

O armazenamento geológico de CO₂ relacionado à mitigação dos gases do efeito estufa em excesso na atmosfera é uma tecnologia conhecida desde os anos de 1970, mas que teve apenas nos anos 90 uma escalada de interesse com a implementação de um dos maiores projetos sobre o assunto, o campo de Sleipner, no Mar do Norte.

A seleção de sítios de armazenamento geológico permanente é parte crucial para a avaliação da pertinência técnica, econômica e ambiental de projetos de captura e armazenamento de carbono (do inglês, “*Carbon Capture and Storage* – CCS”) e daqueles que envolvam também a utilização (“*Carbon Capture, Utilisation and Storage* – CCUS”).

As possibilidades de sítios mais estudadas, e que podem ser encontradas em todo o globo, são: reservatórios de óleo e gás, de campos ativos ou depletados; reservatórios salinos (isto é, contendo água com salinidade que pode variar de ligeiramente salobra a valores muito superiores à salinidade média da água do mar¹, mas não potáveis); jazidas de carvão não minerável; folhelhos ricos em matéria orgânica (MO) e rochas vulcânicas básicas.

Por sua ampla distribuição global, os reservatórios de óleo e gás e os reservatórios salinos detêm as maiores estimativas de capacidade volumétrica de armazenamento

Fonte: DOE. NETL (2015; 2017)

¹ A salinidade da água do mar varia, geralmente, entre 33 e 37 gramas de sais dissolvidos por litro (33 – 37 ppt) (NOAA, 2024).

Além de componente natural da atmosfera terrestre (0,04% do total), o CO₂ é o segundo fluido mais abundante da crosta, ficando atrás apenas da água (RINGROSE et al., 2021).

Presente em sua fase gasosa livre ou como um componente dissolvido em águas subterrâneas, o CO₂ tem como fontes principais em subsuperfície:



atividade mantélica;



transformação termoquímica da MO e geração do petróleo;



atividade biológica.

Segundo a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* - IEA), no cenário em que, até 2050, as emissões líquidas do setor energético alcancem valores nulos, o CCS deve sustentar até 8% das reduções cumulativas totais de CO₂ (IEA, 2023).

Demais reduções devem vir do aumento do uso de:



Renováveis



Hidrogênio



Eletrificação



Eficiência energética

Mudanças comportamentais

Novas práticas de uso do solo



Tipo

Capacidade de armazenamento (GtCO₂)

Reservatórios de óleo e gás

675–900*

Reservatórios salinos

> 1.000

Jazidas de carvão não minerável

3-200

* Não contabiliza a capacidade associada a campos ainda não-descobertos

Fonte: DOE. NETL (2015)

Embora as técnicas de armazenamento estejam provadas, para que se alcancem os objetivos do Acordo de Paris, é vital aumentar o número de projetos em nível mundial. Desenvolvimentos tecnológicos que sejam capazes de reduzir os custos de implantação, especialmente no que tange a etapa de captura direta do CO₂; o gerenciamento de infraestruturas compartilhadas entre diferentes usuários e a demonstração da segurança a longo prazo do armazenamento são vitais para a ampliação desta tecnologia.

Os governos locais, por sua vez, precisam se envolver ainda mais e criar ambientes regulatórios seguros, com capacidade de gerenciamento das responsabilidades a longo prazo. O estabelecimento de apoio financeiro - seja pelo aporte de capital direto, isenções tributárias ou definição de mercados de créditos de carbono - é outro fator essencial para a escalada positiva de projetos.

Ademais, a anuência popular deve igualmente pautar o crescimento dessa alternativa. Esforços para a promoção de uma instrução isonômica, objetiva e transparente sobre a importância e eficiência do armazenamento de carbono são imprescindíveis para que a descarbonização através de CCS seja uma ambição acessível para a sociedade.

O QUE É UM RESERVATÓRIO SALINO?

ROCHAS RESERVATÓRIO são elementos essenciais para qualquer sistema que envolva a acumulação de fluidos. São rochas capazes de armazenar líquidos e gases em seus poros, seja devido ao maior tamanho e melhor grau de seleção de seus grãos minerais em relação às rochas no entorno ou em virtude de fatores que aumentem a sua porosidade (espaço para acúmulo de fluidos) e permeabilidade (facilidade com que os fluidos se movimentam pelo espaço poroso), tais como a existência de fraturas.

