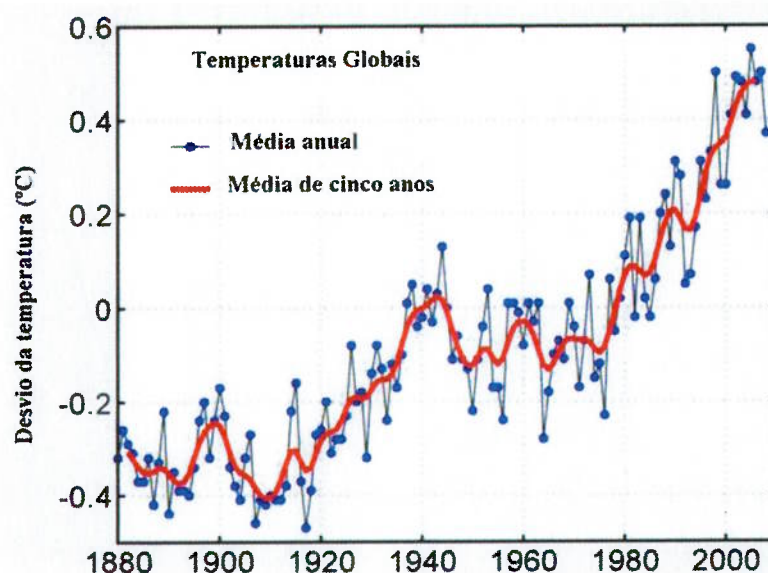


Figura 2: Evolução dos desvios da temperatura média global em relação ao período 1961-1990 de acordo com observações instrumentais Fonte: Alterações climáticas e agricultura apud IPCC, 2007

Como conseqüência das mudanças climáticas, a Organização Mundial de Saúde cita mais de 140 mil vítimas fatais em 2004, o que torna o assunto ainda mais importante.

Uma das principais fontes da emissão de dióxido de carbono é a queima de combustíveis fósseis, entre eles o petróleo, principal fonte de energia do mundo pós Revolução Industrial, cuja atividade exploratória já é uma atividade agressiva ambientalmente. No gráfico abaixo, podemos perceber que no ano de 2000, mais de 11% do dióxido de carbono emitido teve como fonte as atividades de produção e transporte de combustíveis fósseis.

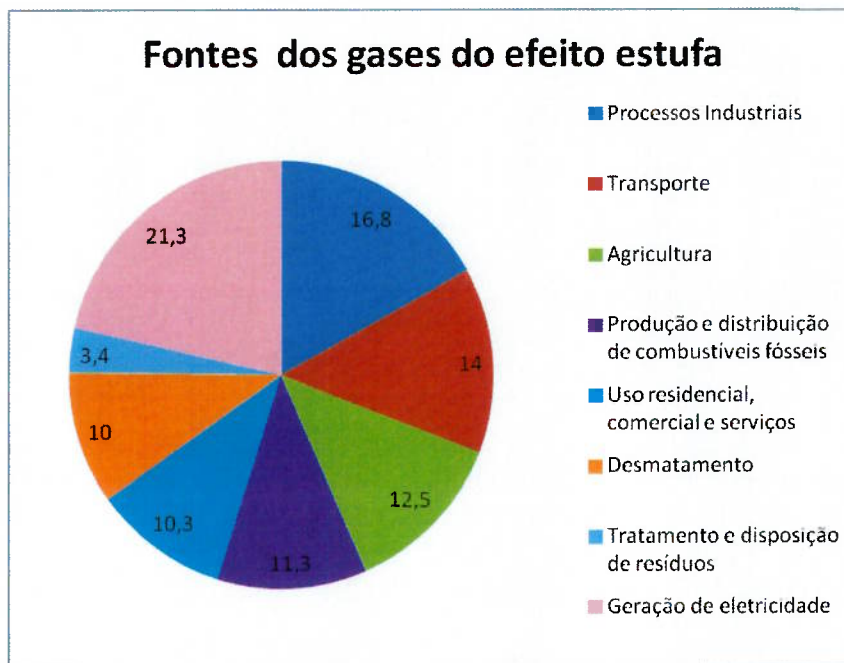


Figura 3: Fontes dos gases do efeito estufa no mundo em 2000 Fonte: Adaptado de Fundação Memorial apud IPCC, 2007

No Brasil, as principais atividades emissoras de gases do efeito estufa estão relacionadas ao desmatamento e agricultura. Porém, segundo dados do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), o país é responsável por 4,4% da emissão de dióxido de carbono na atmosfera sendo, assim, importante a preocupação com a redução e prevenção de emissões desse gás.

De acordo com reportagem divulgada no jornal O Globo, em 2005 as atividades de extração e transporte de petróleo e gás natural responderam por 0,8% das emissões brasileiras de CO₂. E o setor energético, que inclui refinarias de petróleo, termelétricas, carvoarias e destilarias de álcool combustível, corresponderam por 3,1%. Esses números podem parecer baixos, mas esses são os setores que mais aumentaram a emissão de CO₂ no período 1990 – 2005, ainda segundo a reportagem. Além disso, demonstram que ações de mitigação dessas emissões no ramo petrolífero podem ter um alto impacto na participação do setor nos níveis dos gases do efeito estufa na atmosfera. Isso, pensando-se apenas nos impactos diretos das atividades de exploração e logística de petróleo, não considerando as emissões oriundas da utilização de petróleo, gás natural e derivados.

A partir das informações apresentadas anteriormente, chega-se ao tema de interesse desse trabalho: Sequestro Geológico de Carbono. O principal objetivo da realização desse processo é a contribuição na estabilização da quantidade de gases do efeito estufa na atmosfera. Há ainda benefícios indiretos, como no caso de injeção do CO₂ em reservatórios de petróleo, em que há melhoria das taxas de recuperação.

2. Objetivos

Apesar de sua crescente importância, esse assunto ainda é pouco explorado no país. Os principais objetivos desse trabalho são discutir os métodos e técnicas de sequestro de carbono, os riscos e benefícios para a sociedade e, mais especificamente, para a indústria de petróleo, a fim de analisar o panorama brasileiro frente à viabilidade de realização desses processos, contribuindo para o desenvolvimento da área no Brasil.

3. Materiais e métodos

Foi realizada revisão bibliográfica de materiais produzidos em ambientes acadêmicos ou por comunidades científicas renomadas e reconhecidas pela qualidade e seriedade de seus trabalhos.

A estratégia de busca consistiu em procurar documentos acadêmicos já publicados no Brasil, para entender em que situação estão os trabalhos sobre o assunto no país e já colher informações. Além disso, foram buscadas publicações internacionais, para contribuir com a evolução e desenvolvimento do tema.

As palavras-chave utilizadas para essa pesquisa foram definidas dos principais pontos que seriam abordados no trabalho. Em geral, usou-se a combinação do termo “sequestro de carbono” com os pontos de interesse, sendo eles:

- Métodos e técnicas;
- Tecnologia;
- Viabilidade técnica e econômica;
- Situação brasileira, e;
- Riscos e benefícios.

Após a busca com alguns refinamentos para se chegar às informações pretendidas, os materiais foram analisados e formam a principal fonte para realização desse trabalho.

4. Técnica de sequestro de carbono

O termo “sequestro de carbono” é utilizado para definir os processos de captura, que envolvem a separação e captação do gás nas fontes industriais emissoras, transporte e armazenamento de dióxido de carbono em local isolado da atmosfera. Sequestro geológico, então, trata-se de armazenar o dióxido de carbono em rochas permeáveis da subsuperfície, conhecidamente os reservatórios de petróleo. Na figura 4, um esquema das etapas de sequestro de carbono e a seguir a descrição de cada uma delas.

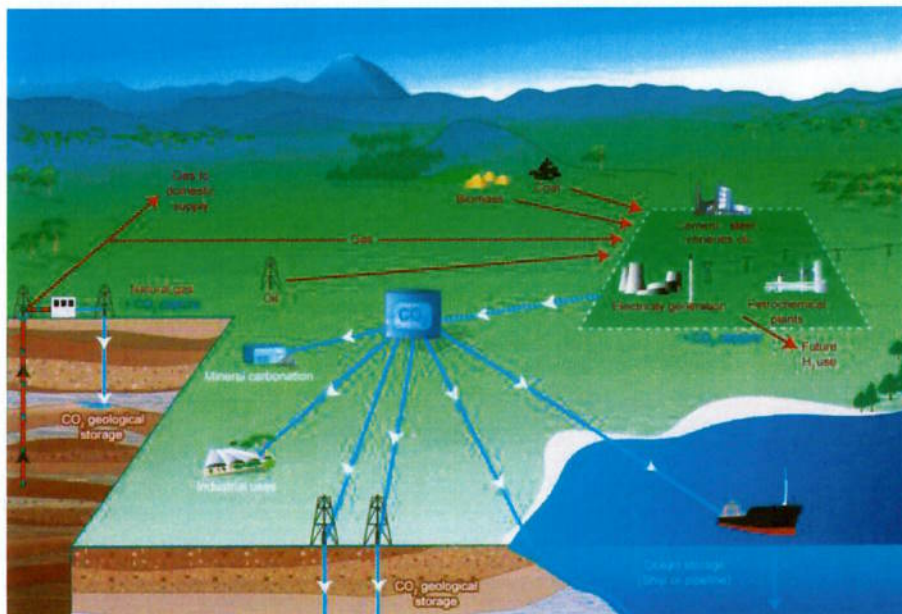


Figura 4: Diagrama esquemático de Sequestro de Carbono, identificando principais fontes e possíveis formas de armazenamento. Fonte: IPCC Special Report on Dioxide Carbon Capture and Storage 2005

4.1 Captura

Captura de carbono é referente aos processos naturais ou não de retirada de dióxido de carbono da atmosfera. A captura artificial para armazenamento geológico, que é o objeto desse trabalho, ocorre em grandes fontes emissoras, como plantas industriais e usinas de energia. Capturar o gás em pequenas fontes emissoras, como transportes, não é viável economicamente, pois esse setor representa uma parcela relativamente pequena do total de dióxido de carbono emitido para a atmosfera e tem tendência de diminuir sua participação nessa conta, com a substituição da forma de energia e dos combustíveis utilizados.

