



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BEATRIZ RODRIGUES DE ALMEIDA

**MODELAGEM MULTIFATORIAL PARA TRIAGEM E
SELEÇÃO DE CLUSTERS E HUBS INDUSTRIAIS DE CCS
NO CONTEXTO BRASILEIRO**

**JOÃO PESSOA
2025**

BEATRIZ RODRIGUES DE ALMEIDA

**Modelagem multifatorial para triagem e seleção de clusters e hubs
industriais de CCS no contexto brasileiro**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Termofluidos.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Charles Peixoto de Oliveira

**João Pessoa - PB
Julho de 2025**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A447m Almeida, Beatriz Rodrigues de.

Modelagem multifatorial para triagem e seleção de clusters e hubs industriais de CCS no contexto brasileiro / Beatriz Rodrigues de Almeida. - João Pessoa, 2025.

97 f. : il.

Orientação: Gustavo Charles Peixoto Oliveira.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Carbono - armazenamento geológico. 2. Cadeia de valor do CCS. 3. Clusters e hubs industriais. 4. Análise geoespacial. I. Oliveira, Gustavo Charles Peixoto. II. Título.

UFPB/BC

CDU 669.784(043)

BEATRIZ RODRIGUES DE ALMEIDA

**Multifactorial modeling for screening and selection of CCS
industrial clusters and hubs in the Brazilian context**

Dissertation submitted to the Graduate Program
in Mechanical Engineering of Federal University of
Paraíba as part of the requirements for obtaining
the degree of Master in Mechanical Engineering.
Concentration Area: Thermofluids.

Advisor: Prof. Dr. Gustavo Charles Peixoto de Oliveira


**João Pessoa - PB
July 2025**

MODELAGEM MULTIFATORIAL PARA TRIAGEM E SELEÇÃO DE CLUSTERS E HUBS INDUSTRIAIS DE CCS NO CONTEXTO BRASILEIRO


por

BEATRIZ RODRIGUES DE ALMEIDA


Dissertação aprovada em 25 de julho de 2025

Documento assinado digitalmente
 **GUSTAVO CHARLES PEIXOTO DE OLIVEIRA**
Data: 20/08/2025 20:11:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Gustavo Charles Peixoto de Oliveira
Orientador – Universidade Federal da Paraíba

Documento assinado digitalmente
 **MONICA CARVALHO**
Data: 20/08/2025 15:51:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Monica Carvalho
Examinadora Interna – Universidade Federal da Paraíba

Documento assinado digitalmente
 **BRUNO SOUZA CARMO**
Data: 20/08/2025 07:24:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Souza Carmo
Examinador Externo – Universidade de São Paulo

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO SEBASTIAN IGLESIAS**
Data: 19/08/2025 23:26:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Sebastian Iglesias
Examinador Externo – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

*João Pessoa - PB
2025*

Dedico este trabalho a Deus, fonte de força e inspiração em minha vida, e à minha família, pelo amor, apoio e incentivo constantes que tornaram esta conquista possível.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser minha força e meu refúgio em todos os momentos. A Ele, que conduz meus passos, planta sonhos em meu coração e ilumina os caminhos por onde devo seguir. Sem Sua presença constante, este percurso não teria sido possível. Toda honra e toda glória sejam dadas a Ele.

À minha família, com gratidão profunda, dedico meu carinho e reconhecimento. Em especial à minha mãe, Ana Paula, meu alicerce e inspiração. Sua presença firme, seu amor incansável e suas palavras de conforto e incentivo foram essenciais para que eu jamais desistisse, mesmo nos momentos mais difíceis. Obrigada por acreditar em mim quando eu mesma duvidei. Este trabalho é também fruto do seu cuidado e da sua força.

Ao meu amado noivo, Gustavo, meu companheiro de vida e de sonhos. Sua paciência, seu amor incondicional e sua fé constante em mim foram combustíveis nos momentos em que as forças pareciam faltar. Obrigada por estar ao meu lado com palavras de apoio, gestos de carinho e presença silenciosa, mas sempre acolhedora. Seus abraços e sorrisos me deram coragem para continuar e força para vencer cada desafio. Sou imensamente grata por compartilhar essa caminhada com você.