Rochas sedimentares (como arenitos e carbonatos) são os tipos mais comuns de reservatórios. Contudo, rochas vulcânicas/metamórficas fraturadas (com porosidade secundária) também podem ser reservatórios.

As rochas reservatório podem reter água em seus poros e, a depender da composição mineral, essa água pode ser salina. Cabe destacar que os reservatórios salinos aptos ao armazenamento de carbono estão a profundidades muito maiores do que os aquíferos com águas potáveis e contêm uma água com conteúdo salino (em geral, superior a 1.000 mg/L de sólidos totais dissolvidos¹) que inviabiliza técnica e economicamente o uso da mesma em superfície (BENTHAM; KIRBY, 2005; [DOE, 2017](#)).

¹ 10.000 mg/L é o valor definido pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (*Environmental Protection Agency* - EPA), no regulamento de poços para sequestro geológico de CO₂ ([EPA \(2018\). Manual Class VI](#)). Já o Governo de Alberta, considera valores de 4.000 mg/L ([GOVERNO DE ALBERTA, 2015](#)). Em todos os casos, significa que águas subterrâneas potáveis são excluídas das possibilidades de sítios.

Embora os reservatórios salinos ocorram em todas as bacias sedimentares do mundo, com uma ampla variação de suas propriedades, é reconhecido que a compreensão geológica inicial dessa opção é mais limitada do que aquela dos reservatórios de óleo e gás, uma vez que há uma menor disponibilidade de dados específicos e uma maior heterogeneidade em termos de cobertura espacial (há mais dados em áreas onde existem reservatórios de hidrocarbonetos ou recursos geotérmicos). O fato do conteúdo de água presente em tais reservatórios não ser apropriado para uso humano pode ser elencado como uma das principais razões para o menor interesse histórico no mapeamento desses sítios, que agora se mostram relevantes para as técnicas de armazenamento de carbono (BENTHA; KIRBY, 2005; SENIOR et al., 2011).

Os requisitos mínimos que um reservatório geológico deve ter para o armazenamento permanente de carbono são os mesmos para os casos de reservatórios salinos ou de óleo e gás:



Tamanho: reservatório deve ser suficientemente grande para poder armazenar as quantidades de CO₂ planejadas. A capacidade do local é o volume de espaços porosos que podem ser ocupados por CO₂ sem que haja risco para a integridade do selo.



Porosidade e permeabilidade: suficientemente altas para permitir a injeção do CO₂ a taxas que permitam a remoção do gás em excesso na atmosfera nos prazos necessários.



Profundidade: normalmente apenas reservatórios em profundidades maiores do que 800 m são considerados, uma vez que a partir desta profundidade o CO₂ existe no estado supercrítico (em que o CO₂ passa a registrar uma densidade semelhante à da fase líquida, mas uma viscosidade semelhante à da fase gasosa).

A presença de uma (ou mais de uma) camada de rocha com baixa permeabilidade à passagem de fluidos (rocha selante ou capeadora) é uma condição essencial para qualquer tipo de armazenamento de CO₂.

- Usualmente representadas por folhelhos ou evaporitos, tais rochas devem ter sua integridade preservada; isto é, sem falhas que levem a formação de caminhos de migração para o CO₂.
- A afinidade do CO₂ com matéria orgânica faz com que o mesmo seja melhor adsorvido na superfície de camadas de folhelhos e carvão.

A caracterização do sistema geológico de armazenamento também deve incluir o reconhecimento da distribuição espacial da pressão capilar, pressão *in-situ*, temperatura, salinidade e propriedades mecânicas da rocha (BENTHAM; KIRBY, 2005; WEI et al., 2022).

MECANISMOS DE ARMAZENAMENTO DE CO₂ EM RESERVATÓRIOS SALINOS¹

Quatro mecanismos principais mantêm o CO₂ nos reservatórios salinos e garantem baixos riscos de fuga para a superfície (HONGJUN et al., 2010; RINGROSE et al., 2021):

¹ Nota: os mesmos mecanismos são observados em reservatórios de acumulações de óleo e gás.