Há três principais sistemas para a captura de carbono: pré-combustão, pós-combustão e oxcombustão. Na figura 5, um esquema desses sistemas, que serão detalhados na sequência, ambos, figura e detalhamentos, segundo publicação do IPCC (2005).

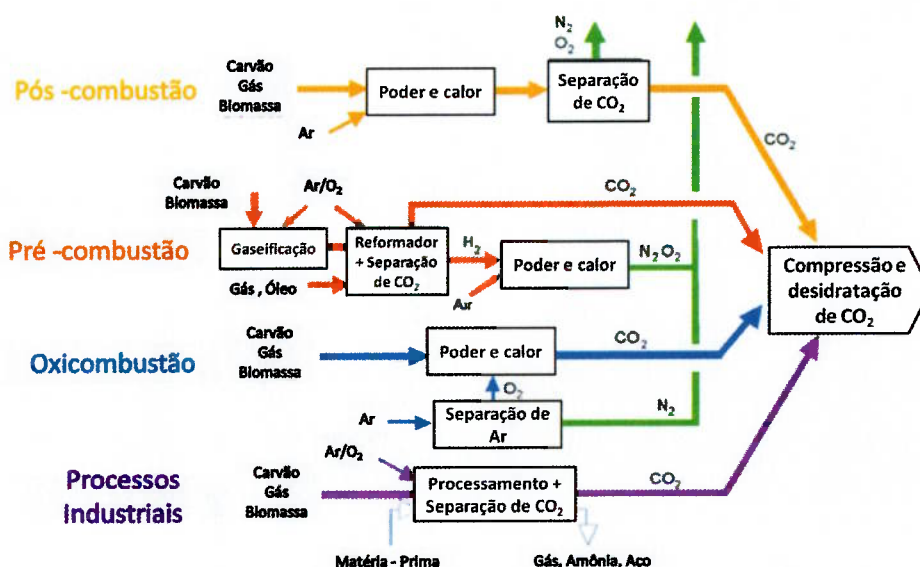


Figura 5: Sistemas de captura de carbono Fonte: Adaptado de IPCC Special Report on Dioxide Carbon Capture and Storage 2005 apud BP

4.1.1 Pré-combustão

Termo utilizado para designar a captura do dióxido de carbono antes da queima de combustível. Trata-se de um processo de reação do combustível com ar ou oxigênio, para geração de gás combustível, composto por monóxido de carbono e hidrogênio. O monóxido de carbono então reage cataliticamente com vapor, gerando CO_2 e mais hidrogênio. O hidrogênio gerado é usado como combustível para diversos fins, enquanto o dióxido de carbono gerado está pressurizado, consistindo em uma vantagem para esse tipo de processo. A desvantagem seria que esse método só pode ser utilizado em novas plantas que possuem o sistema de gaseificação, ainda muito caro (Leal da Costa, 2009 apud Figueroa, 2008).

4.1.2 Pós-combustão

Esse método baseia-se na coleta do dióxido de carbono gerado na combustão, ao invés de liberá-lo para a atmosfera. Há a necessidade de separação do CO_2 , que sai em concentração relativamente baixa e baixa pressão também, o que é uma grande desvantagem, pois ele terá que ser comprimido para poder ser transportado. Uma vantagem é a facilidade de aplicação do processo.

4.1.3 Oxicombustão

Nessa forma de captura, para a combustão é utilizado oxigênio aproximadamente puro, gerando um combustível formado basicamente por CO_2 e H_2O . A reação de combustão na presença de O_2 resultará em um gás com alta concentração de CO_2 , uma vantagem para a captura. A desvantagem fica por conta dos custos de obtenção do gás oxigênio puro.

4.2 Compressão e transporte

O dióxido de carbono pode ser transportado sólido, líquido ou gasoso. A melhor opção é a compressão do gás a uma faixa de 1000 a 3000 psi (Esteves e Morgado, 2010 apud Barrie, 2004). Isso porque o gás a pressão atmosférica ocupa muito espaço e a solidificação do dióxido de carbono apresenta altos custos, que poderia inviabilizar o processo. Há dois principais meios de transporte de dióxido de carbono encontrados nas bibliografias: gasodutos e navios.

4.2.1 Gasodutos ou carbodutos

O dióxido de carbono é transportado nos gasodutos no estado líquido. Ele deve ser comprimido no início de trajeto, mas no caso de trajetos muito longos, pode haver a necessidade de compressores intermediários (IPCC, 2005). A tecnologia utilizada é similar a de transporte de gás natural.

As características do gás dependem da tubulação e dos lugares por onde ela passará. O gás deve ser desidratado para evitar corrosão e, no caso em que os dutos passem próximos a áreas povoadas, deve haver restrições quanto ao uso de H_2S na tubulação (Leal da Costa et al., 2009). O projeto dos carbodutos deve levar em consideração alguns parâmetros, tais como: pressão de sucção, energia para compressão, comprimento da tubulação, espessura da tubulação, diâmetro da tubulação e queda de pressão ao longo da tubulação (Leal da Costa apud Koorneef et al., 2008).

4.2.2 Navios

O transporte de dióxido de carbono em navios é similar ao de gás liquefeito de petróleo. Nesse caso, o que deve ser levado em consideração é a necessidade de armazenamento do gás, pois a produção de dióxido de carbono e captura se dá de forma contínua, enquanto o transporte por navios é discreto. O planejamento do processo deve levar

em consideração a taxa de captura de CO₂, a distância do transporte e restrições técnicas e sociais (IPCC, 2005).

4.3 Armazenamento e Monitoramento

Esses dois tópicos foram colocados juntos porque o monitoramento é a garantia de que o gás permanece armazenado. Na figura 6, mostrada a seguir, locais onde a tecnologia de armazenamento é utilizada ou há planejamento de instalação. O armazenamento geológico, dada a sua importância e a sua grande interface com Engenharia de Petróleo, será mais bem detalhada no item 5 desse trabalho.

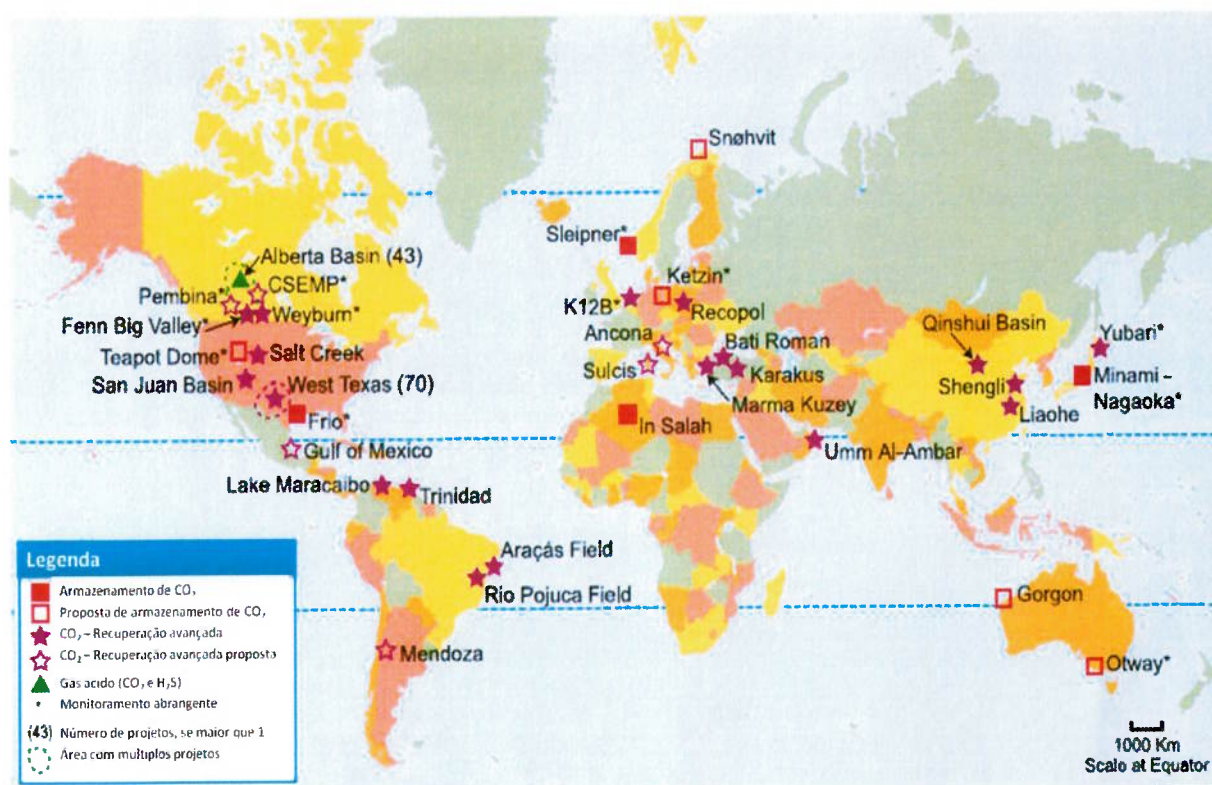


Figura 6: Áreas com armazenamento relevante de dióxido de carbono Fonte: Adaptado de IPCC Special Report on Dioxide Carbon Capture and Storage 2005

O monitoramento é a garantia de que não há riscos de vazamento e, consequentemente, ao meio ambiente. Diversos tipos de sistema de monitoramento devem ser utilizados (Esteves e Morgado, 2010):

- Monitoramento da vazão e pressão de injeção;
- Monitoramento da distribuição de CO₂ no subsolo;
- Monitoramento da integridade dos poços de injeção;
- Monitoramento dos efeitos locais sobre o meio ambiente e
- Monitoramento através de uma rede de sensores colocados em pontos distantes dos locais de injeção.