Ao meu orientador, Dr. Gustavo Oliveira, pela orientação dedicada, atenta e generosa ao longo de todo o mestrado. Sua sabedoria, clareza e compromisso foram fundamentais para a construção deste trabalho e para meu crescimento acadêmico e pessoal. Cada orientação, cada observação e cada conversa contribuíram significativamente para minha evolução. Agradeço sinceramente por todas as oportunidades de aprendizado e pelo apoio constante ao longo desta jornada.

À empresa WayCarbon, pela parceria ao longo deste projeto. A contribuição da empresa, ao integrar esta iniciativa, foi importante para a viabilização de atividades e reforça o valor do envolvimento do setor privado com projetos acadêmicos voltados à sustentabilidade e ao desenvolvimento.

Aos membros da banca examinadora, meus sinceros agradecimentos pela generosidade em dedicar seu tempo e compartilhar seus conhecimentos na avaliação deste trabalho. Suas observações e sugestões são de grande valor para o aprimoramento desta pesquisa.

A todos os colegas do Laboratório TRIL, com especial apreço a Carlos Alexandre, Thiago Rodrigues, Adriel Ferreira, Erlon Lacerda, Silas Melo, José Wilker e Lucas Cavalcanti. Sou grata pela parceria, pelas ideias compartilhadas e pelo apoio constante ao longo desta jornada. O ambiente colaborativo e acolhedor que vivemos foi essencial para transformar desafios em aprendizados e conquistas em celebrações conjuntas. Obrigada por tornarem essa trajetória

mais leve, rica e significativa.

Ao CNPq/Brasil, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho e o desenvolvimento da pesquisa.

*“Não temas, porque eu sou contigo; não te assombres, porque eu sou o teu Deus; eu te fortaleço, e te ajudo, e te sustento com a destra da minha justiça”
(Isaías 41:10)*

RESUMO

ALMEIDA, B. R. **Modelagem multifatorial para triagem e seleção de clusters e hubs industriais de CCS no contexto brasileiro**. 2025. 98pp. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2025.

As tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) constituem uma estratégia relevante para a mitigação das emissões provenientes dos setores denominados como de difícil abatimento. Quando associadas a modelos de hubs e clusters, essas tecnologias permitem a integração entre fontes emissoras, sistemas de transporte de CO₂ e reservatórios geológicos subterrâneos, otimizando a eficiência operacional e a viabilidade econômica das cadeias de descarbonização. Esta dissertação tem como objetivo desenvolver uma modelagem multifatorial para a triagem e seleção de clusters e hubs industriais de CCS no contexto brasileiro, integrando a identificação de fontes emissoras, sumidouros *offshore* e a análise da logística de transporte de CO₂. A metodologia integrou análise geoespacial, modelagem matemática e abordagem heurística para mapear e priorizar hubs e clusters de CCS nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo. Como resultado foram identificadas 59 plantas industriais, concentradas principalmente em São Paulo (81%) e no Rio de Janeiro (19%). Também foram mapeados 387 poços *offshore* elegíveis para armazenamento de CO₂, distribuídos nas bacias de Campos e Santos. Esses poços foram agrupados em macrocampos estrategicamente posicionados próximos a áreas de alta densidade emissiva, reduzindo distâncias logísticas entre fontes e sumidouros levando em conta a infraestrutura existente. Os resultados indicam regiões prioritárias no Sudeste com infraestrutura e potencial para implantação inicial de hubs e clusters de CCS no Brasil.

Palavras-chave: cadeia de valor do CCS, armazenamento geológico de carbono, clusters e hubs industriais, análise geoespacial.

ABSTRACT

ALMEIDA, B. R. **Multifactorial modeling for screening and selection of CCS industrial clusters and hubs in the Brazilian context.** 2025. 98pp. Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering) – Graduate Program in Mechanical Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, 2025.

Carbon Capture and Storage (CCS) technologies constitute a relevant strategy for mitigating emissions from hard-to-abate sectors. When combined with the hub-and-clusters model, these technologies enable the integration of emission sources, CO₂ transport systems, and underground geological reservoirs, optimizing the operational efficiency and economic viability of decarbonization chains. This dissertation aims to develop a multifactor model for screening and selecting CCS industrial clusters and hubs in the Brazilian context, integrating the identification of emission sources, offshore sinks, and the analysis of CO₂ transport logistics. The methodology integrated geospatial analysis, mathematical modeling, and a heuristic approach to map and prioritize CCS hubs and clusters in the states of Rio de Janeiro and São Paulo. As a result, 59 industrial plants in hard-to-abate sectors were identified, concentrated primarily in São Paulo (81%) and Rio de Janeiro (19%). A total of 387 offshore wells eligible for CO₂ storage were also mapped, distributed across the Campos and Santos basins. These wells were grouped into macrofields strategically positioned near areas of high emissive density, reducing logistical distances between sources and sinks taking into account the existing infrastructure. The results indicate priority regions in the Southeast with infrastructure and potential for initial deployment of CCS hubs and clusters in Brazil.