Trapeamento Hidrodinâmico

(ou Trapeamento Estrutural e Estratigráfico)

O CO₂, em estado supercrítico, é injetado como uma fase única que se divide em CO₂ de fase livre (imiscível) e uma salmoura rica em CO₂. A fase livre migra para cima sob a ação da flutuabilidade gerada pela diferença de densidade e alcança o topo da formação até atingir a camada de rocha selante, que acaba retendo o CO₂ com segurança.

A velocidade interna desse fluxo é muito baixa (dezenas de centímetros por ano), o que leva a um tempo de residência do gás injetado da ordem de milhões de anos. A curto prazo, é considerado o mecanismo mais importante para o armazenamento.

Trapeamento por Solubilidade

Quando injetado, uma porção do CO₂ se dissolve na água de formação. A fase aquosa retém o CO₂ dissolvido se as condições iniciais não forem perturbadas. A dissolução do CO₂ ocorre de forma lenta, mas constante (em função da temperatura, salinidade e pressão). Em teoria, centenas de Milhões de toneladas (Mt) de CO₂ podem ser retidos pela dissolução ao longo da escala de tempo geológica.

Trapeamento Residual

A pressão capilar pela adsorção à superfície dos grãos minerais da matriz da rocha reservatório imobiliza parte do CO₂ injetado, cessando o caminho de migração.

Trapeamento Mineral

O CO₂ pode reagir com minerais (principalmente aqueles com Ca, Fe ou Mg) e a matéria orgânica nas formações geológicas, formando precipitados estáveis de carbonatos.

O fracionamento do CO₂ em fases minerais é extremamente lento na maioria dos ambientes de reservatórios salinos, de modo que esse tipo contribui em menor proporção para o armazenamento durante milhares de anos. A exceção é o caso do armazenamento em basaltos, quando a fase mineral pode se tornar predominante.

APRENDIZADO INTERNACIONAL

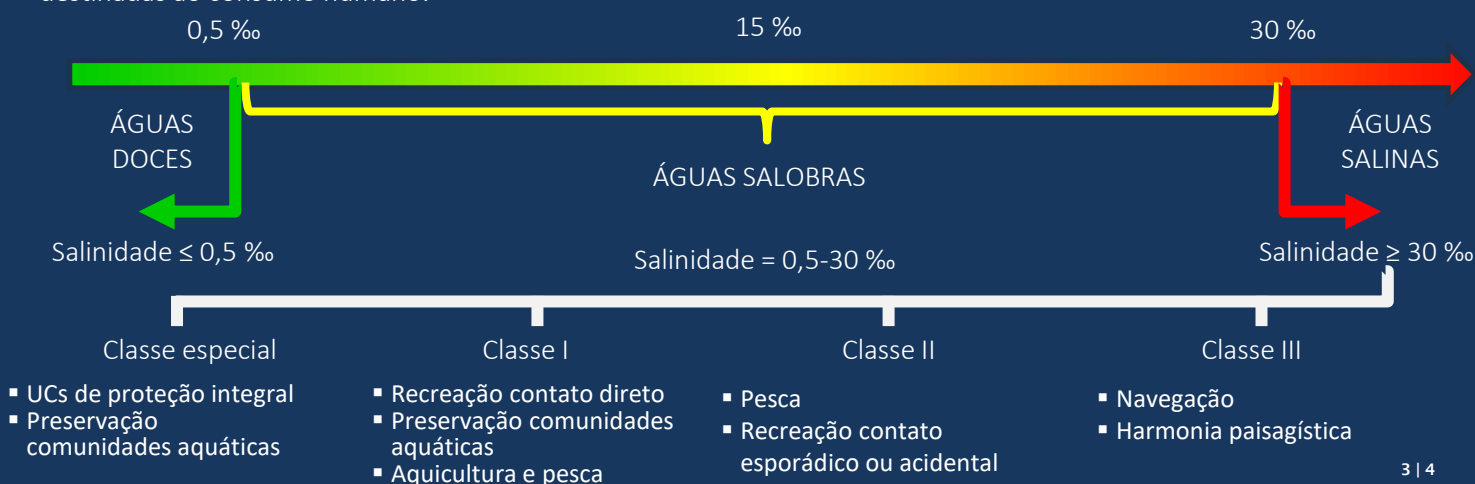
A experiência da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*Environmental Protection Agency - EPA*) com a regulação da injeção de fluidos no subsolo para fins de armazenamento ou descarte é um dos principais exemplos para as nações que estejam estruturando os requisitos necessários ao equilíbrio da injeção de CO₂ nas atividades de CCS com a garantia da segurança da saúde pública.