5. Armazenamento geológico

Armazenamento geológico é a injeção em uma formação rochosa profunda e adequada (IPCC, 2005). As principais formas de armazenamento geológico podem ser observadas na figura 7.

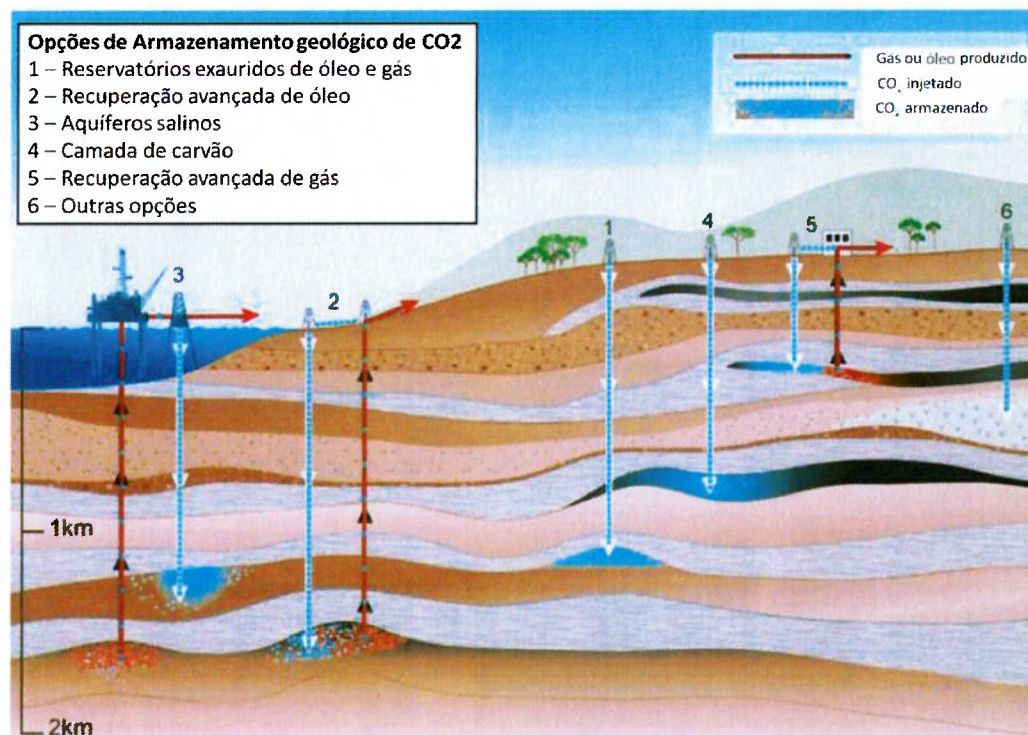


Figura 7: Armazenamento de dióxido de carbono em formações geológicas Fonte: Adaptado de IPCC Special Report on Dioxide Carbon Capture and Storage 2005

As formações adequadas serão descritas nessa seção, bem como um estudo sobre o potencial das principais bacias brasileiras da realização desse processo. O potencial de cada tipo de reservatório para armazenamento encontra-se na tabela abaixo:

Tabela 1: Estimativa de capacidade de armazenamento de carbono (Ravagnani e Suslick, 2008)

Local de armazenamento	Capacidade Mundial (estimativa de ordem de grandeza) em GtC*
Oceanos	1000 a 10000
Aquíferos salinos	100 a 10000
Reservatórios de óleo e gás	100 a 1000
Camadas de carvão	10 a 1000
Terrestre	10 a 100
Utilização	Menos de 0,1 GtC/ano

*1GtC = 1 bilhão de toneladas de carbono = 3,7 GtCO₂

5.1 Aquíferos salinos

Apresentam, provavelmente, o maior potencial de armazenamento geológico de carbono por apresentarem maiores volumes (Herzog e Golomb, 2004). São formações porosas que contêm enormes quantidades de água imprópria para consumo humano ou uso na agricultura. As salmouras presentes nessas formações possuem usos industriais e o crescente uso potencial de energia geotérmica dessas fontes para tornar inviável o armazenamento de carbono nessas áreas (IPCC, 2005).

Uma desvantagem do armazenamento em aquíferos salinos é a não produção de outro produto para compensar o custo, como ocorre com a injeção em reservatórios de petróleo. Porém, já existem projetos e pesquisas em estágio avançado. O caso mais citado nas bibliografias é o Projeto Sleipner, no Mar do Norte, operado pela Statoil. Trata-se de um projeto comercial pioneiro no armazenamento geológico em formações salinas, que teve início em 1996 e que até o ano de 2005 já havia armazenado 7 MtCO₂, uma taxa de aproximadamente 2700 toneladas por dia (IPCC, 2005). Na figura 8, um diagrama simplificado desse projeto. A injeção de carbono se dá em um arenito não consolidado, em uma profundidade entre 800 e 1000 metros. E é possível observar que os sistemas de produção e injeção são independentes.

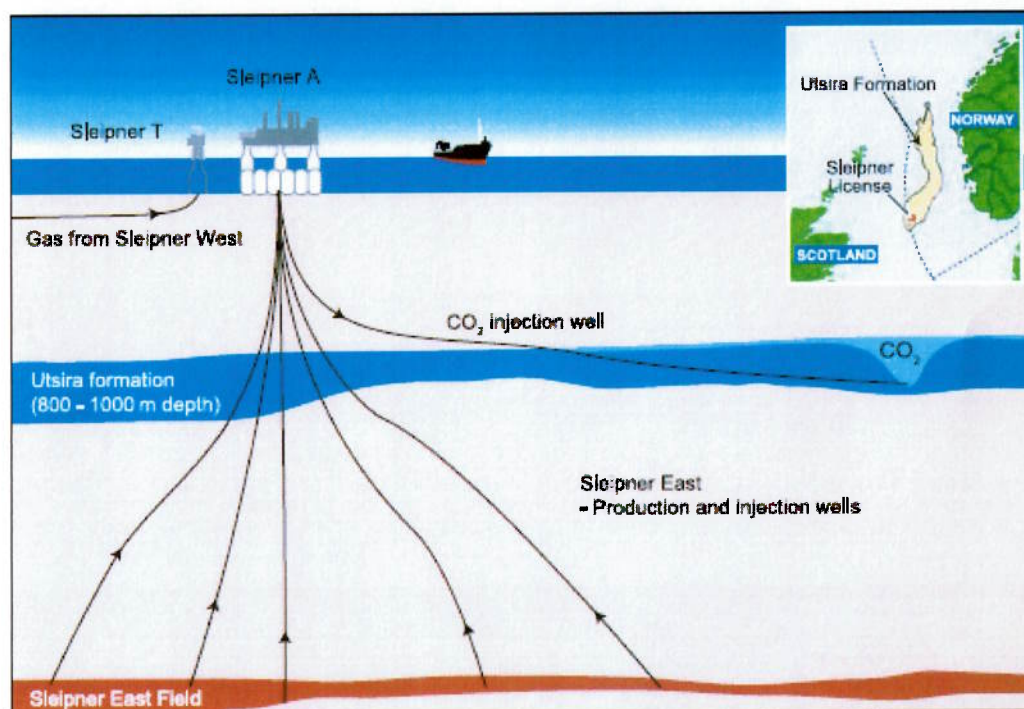


Figura 8: Diagrama do Projeto de Armazenamento de CO₂ Sleipner Fonte: IPCC Special Report on Dioxide Carbon Capture and Storage 2005

Há alguns critérios que devem ser obedecidos para esse tipo de armazenamento: o topo do reservatório deve estar abaixo de 800 metros de profundidade, sendo que dessa forma o dióxido de carbono será menos denso que os fluidos da formação e terá a tendência natural do CO₂ de subir para o topo nesses reservatórios, sendo assim necessária a presença de alguma estrutura (trapa) que mantenha o gás armazenado (IPCC, 2005). Há três formas de manter o fluido armazenado (Herzog e Golomb, 2004): hidrodinâmico, no qual o CO₂ pode ficar armazenado sob as trapas de baixa permeabilidade, por solubilidade, que é quando o CO₂ fica armazenado solubilizado nos fluidos da formação, ou mineral, que é quando há reação com os minerais ou com matéria orgânica.

5.2 Camadas de carvão

Esse método ocorre em camadas de carvão que não podem ser exploradas economicamente. Para a viabilização do processo de injeção e armazenamento em camadas de carvão é necessário a associação com produção de metano (Herzog e Golomb, 2004). Há essa necessidade porque o carvão é poroso e possui gases adsorvidos nesses espaços, sabidamente o metano. O dióxido de carbono possui maior afinidade com o carvão, substituindo o metano, que é então liberado. Esse metano também contribui com o efeito estufa, de forma ainda mais forte que o dióxido de carbono, ou seja, sua liberação para a atmosfera no lugar do CO₂ é ainda mais nociva.