Keywords: CCS value chain; geological carbon storage; industrial clusters and hubs; geospatial analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de calor das Emissões de Gases de Efeito Estufa	19
Figura 2 – Emissões de CO ₂ nos principais países e regiões	20
Figura 3 – Seleção de áreas com potencial para armazenamento de CO ₂	23
Figura 4 – Opções para armazenamento geológico de CO ₂	25
Figura 5 – Cadeia de valor de CCS conectando emissores <i>onshore</i> , transporte e armazenamento <i>offshore</i>	28
Figura 6 – Visão Geral de Cluster e Hubs de CCS	30
Figura 7 – Tríade central de interesse e fatores extrínsecos do modelo de CCS	30
Figura 8 – Clusters HTA, hubs CCS e potencial de armazenamento CO ₂ em 2022	31
Figura 9 – Evolução de projetos de CCS até 2030	34
Figura 10 – Potencial de redução de CCU S no Brasil	35
Figura 11 – Potencial de armazenamento subterrâneo do Brasil	36
Figura 12 – Fases holísticas do projeto e relação com metodologia de pesquisa	38
Figura 13 – Pipeline ETL do banco de dados do estudo	40
Figura 14 – Gráfico de contorno: valor avaliado por impostos vs pés quadrados	50
Figura 15 – Modelo esquemático de bacia offshore reduzida para clusters de CO ₂	55
Figura 16 – Contornos de isodensidade para emissões de CO ₂	64
Figura 17 – Distribuições acumuladas da densidade emissiva nas regiões intermediárias	65
Figura 18 – Função de categorização das emissões e mapas coropléticos	69
Figura 19 – Gráficos de distância da rota fonte-centro para aglomerados de captura	72
Figura 20 – Gráficos de distâncias entre hubs de captura e instalações	74
Figura 21 – Importância do petróleo <i>offshore</i> e poços elegíveis	76
Figura 22 – Distribuição de poços elegíveis por campo nas bacias de Campos e Santos	77
Figura 23 – Modelo de macrocampos nas bacias de Campos e Santos	78
Figura 24 – Arquitetura <i>offshore</i> para os macrocampos Argonauta e Jubarte na Bacia de Campos	82
Figura 25 – Arquitetura <i>offshore</i> para o macrocampo Roncador na Bacia de Campos	82
Figura 26 – Arquitetura <i>offshore</i> para o macrocampo Peregrino na Bacia de Campos	83
Figura 27 – Arquitetura <i>offshore</i> para os macrocampos Marlim, Marlim Leste e Marlim Sul na Bacia de Campos	83
Figura 28 – Macrocampo de Búzios e Mero (com distâncias)	84
Figura 29 – Macrocampo de Búzios e Mero (sem distâncias)	85
Figura 30 – Macrocampo de Sapinhóia e Tupi (com distâncias)	85
Figura 31 – Macrocampo de Sapinhóia e Tupi (sem distâncias)	86
Figura 32 – Matriz de distâncias entre fontes emissoras	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Hubs regionais no Brasil e principais setores	33
Tabela 2 – Critérios da EPE para cálculo do IPA-GCS	50
Tabela 3 – Lista de fontes difíceis de abater (HTA)	59
Tabela 4 – Resumo de FPSOs por bacia e operador	61
Tabela 5 – Limites de emissão por fonte territorial	63
Tabela 6 – Regiões intermediárias promissoras para redes locais de CCS	70
Tabela 7 – Caracterização de macrocampos nas bacias de Campos e Santos	79
Tabela 8 – Caracterização de clusters de armazenamento	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Transição Energética	18
2.2	Captura e Armazenamento de Carbono	20
2.2.1	<i>CCS no Contexto brasileiro</i>	21
2.3	Armazenamento Geológico de CO ₂	24
2.4	Terminologia de Cluster e Hub de CCS	27
2.5	Origem e evolução dos conceitos de hubs e clusters	30
2.6	Clusters e Hubs no contexto brasileiro	32
3	METODOLOGIA	37
3.1	Poços elegíveis para clusters de armazenamento	38
3.2	Preparação de Dados	39
3.3	Modelagem Matemática	40
3.3.1	<i>Clusters e Hubs de CCUS</i>	40
3.3.2	<i>Estimativa da Densidade Emissiva Estratificada</i>	42
3.3.3	<i>Função Categoria de Emissões</i>	43
3.3.4	<i>Definição dos Limiares de Classificação Categórica</i>	44
3.3.5	<i>Índice de Oportunidade para Reaproveitamento de Poços</i>	46
3.3.6	<i>Capacidade de Armazenamento</i>	47
3.3.7	<i>Índice de Importância Areal para Armazenamento de Carbono</i>	49
3.4	Modelagem Estatística	50
3.4.1	<i>Estimador de Densidade Ponderada do Kernel</i>	50
3.4.2	<i>Agrupamento de Dados</i>	52
3.4.3	<i>Média de poços e construção de macrocampos</i>	53
3.5	Modelagem Heurística	56
3.6	Priorização regional	57
3.7	Seleção de plantas industriais	57
3.8	Amostragem de infraestrutura	60
4	RESULTADOS	62
4.1	Metas de emissões por fonte territorial	62
4.2	Densidade Emissiva e Distribuições Espaciais	63
4.3	Análise da Rede de CCUS: Captura	66