Nos EUA, o compromisso com a proteção das fontes subterrâneas de água potável foi reforçado com a criação de uma classe específica de poços (classe VI) para a injeção de CO₂, dentro do contexto da Lei de Água Potável (*Safe Drinking Water Act*), que regula todos os aspectos dos poços de injeção de um projeto de armazenamento de carbono, incluindo localização do projeto, construção do poço, operações de injeção, testes e monitoramento, além de resposta a emergências, responsabilidade financeira e descomissionamento.

A exigência de licenças, relatórios e inspeções periódicas se mostraram, neste caso, vitais para a gestão dos projetos, permitindo o acompanhamento da efetividade de cumprimento do que foi oficialmente regulamentado, ao mesmo tempo em que se garante, ao público em geral, transparência e rastreabilidade das decisões tomadas (EPA, 2023).

CLASSIFICAÇÃO DE CORPOS D'ÁGUA SUPERFICIAIS NO BRASIL

A Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define 3 tipos de águas superficiais com base na salinidade e estabelece as condições de lançamento de efluentes. As águas salinas não estão destinadas ao consumo humano:



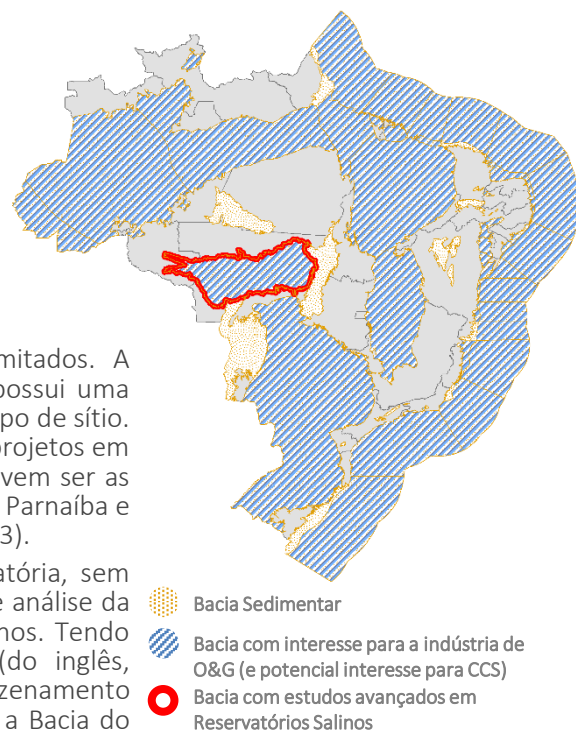
COMO ANDA O STATUS DE CONHECIMENTO?

A Europa e a América do Norte, com destaque para os Estados Unidos, concentravam mais de 75% dos projetos de armazenamento geológico de carbono em reservatórios salinos até janeiro/2023 ([NETL CCS Database – Janeiro/2023](#)).

O aprendizado de décadas de armazenamento em projetos de grande porte - como os de Sleipner e Snøhvit, no Mar do Norte - demonstram que os riscos de fuga do CO₂ para a superfície são baixos e podem ser gerenciados por meio de um criterioso processo de seleção dos sítios para armazenamento e implementação de um sistema de monitoramento constante.

Dados específicos sobre reservatórios salinos, no Brasil, são ainda limitados. A indústria de óleo e gás, desenvolvida há mais de meio século no país, possui uma contribuição inestimável para o aprofundamento do conhecimento desse tipo de sítio. Embora todas as bacias sedimentares sejam candidatas em potencial para projetos em reservatórios salinos, aquelas com interesse para o setor de óleo e gás devem ser as principais escolhas. As estimativas iniciais destacam as bacias do Amazonas, Parnaíba e São Francisco, em terra, e Campos e Santos, em mar (LOURENÇO et al., 2023).