Uma vez adsorvido no carvão, o dióxido de carbono permanecerá armazenado, a menos que haja mudanças de temperatura ou pressão. O armazenamento do gás no carvão para temperaturas e pressões acima dos pontos críticos ainda não é bem conhecido (IPCC, 2005).

5.3 Reservatórios exauridos de óleo e gás

São reservatórios de óleo e gás esgotados ou em vias de esgotamento. São os grandes candidatos ao armazenamento de dióxido de carbono. Apresentam algumas desvantagens, como a exploração com poços, que comprometem a integridade do selo, e a capacidade limitada (Ravagnini e Suslick). Porém, existem algumas vantagens que tornam esse armazenamento muito interessante (IPCC, 2005):

- Possibilidade de aumentar a taxa de recuperação de óleo e gás no início das operações de armazenamento;
- A capacidade de armazenamento, comprovada pelo fato de haver originalmente gás e óleo aprisionados no reservatório;
- As propriedades e características desses reservatórios são amplamente estudadas e conhecidas;
- Há modelos matemáticos desenvolvidos na indústria de petróleo para prever o movimento e comportamento dos fluidos nesses locais e
- A infraestrutura presente no local, como poços, podem ser utilizadas para a injeção de CO₂.

O dióxido de carbono se solubiliza no óleo, tornando-o menos viscoso facilitando sua recuperação. Mas boa parte do óleo permanecerá no reservatório, mantendo o CO₂ dissolvido armazenado. Quanto às características do reservatório para viabilizar o armazenamento, preciso um mínimo de 15% de porosidade e isolamento de áreas produtoras e zonas de água (Herzog e Golomb, 2004).

5.4 Recuperação avançada de óleo e gás

O mais rentável processo de armazenamento, pois aumenta a produção de óleo e gás de um reservatório. A média de aumento da taxa de recuperação é de 13% do total de hidrocarbonetos presentes no início da produção (IPCC, 2005). Na figura 9, há um esquema do funcionamento do processo. O CO₂ é injetado através de poços de injeção nas proximidades de poços produtores. O óleo e o dióxido de carbono não são naturalmente miscíveis, assim a pressão do reservatório no início do processo de injeção é um importante fator de escolha de reservatórios candidatos a esse processo. Se a condição de pressão mínima de 200 psi for obedecida, além de características como pureza do CO₂, temperatura e composição do óleo (IPCC, 2005 apud Medcalfe, 1982) favoráveis, o processo é realizado.

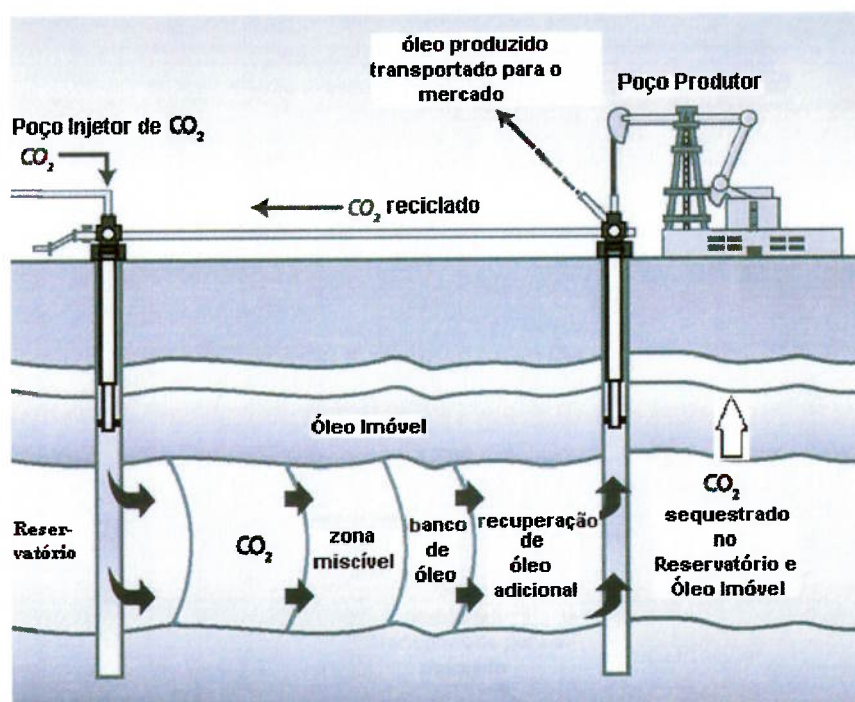


Figura 9: Representação esquemática da recuperação avançada de óleo Fonte: Ravagnini e Suslick, 2008

O funcionamento do processo acontece pela formação de uma mistura entre o CO_2 injetado e o óleo do reservatório, formando um líquido que flui com mais facilidade. Caso o dióxido de carbono seja injetado a uma pressão menos que a de miscibilidade, ele irá ajudar a empurrar o óleo em direção ao poço produtor, aumentando a produção por um mecanismo diferente do citado anteriormente. Boa parte do gás injetado é produzida junto com o óleo, mas uma porção já permanecerá armazenada. Esse gás é então separado e reinjetado, dando continuidade ao processo e impedindo o retorno do dióxido de carbono à atmosfera (Ravagnini e Suslick, 2008).

Para tratar da recuperação avançada de gás, a seguir há um exemplo de um *joint venture* entre Sonatrach, BP e Statoil na Argélia, citada em IPCC, 2005. Foi o primeiro projeto em larga escala de armazenamento de CO_2 em reservatórios de gás. Na figura 10, uma representação esquemática do Projeto de Gás In Salah.

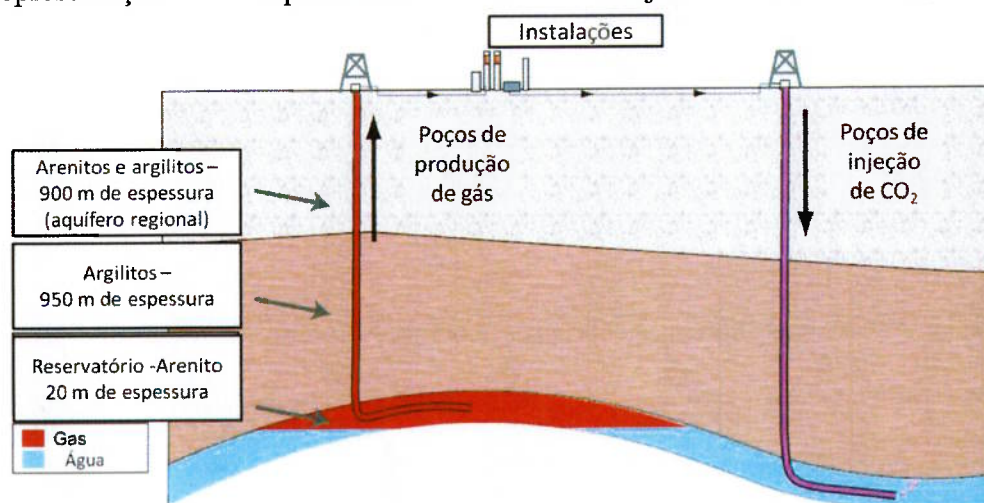


Figura 10: Esquemática do Projeto de Gás In Salah, Argélia. Fonte: Adaptado de IPCC Special Report on Dioxide Carbon Capture and Storage 2005

Esse reservatório produz gás natural com 10% de dióxido de carbono, que é separado e então reinjetado. O projeto tem 4 poços produtores e 3 poços injetores, foi iniciado em abril de 2004 e tem previsão de armazenar 17 MtCO₂ (IPCC, 2005).

5.5 Potencial brasileiro

O Brasil vem rapidamente se tornando uma potência emergente no setor petrolífero. Além de possuir tecnologias avançadas na prospecção de petróleo em alto mar, as recentes descobertas e o histórico de exploração nas bacias de Campos e do Recôncavo abrem boas perspectivas para a realização de armazenamento geológico de dióxido de carbono.

A injeção de CO₂ para melhorar a recuperação secundária em reservatórios de petróleo é utilizada no nordeste desde 1987 (Leal da Costa, 2009), sendo mais uma evidência da viabilidade desses processos no Brasil. Para entender quais bacias brasileiras tem potencial para realização desse processo, deve-se cruzar a capacidade dos reservatórios dessas bacias com as principais áreas emissoras de dióxido de carbono. Na figura 11, as principais fontes emissoras no Brasil e na figura 12 as bacias brasileiras.