4.3.1	<i>Função de Categorização Emissiva</i>	67
4.3.2	<i>Clusters e hubs de captura</i>	71
4.3.3	<i>Distâncias entre hubs e instalações</i>	73
4.4	Análise da rede de CCS: armazenamento	74
4.4.1	<i>Importância areal para armazenamento, poços elegíveis e macrocampos</i>	75
4.4.2	<i>Clusters e hubs de armazenamento</i>	79
4.4.3	<i>Distâncias entre hubs de armazenamento e FPSOs</i>	80
5	CONCLUSÃO	87
REFERÊNCIAS		90
APÊNDICE A	CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS	97
APÊNDICE B	MATRIZ DE DISTÂNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS, do inglês *Carbon Capture and Storage*) são apontadas há mais de uma década como ferramentas indispensáveis para a mitigação das emissões de dióxido de carbono, especialmente em setores industriais de difícil descarbonização (UN, 2015). O processo de CCS compreende três etapas principais: a captura do CO₂, que pode ocorrer diretamente da atmosfera ou por meio de processos de separação em fontes industriais; o transporte, onde o CO₂ é comprimido e transportado para locais de armazenamento; e, por fim, o seu armazenamento permanente em formações geológicas profundas. Devido à complexidade técnica e aos altos custos envolvidos, a cooperação entre diferentes agentes econômicos torna-se fundamental para viabilizar projetos economicamente sustentáveis (IEA, 2023a; OGCI, 2023).

Globalmente, os modelos de negócios para CCS evoluíram de estruturas integradas, nas quais uma única entidade gerencia toda a cadeia de valor, para modelos segmentados, em que diferentes empresas oferecem serviços especializados. Os projetos pioneiros frequentemente adotaram o modelo completo, mas o elevado investimento inicial e os riscos concentrados tornaram este formato menos atraente. Em contraste, o modelo fragmentado, dividido em serviços de captura e armazenamento, vem ganhando espaço por distribuir riscos e facilitar a escalabilidade das operações (GCCSI, 2024a).

Dentro desse escopo, o modelo de hubs e clusters surge como uma estratégia integrada que permite a centralização do CCS em pontos estratégicos (hubs), conectados a agrupamentos geográficos de emissores (clusters). Inspirado em modelos logísticos amplamente usados em outras áreas, como transporte aéreo e marítimo, esse arranjo possibilita a maximização das economias de escala e a otimização do uso da infraestrutura disponível (GCCSI, 2016). A existência de hubs e clusters pode, assim, reduzir custos operacionais, facilitar a coordenação entre atores e aumentar a viabilidade técnica dos projetos. Exemplos internacionais de sucesso, como os projetos Northern Lights na Noruega, Antwerp@C na Bélgica e Bayou Bend nos Estados Unidos, ilustram a eficácia desse modelo (OGCI, 2025).