Entretanto, é a Bacia dos Parecis - uma bacia de nova fronteira exploratória, sem campos de óleo ou gás no seu histórico – um dos casos mais avançados de análise da viabilidade de utilização de armazenamento de CO₂ em reservatórios salinos. Tendo como estímulo o interesse pela implementação de sistemas BECCS (do inglês, “*Bioenergy with carbon capture and storage*”)¹, em que a captura e o armazenamento geológico de carbono são associados à atividades do setor bioenergético, a Bacia do Parecis conta, até o momento, com dois projetos em estudo.



¹ Para maiores informações, acesse [Fact Sheet EPE - BECCS](#)

DESAFIOS PARA PROJETOS EM RESERVATÓRIOS SALINOS

Não só o caráter técnico do armazenamento geológico de carbono em reservatórios salinos é bastante similar à opção em reservatórios de óleo e gás, mas as questões econômicas que norteiam a viabilidade das duas opções se assemelham. Há, contudo, diferenças significativas quando comparada com a opção de armazenamento relacionado, por exemplo, aos processos ligados às atividades de campos de óleo e gás, tais como a recuperação avançada de petróleo (EOR), pois a injeção de CO₂ para armazenamento em reservatórios salinos é mais dependente do estabelecimento de mercados regulados de créditos de carbono do que as técnicas de EOR, a qual é uma decisão estratégica historicamente empregada na rotina de diversas áreas produtoras de hidrocarbonetos ao redor do mundo (BENTHAM; KIRBY, 2005).

Para reservatórios salinos uma das principais demandas é a necessidade de dados geológicos e geofísicos que auxiliem a identificação e caracterização do sítio potencial. Reprocessamento sísmico, novos levantamentos de sísmica 2D/3D e a perfuração de novos poços, testemunhos e testes de injeção são desafios elencados pela maioria dos esforços empreendidos (RINGROSE et al., 2021; SENIOR et al., 2011).

Seja qual for o tipo de sítio, é importante reconhecer e abordar as preocupações sobre possíveis fugas de CO₂ para a superfície. Todavia, há de se citar que existe uma ampla gama de ferramentas de diagnóstico geofísico e geoquímico capazes de orientar as operações de cada projeto, demonstrar a eficiência do armazenamento e monitorar eventuais anomalias. Os avanços de imageamento geofísico, especialmente com o uso de sensores de fibra óptica de baixo custo, poderão, por exemplo, aumentar a precisão e reduzir os custos dos programas de monitoramento de armazenamento de CO₂ (BENTHAM; KIRBY, 2005; WEI et al., 2022).

Embora sejam questões relevantes, as dificuldades apresentadas não devem ser consideradas barreiras à implementação de projetos de armazenamento de CO₂ em reservatórios salinos. O aumento das operações nessa opção de sítio é fundamental para aumentar o arcabouço de conhecimento e subsidiar com dados realistas a calibração de modelos voltados à prova da factibilidade do armazenamento em grande escala.

Acompanhe as publicações da EPE em:



Diretoria de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis
Superintendência de Petróleo e Gás Natural

Coordenação Geral
Heloisa Borges Bastos Esteves

Coordenação Executiva
Marcos Frederico Farias de Souza

Equipe Técnica

Adriana Queiroz Ramos
Bruna Silveira Guimarães
Camila da Mota Carvalho
Deise dos Santos Trindade Ribeiro
Denise dos Santos Silva Reinoldes
Isis Oliveira Fernandes

Katia Souza D'Almeida
Natália da Veiga Bonavita Teixeira
Nathália Oliveira de Castro
Pamela Cardoso Vilela
Péricles de Abreu Brumati
Rafael Freitas Funcia Lemme

Raul Fagundes Leggieri
Regina Freitas Fernandes
Roberta de Albuquerque Cardoso
Rubens Fausto Jose M. da Cunha Ribeiro
Victor Hugo Trocate da Silva

A EPE se exime de quaisquer responsabilidades sobre decisões ou deliberações tomadas com base no uso das informações contidas neste documento, assim como pelo uso indevido dessas informações.