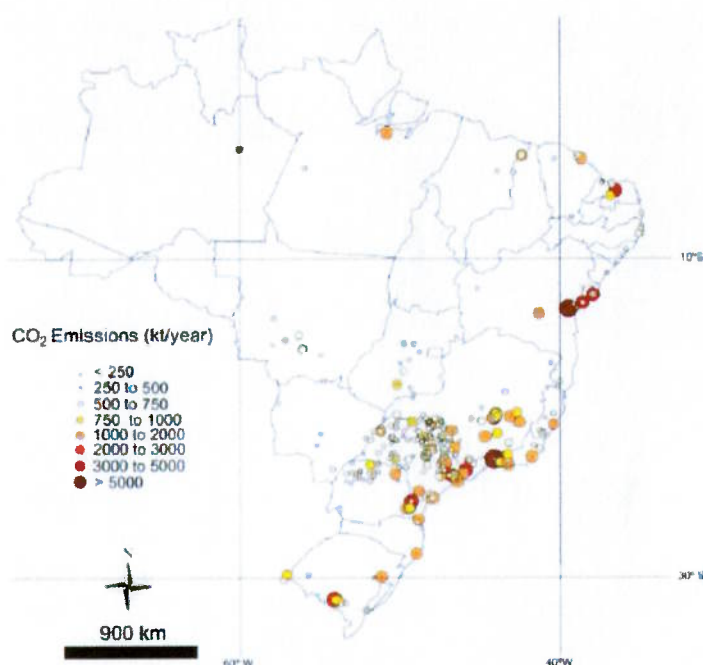


Figura 11: Mapa de emissões no Brasil Fonte: Leal da Costa, 2009 apud Ketzer, 2007



Figura 12: Bacias brasileiras Fonte: Leal da Costa, 2009 apud Ketzer, 2007

Como esperado, as emissões estão concentradas na região sudeste. Dessa forma, as bacias com maior potencial são as Bacias de Campos, a Bacia do Recôncavo, Bacia do Paraná e Bacia de Santos. Outro aspecto importante a ser levado em consideração, além do aspecto da localização, é a capacidade de armazenamento de cada bacia. Essa característica pode ser observada na figura 13.

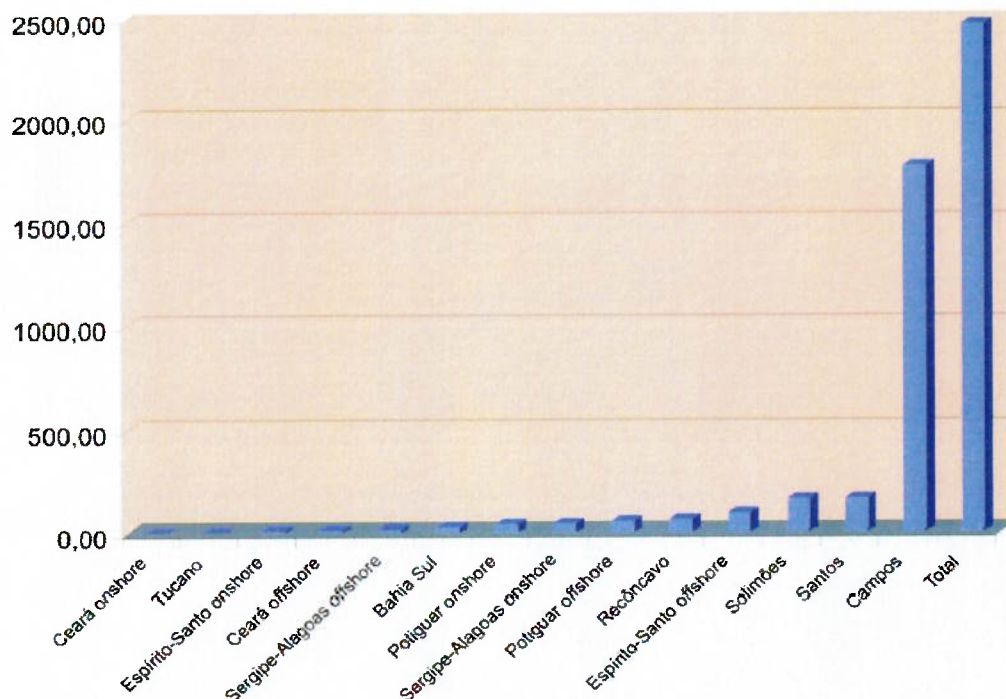


Figura 13: Capacidade de Armazenamento de Mt CO₂ nas bacias sedimentares Fonte: Leal da Costa, 2009 apud Ketzer, 2007

Esse gráfico reforça as conclusões anteriores, porque podemos observar que as bacias citadas como potenciais por estarem próximas às principais emissões no Brasil possuem alta capacidade de armazenamento. A bacia do Solimões merece destaque também, segundo esse gráfico, pois é a terceira maior bacia brasileira em capacidade de armazenamento.

Assim com o cruzamento dos dados, chega-se a conclusão que as bacias brasileiras em que o processo de armazenamento geológico de CO₂ apresenta resultados satisfatórios são Campos, Santos, Solimões, Recôncavo e Paraná (Leal da Costa, 2009 apud Ketzer, 2007). Em todas as bacias os aquíferos salinos são uma opção e os campos de exploração de petróleo só alternativas viáveis nessas bacias, com exceção da Bacia do Paraná, que tem a opção de camadas de carvão, diferentemente dos demais (Leal da Costa, 2009).

5.6 Setor petrolífero brasileiro

No item anterior, a análise baseou-se nas emissões de dióxido de carbono e no potencial de armazenamento do gás nas bacias. Nesse item, o estudo será focado no setor petrolífero do Brasil e nas duas bacias mais exploradas para esse fim: Campos e Recôncavo. O foco será o armazenamento em campos de óleo e gás no Brasil.

5.6.1 Bacia de Campos

Segundo a Petrobrás, essa bacia é responsável por 84% da produção de óleo e gás em território nacional. A localização geográfica e os campos explorados podem ser vistos na figura 14.

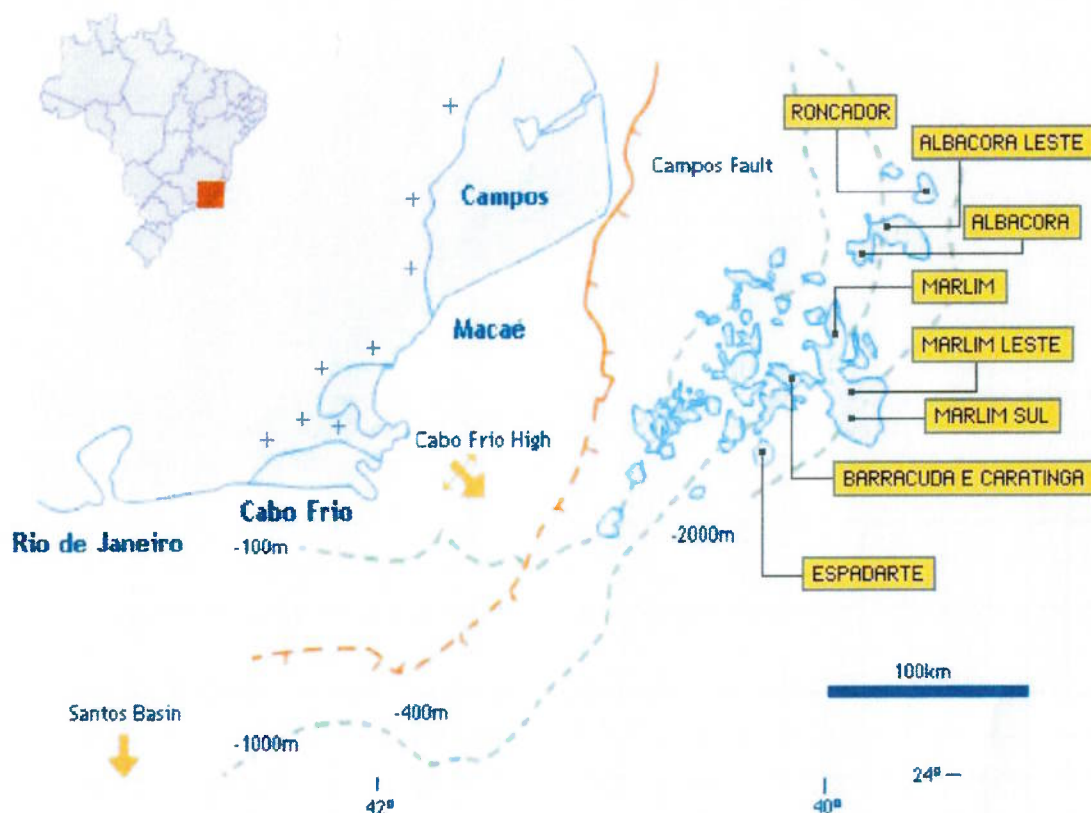


Figura 14: Bacia de Campos Fonte: Leal da Costa, 2009 apud Petrobrás

Por ser uma bacia amplamente explorada, encontra-se em estado maduro, ou seja, os custos para injeção e armazenamento são relativamente baixos, pois já há uma infraestrutura instalada. A produção de CO₂ nessa bacia proveniente das atividades de exploração é baixa, mas dado seu potencial de armazenamento, CO₂ de outras fontes pode ser injetado.

Os campos com maior capacidade de armazenamento de CO₂, representando 75% do total, são Roncador, Marlim, Albacora e Barracuda (Rockett, 2010). Mas considerando o transporte até os pontos de injeção, temos uma mudança nessa perspectiva, isso porque o Roncador é considerado de baixa potencialidade no quesito captura e transporte, apesar de sua grande capacidade. De acordo com Leal da Costa (2009, apud Letzer, 2007) o potencial total de armazenamento dessa bacia é de 90 MtCO₂ por ano, valor três vezes maior que a quantidade de dióxido de carbono emitida anualmente na Bacia de Campos.

5.6.2 Bacia do Recôncavo

Bacia brasileira explorada há mais de 60 anos (Rockett e Ketzer, 2008), apresentando-se em estágio maduro de exploração. A localização geográfica da bacia pode ser vista na figura 15.

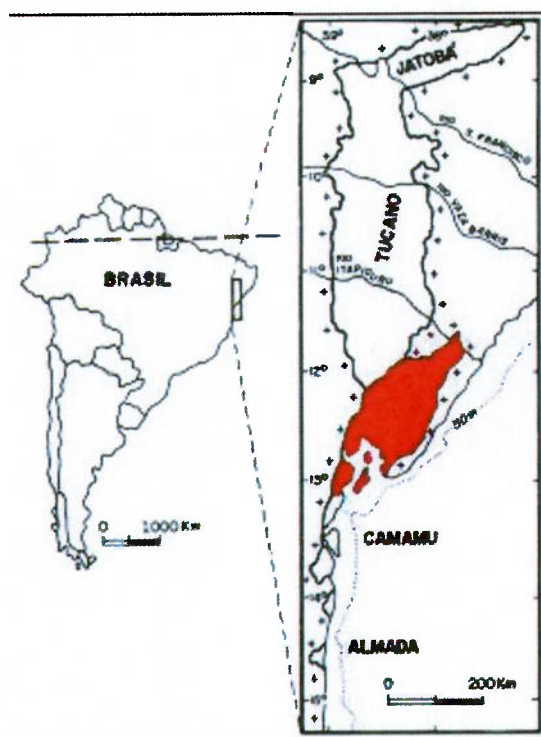


Figura 15: Bacia do Recôncavo Fonte: Rockett, 2008 apud Figueiredo, 1994

Apesar de ter uma capacidade de armazenamento menos que da Bacia de Campos, sua importância nessa área se dá porque desde 1987 já há injeção de CO₂ em processos de recuperação de óleo e gás. Um pequeno histórico de injeção nessa bacia pode ser observado na tabela 2.

Tabela 2: Histórico de injeção de dióxido de carbono na Bacia do Recôncavo

Campo	Ano de início	Volume injetado (tCO ₂)
Araçás	1987	25.430
Buracica	1991	663.981
Rio Pojuca	1999	71.876

Fonte: Leal da Costa, 2009 apud Rocha, 2007

Como é possível perceber, mais que potencial, o Recôncavo tem um histórico de utilização do processo. Por essa iniciativa, servindo de exemplo para outras aplicações no país, deve ser considerada como uma boa alternativa para realização de processos de armazenamento. No item 5.5, essa bacia aparecia como de menor potencial frente a outras, como Campos, Santos e Paraná, devido à localização geográfica e capacidade de armazenamento. Mas em critérios como desenvolvimento, pesquisa, conhecimento e tecnologia, essa bacia apresenta uma experiência que a dá destaque no cenário nacional.

5.7 Riscos

Risco é o produto da probabilidade da ocorrência pelo impacto causado pelas consequências. Os riscos nos processos de armazenamento geológico dependem de algumas características do projeto, que irão determinar quais riscos devem ser considerados. Algumas características são (Esteves e Morgado, 2010):

- Tecnologia de separação;
- Vazão de separação e injeção;
- Distância entre o local onde se dá a separação e o local de injeção;
- Finalidade da injeção;
- Características do reservatório utilizado para o armazenamento;
- Tecnologia de monitoramento e
- Substâncias que formam o gás a ser injetado.

Uma vez armazenado, é importante que haja a responsabilidade por garantir que o CO₂ injetado permanecerá no reservatório. Ou seja, faz-se necessário uma regulamentação e um licenciamento para esse tipo de atividade, garantindo a credibilidade, sustentabilidade e segurança do processo. Abaixo, exemplos de potenciais rotas de fuga do CO₂ armazenado:

Tabela 3: Mecanismos de escape e medidas preventivas Fonte: Baseado em de IPCC Special Report on Dioxide Carbon Capture and Storage 2005

Identificação na figura 16	Mecanismo de escape	Medida preventiva
A	Pressão do CO ₂ excede pressão capilar e o gás passa pela rocha selante	Extrair e purificar as águas subterrâneas
B	CO ₂ vaza de A até uma falha	Extrair e purificar as águas subterrâneas
C	CO ₂ escapa pelo “gap” no selo até o aquífero em ponto mais alto	Remover o CO ₂ e reinjetar em outro lugar
D	Migração do CO ₂ aumenta pressão do reservatório e permeabilidade da falha	Menores pressões ou taxas de injeção
E	CO ₂ escapa por poços abandonados mal conectados	Recimentação do poço
F	Fluxo natural dissolve o CO ₂ na água e o transporta para fora do reservatório	Interceptação e reinjeção do CO ₂
G	CO ₂ dissolvido escapa para o oceano ou atmosfera	Interceptação e reinjeção do CO ₂

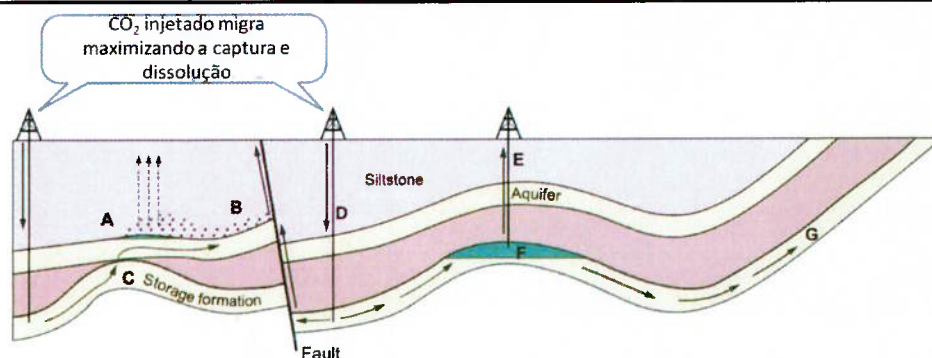


Figura 16: Potenciais rotas de fuga Fonte: Adaptado de de IPCC Special Report on Dioxide Carbon Capture and Storage 2005

Essa preocupação se deve ao fato de que o dióxido de carbono não é nocivo apenas para o clima terrestre e para o meio ambiente, mas pode ser também perigoso para os seres vivos. Mesmo que a probabilidade de vazamento seja pequena, a análise deve ser feita, pois as consequências podem ser graves. A seguir, algumas informações, segundo IPCC (2005), sobre os riscos de falhas nesse processo e alguns impactos que isso geraria.

5.7.1 Condições perigosas à saúde humana

Os riscos à saúde humana se referem a altas concentrações do dióxido de carbono em ambientes fechados. O CO_2 é um gás asfixiante e pode ser fatal em concentrações muito altas. Há relatos de mortes ocorridas devido ao desprendimento rápido de gás carbônico para a atmosfera em uma região.

Um dos casos diz respeito ao Lago Nyos, em Camarões, no ano de 1986. Trata-se de uma região com atividade vulcânica que favorece o aprisionamento de CO_2 no fundo do lago. Quando o gás chegou em seu nível de saturação, ele começou a se desprender e houve uma explosão, emitindo enormes quantidades de dióxido de carbono para a atmosfera. Mais de 1500 pessoas morreram devido a esse acontecimento. Esse é um exemplo de situação natural que ocasionou grandes danos locais e que demonstra que deve haver preocupação para que não haja vazamento do gás armazenado e com as consequências desse vazamento

5.7.2 Condições perigosas ao meio ambiente

O vazamento terrestre pode afetar fauna e flora que o dióxido de carbono tenha contato, especialmente animal e plantas de solo raso e microorganismos de subsuperfície. Vazamento em ambiente marinho terá consequências similares, com a mudança regional do pH da água.

As mudanças químicas que o dióxido de carbono causa na água são um problema não só no mar, mas também em aquíferos. A mudança no pH, tornando-a mais ácida, pode trazer a dissolução de metais tóxicos, sulfatos e cloretos, afetando o uso de água potável e para a agricultura.

5.7.3 Segurança e monitoramento

Na seção 4.3, o assunto monitoramento já foi abordado. Aqui, serão apresentados alguns sistemas de monitoramento, item fundamental para garantir a segurança no processo e da região próxima aos locais de armazenamento do gás. Esses sistemas são apresentados na figura 17.

É possível observar que muitos sistemas são derivados de atividades realizadas, ou seja, não exigem novos equipamentos, apenas novas análises de levantamentos realizados com frequência na indústria do petróleo. Mas há também instrumentos específicos para a medição contínua do gás, garantindo a detecção rápida e a tomada de medidas mitigadoras antes de ocorrências de maior impacto.

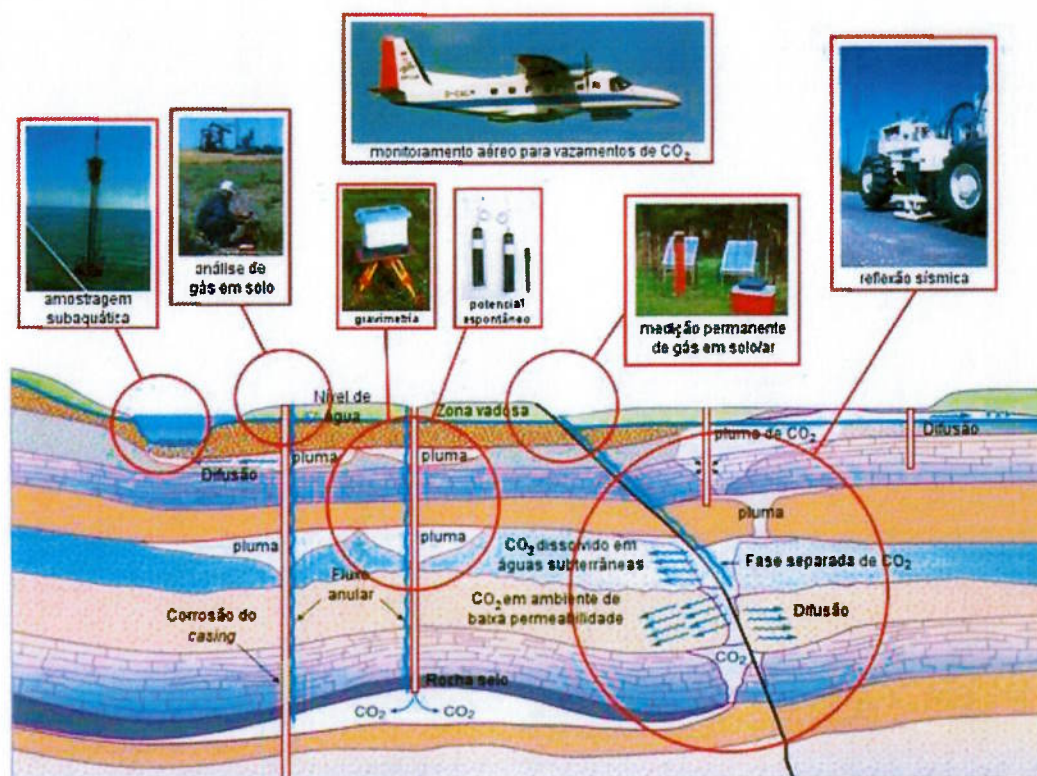


Figura 17: Sistemas de monitoramento Fonte: CEPAC, PUCRS

5.8 Alternativas de armazenamento

Além do armazenamento geológico, há outras possibilidades para a captura de dióxido de carbono. Algumas delas serão descritas sucintamente nesse trabalho.

5.8.1 Armazenamento nos oceanos

Uma grande oportunidade também. A técnica consiste em injetar o dióxido de carbono comprimido a profundidades maiores que 3 km, pois ele seria mais denso que a água e haveria a formação dos chamados lagos de CO₂ (IPCC, 2005). O gás pode permanecer armazenado dessa forma por séculos, porém há a tendência de equilíbrio entre o mar e a atmosfera, de forma que não haverá uma mudança permanente na composição da atmosfera.

Outra possibilidade levantada, ainda em estudo, é a fertilização oceânica com ferro, por exemplo. O crescimento do fitoplâncton marinho aumentaria a captura de gás carbônico da atmosfera (Herzog e Golomb, 2004). Trata-se de um método biológico de captura de carbono.

5.8.2 Armazenamento mineral

Há alguns minerais na natureza que reagem com o CO₂, formando estruturas estáveis que armazenarão permanentemente o gás. Alguns são silicatos de magnésio e cálcio possuem essa característica. O desafio envolvido nesse processo é a velocidade da reação, que ocorre naturalmente, mas de maneira muito lenta. Para se tornar viável economicamente, essa velocidade de reação precisa ser aumentada (Herzog e Golomb, 2004).

5.8.3 Processos Industriais

Alguns processos industriais possuem o dióxido de carbono como matéria-prima. Assim, o gás pode ser consumido para a produção de bens industrializados, tais como borracha vulcanizada, espuma de poliuretano e policarbonatos (Herzog e Golomb, 2004).

6. Perspectivas econômicas e custos

Nesse capítulo, serão analisados os aspectos econômicos da implantação de sequestro de carbono, tendo como base estudos nos projetos comerciais já realizados e nos principais processos realizados, citados anteriormente.

6.1 Captura

O maior componente do custo, principalmente quando se considera, além da captura, a compressão. Há tecnologias disponíveis para realização desses processos viáveis economicamente, porém eles ainda não estão completamente adaptados para otimizar sua utilização na captura e compressão de CO₂ para fins de armazenamento (Herzog e Golomb, 2004). Um ponto importante a ser considerado é o consumo de energia para realização dessa etapa. O consumo de energia irá aumentar e, com isso, a produção do gás que o processo pretende evitar na atmosfera. Para isso, deve se considerar o balanço de CO₂ produzido por esse acréscimo de necessidade de energia, pelo total capturado, para se saber efetivamente a quantidade de gás que o processo está evitando que seja emitido para a atmosfera. A figura 18 demonstra esse balanço.

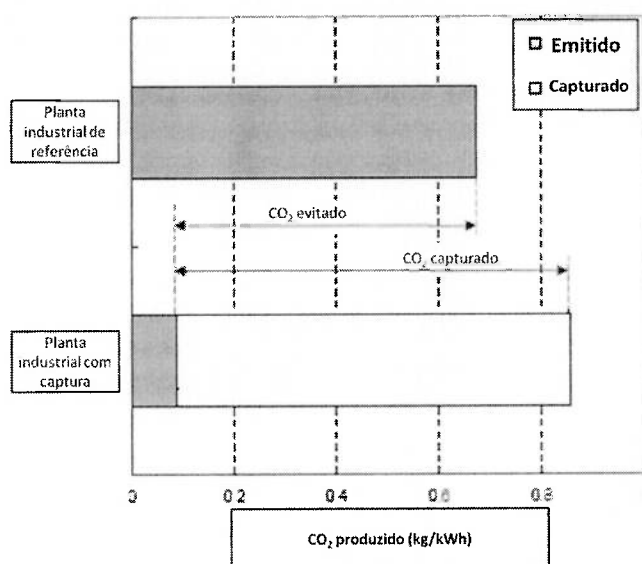


Figura 18: Representação gráfica do CO₂ evitado Fonte: Adaptado de IPCC Special Report on Dioxide Carbon Capture and Storage 2005

Considerando agora os custos dos processos de captura e compressão do dióxido de carbono. Devido a uma grande variedade de sistemas e tecnologias empregados, uma estimativa de custos deve levar em consideração muito parâmetros. Para citar como exemplo, em uma planta petroquímica, o custo com a tecnologia atual utilizada é entre 50 e 60 US\$/tCO₂ (IPCC, 2005).

6.2 Transporte

Os custos de transporte são referentes às tubulações que compõe os carbidutos e dos sistemas de transporte marinho. Os custos dos gasodutos são divididos em custos de construção, levando em consideração material e instalações, e manutenção, com monitoramento e possíveis gastos com energia (Herzog e Golomb, 2004). Além disso, o terreno em que os tubos são instalados interfere nos custos. Dutos que passam por regiões populosas podem custar até o dobro se comparado com outras áreas (IPCC, 2005).

No transporte por navios, os custos são para armazenamento temporário, equipamentos de carga e descarga. Um navio adequado para o transporte de CO₂ pode custar entre 30 e 50% a mais que um navio de tamanho similar (IPCC, 2005 apud Statoil, 2004). Na figura 19, um gráfico com os custos comparados de gasodutos *on shore*, *off shore* e transporte por navios, em relação a distância.

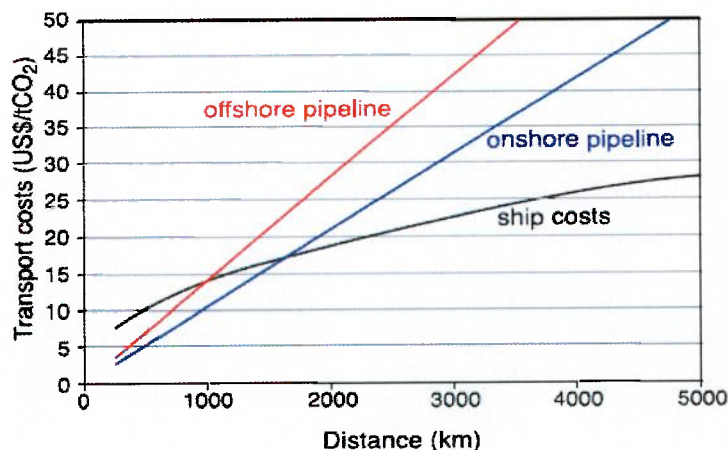


Figura 19: Custos comparativos por distância Fonte: IPCC Special Report on Dioxide Carbon Capture and Storage 2005

6.3 Injeção e armazenamento

Na figura 20, os custos de injeção e armazenamento para diferentes sistemas. O ponto marcado representa o valor médio e as barras a variação possível. Nos processos de recuperação avançada, há a ocorrência de custo negativo, pois a vantagem no aumento na produção de petróleo pode compensar os custos de injeção.

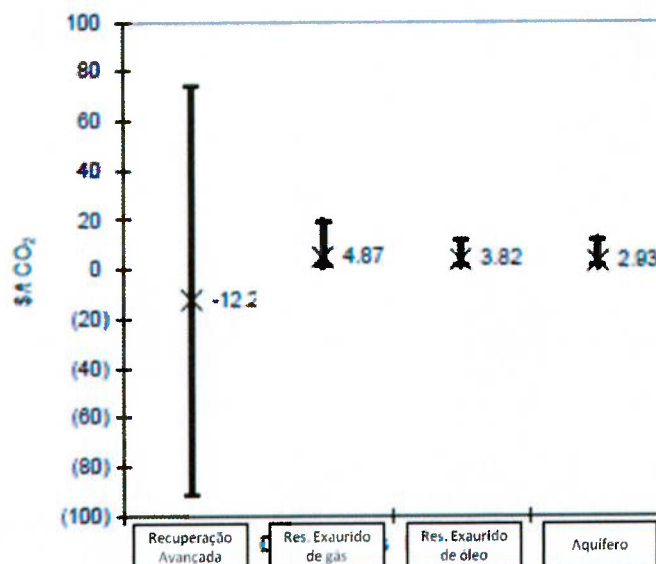


Figura 20: Custos de injeção em diferentes tipos de reservatórios Fonte: Herzog e Golomb, 2004

6.4 Custos totais

Os custos totais do processo, desde a captura até o armazenamento podem alcançar valores de 100 US\$/tC (Herzog e Golomb, 2004), para a adoção de um modelo em larga

escala de armazenamento de carbono. Há expectativas que o aumento do custo das emissões de carbono incentive o surgimento de novas tecnologias.

6.5 Panorama brasileiro

Economicamente, o Brasil apresenta uma perspectiva favorável. Isso se dá por dois motivos principais: a tecnologia e pesquisa avançadas do setor petrolífero e os incentivos do governo.

Quanto à tecnologia, o Brasil possui uma grande estrutura de plataformas que podem ser utilizadas para a injeção em reservatórios, principalmente na Bacia de Campos, pela sua alta capacidade de armazenamento. Além disso, na questão de transporte, já há uma estrutura de gasodutos bem sucedida no país. Os carbodutos podem ser implantados como expansão dos dutos já existentes, diminuindo os custos de instalação e manutenção. Para o transporte em alto mar, já há navios adaptados para o transporte de gás natural. Esses navios que deixam a carga nos portos podem voltar com o gás carbônico que será injetado, aproveitando a viagem e reduzindo custos (Esteves e Morgado, 2010).

Nas questões políticas brasileiras, em 2010 o então Presidente Lula assinou um decreto regulamentando o Fundo Nacional sobre Mudanças do Clima, que dirige parte dos recursos advindos das atividades de exploração do petróleo para ações de sustentabilidade, redução das emissões de carbono e mitigação das mudanças climáticas.

7. Resultados e discussões

O Brasil apresenta excelentes perspectivas para a realização de sequestro de carbono. Sendo umas das principais economias mundiais, um grande emissor de dióxido de carbono e pioneiro em muitas áreas de pesquisa voltadas ao meio ambiente, essa é uma grande oportunidade de investimentos para desenvolvimento de tecnologia. O país possui muitas ambições no cenário internacional, sendo fundamental trabalhar na vanguarda científica e tecnológica e uma nação exemplar em questões modernas, como as mudanças climáticas.

A Bacia do Recôncavo foi a pioneira de injeção de CO₂ no território nacional, porém pela exploração, conhecimento dos campos e capacidade, a Bacia de Campos é, atualmente, a que gera mais possibilidade e deve ser vista como foco, não só de exploração, mas como potencial de armazenamento de gás carbônico, melhoria do saldo de carbono brasileiro com a vantagem de poder ser usado para melhorar a recuperação de petróleo. A indústria petrolífera brasileira tem condições de investir nessas tecnologias, basta agora tornar esses investimentos interessantes economicamente, pois na questão socioambiental suas vantagens são quase indiscutíveis. Outra vantagem de Campos, como evidenciado no trabalho, é a proximidade com as principais fontes emissoras. Nesse ponto, a desvantagem seria a proximidade dos grandes centros urbanos, principalmente São Paulo e Rio de Janeiro. Apesar da importância dessas cidades na emissão de dióxido de carbono, estruturas de transporte próximas a essa cidade exigem mais cuidados e um planejamento mais detalhado e complexo. Assim, a falta de um projeto de mitigação de captura e armazenamento de dióxido de carbono na Bacia de Campos representa um atraso, uma vez que outras regiões já realizaram e ela apresenta os principais campos de exploração petrolífera. Ou seja, iniciativas como essa devem ser começadas o quanto antes, visando corrigir e compensar o aparente desinteresse até o momento.

O método de captura mais adequado em um primeiro momento seria o de pós-combustão, pela simplicidade tecnológica e custos menores que os outros processos. Os

parques industriais da região sudeste podem servir como excelentes pilotos para a captura e injeção de gás nos campos próximos. As termelétricas, que vem tendo uma participação crescente na matriz energética brasileira e muito presentes no sudeste, também são fontes potenciais da captura de carbono para projetos pioneiros no país sobre sequestro de carbono.

Boa parte das emissões de dióxido de carbono é oriunda de agricultura e desmatamento no Brasil. A produção de petróleo corresponde a uma pequena parcela. Isso significa que investimentos do setor petrolífero na redução das emissões podem gerar grandes resultados na criação de empresas sustentáveis no setor, que futuramente possuir saldo de carbono e contribuir com a compensação de emissões advindas de outros setores.

8. Conclusões

Com as fortes evidências dos efeitos climáticos negativos com o aumento de dióxido de carbono na atmosfera devido às ações da humanidade, tecnologias capazes de reduzir e mitigar esses problemas devem ser amplamente pesquisados. Ainda há lacunas no conhecimento sobre sequestro de carbono, que precisam ser mais bem exploradas para que o processo seja bem aceito pela sociedade, uma das questões centrais para o sucesso de projetos na área.

No Brasil, fica evidente a necessidade de acelerar a aquisição de conhecimento na área e iniciar projetos de grande escala, já que o país é um grande emissor e está se tornando uma potência petrolífera com as novas descobertas. Além disso, ele está associado a pesquisas importantes na diminuição do uso de combustíveis fósseis e energias alternativas, tendo como exemplo os biocombustíveis, e investir em pesquisas sobre sequestro de carbono contribuiria para elevar o conhecimento e reconhecimento brasileiro em desenvolvimento sustentável.

Por fim, o sequestro de carbono se mostra, a partir das informações coletadas, como uma alternativa viável e importante para diminuir as emissões e estabilizar a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera. Além disso, a produção de combustíveis fósseis, como óleo e gás natural, e a utilização deles e seus derivados, são grandes responsáveis pelas emissões mundiais de gás carbônico. Considerando os impactos diretos e indiretos das indústrias do setor petrolífero e da lucratividade dessa atividade, investir em formas de amenizar o quadro de mudanças climáticas seria um retorno para a sociedade e uma forma de melhorar a imagem das empresas desse ramo, em um mundo em que o desenvolvimento sustentável é cada vez mais cobrado.

Bibliografia

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E AGRICULTURA, Portugal. Clima e alterações climáticas. **História do clima**, 2009. Disponível em: <<http://alteracoesclimaticas.agrinov.wikispaces.net/2.2+Hist%C3%B3ria+do+clima>>. Acesso em 2 de Nov. de 2011.

CEPAC – Centro de Excelência em Pesquisa e Inovação sobre petróleo, recursos minerais e armazenamento de carbono. PUCRS, Porto Alegre. **O que é sequestro de carbono?**. Disponível em: <http://www.pucrs.br/cepac/?p=sequestro_carbono>. Acesso em: 15 de Nov. de 2011.

COSTA, Isabella Vaz Leal da. **Análise do potencial técnico do sequestro geológico de CO₂ no setor petróleo no Brasil**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro, fevereiro de 2009.

ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXII, Curitiba, PR, 2002. **Passivo ambiental das organizações: uma abordagem teórica sobre avaliação de custos e danos ambientais no setor de exploração de petróleo**. Rio Grande do Norte, 2002.

ESTEVES, Victor Paulo Peçanha; MORGADO, Cláudia do Rosário Vaz. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXX, São Carlos, SP, 2010. **Captura e sequestro geológico de carbono – tecnologias e perspectivas para utilização no Brasil**. Rio de Janeiro, 2010.

FUNDAÇÃO MEMORIAL, São Paulo. **Aquecimento Global: A Terra corre perigo?**, José Goldemberg. Disponível em: <<http://www.memorial.sp.gov.br/memorial/AgendaDetalhe.do?agendaId=793>>. Acesso em: 2 de Nov. de 2011.

HERZOG, Howard; GOLOMB, Dan. **Carbon capture and storage from fossil fuel use**. Massachusetts Institute of Technology, EUA, 2004.

INSTITUTO CARBONO BRASIL. **Recursos do petróleo serão utilizados para o clima**, 2010. Disponível em: <http://www.institutocarbonobrasil.org.br/reportagens_carbonobrasil/noticia=726273>. Acesso em: 2 de Nov. de 2011.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2005. Preparado pelo Grupo de Trabalho III do Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)].

JORNAL O GLOBO, Brasília. **Emissões de CO₂ no país aumentam 69%**. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/ciencia/emissoes-de-co2-no-pais-aumentam-69-3139269>>. Acesso em: 2 de Nov. de 2011.

RAVAGNANI, Ana Teresa F. da S. Gaspar; SUSLICK, Saul B. **Modelo dinâmico de seqüestro geológico de CO₂ em reservatórios de petróleo**. Revista Brasileira de Geociências, março de 2008.

ROCKETT, Gabriela Camboim. **Associação de fontes emissoras e reservatórios potenciais para armazenamento geológico de CO₂ na Bacia de Campos, Brasil**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia, Faculdade de Física e Faculdade de Química, Dissertação de mestrado. Porto Alegre, agosto de 2010.

ROCKETT, Gabriela Camboim; KETZER, João Marcelo. **MOSTRA DE PESQUISA DA PÓS-GRADUAÇÃO DA PUC-RS, III**, Porto Alegre, RS, 2008. **Rochas potenciais para armazenamento geológico na Bacia do Recôncavo, Brasil – caracterização por MEV**. Porto Alegre, 2008.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Global health observatory data repository. **Climate Change, Burden of disease**, 2004. Disponível em: <http://apps.who.int/ghodata/?vid=34000>. Acesso em: 2 de Nov. de 2011.