A implantação de redes de CCS requer uma análise integrada de múltiplos fatores, que incluem tanto características intrínsecas, como concentração de emissões, disponibilidade de infraestrutura e potencial geológico para armazenamento, quanto extrínsecas, como o ambiente regulatório, o engajamento público e os mecanismos de incentivo (LOTHE *et al.*, 2024). Para apoiar esse processo, têm sido desenvolvidos métodos de triagem territorial que identificam as regiões com maior potencial para o desenvolvimento desses sistemas, possibilitando um planejamento mais eficiente e alinhado à sustentabilidade econômica e ambiental.

No Brasil, apesar de haver vasto potencial para o desenvolvimento do CCS, o avanço

tem sido modesto. O país detém bacias sedimentares com capacidade significativa para armazenamento geológico de CO₂, além de uma base industrial diversificada que poderia se beneficiar dessas tecnologias (GCCSI, 2022). Todavia, a inexistência de marcos regulatórios específicos, a limitação de dados detalhados sobre infraestruturas de transporte e captura, bem como o alto custo associado à implementação, são barreiras ainda a serem superadas. A falta de mapeamento sistemático e territorializado dos potenciais hubs e clusters representa um obstáculo importante para o planejamento estratégico nacional.

Além disso, os esforços no país ainda são caracterizados por estudos isolados e pela integração limitada entre os setores público, privado e acadêmico. O desenvolvimento de metodologias que agreguem dados espaciais, análise territorial e modelagem computacional é fundamental para estruturar um suporte robusto para formulação de políticas públicas e para a atração de investimentos. Este estudo insere-se nesse contexto, propondo uma modelagem multifatorial para a triagem e seleção de clusters e hubs industriais de CCS nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, integrando a identificação de fontes emissoras, sumidouros offshore e a análise da logística de transporte de CO₂, com o intuito de apoiar o planejamento estratégico dessas redes no contexto brasileiro.

A escolha desses estados justifica-se pela concentração significativa de fontes emissoras de CO₂, pela relevância econômica e industrial, e pela proximidade com as bacias sedimentares de Campos e Santos, reconhecidas por seu potencial de armazenamento (BACHU *et al.*, 2007; SILVA; SANTOS; OLIVEIRA, 2024). A metodologia desenvolvida combina a análise de dados públicos, técnicas de modelagem espacial e heurísticas para classificar municípios segundo a intensidade das emissões, mapear instalações industriais e infraestrutura logística, além de identificar possíveis clusters e hubs de CCS.

Este modelo é concebido para ser escalável e adaptável, podendo ser aplicado em outras regiões do país que possuam dados compatíveis. Ao integrar conceitos de engenharia computacional, análise geoespacial e avaliação técnica, a pesquisa contribui com uma ferramenta analítica capaz de apoiar decisões estratégicas, subsidiar a formulação de políticas públicas e fomentar o desenvolvimento da cadeia CCS no Brasil.

Dessa forma, este trabalho de pesquisa oferece um caminho para o avanço técnico-científico e a promoção da descarbonização em setores industriais críticos.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho de pesquisa é desenvolver uma modelagem multifatorial para a triagem e seleção de clusters e hubs industriais de CCS no contexto brasileiro, integrando a identificação de fontes emissoras, sumidouros offshore e a análise da logística de transporte de CO₂.

Já na subseção 1.1, os objetivos específicos são os seguintes:

- i) Identificar clusters de captura industrial em diferentes escalas territoriais, com base em métricas estratificadas por volume de emissão;
- ii) Selecionar poços e macrocampos elegíveis à formação de clusters de armazenamento offshore;
- iii) Aplicar modelagem heurística e análise geoespacial para mapear os principais componentes da infraestrutura;
- iv) Desenvolver e interpretar gráficos de distância entre fontes emissoras e sumidouros, com o intuito de avaliar a logística de transporte do CO₂.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, será feita uma breve introdução ao contexto da transição energética, destacando a necessidade de soluções para a redução das emissões de carbono. Em seguida, abordaremos os conceitos e a relevância dos hubs e clusters de CCS como estratégias fundamentais para viabilizar a implementação em larga escala dessa tecnologia. Discutiremos como essas estruturas geograficamente concentradas possibilitam o compartilhamento eficiente de infraestrutura, a redução de custos e a otimização dos processos ao conectar múltiplas fontes emissoras a sistemas integrados de transporte e armazenamento de CO₂. Por fim, exploraremos os principais desafios e oportunidades que os hubs e clusters apresentam para o desenvolvimento sustentável dos setores energético e industrial, com ênfase especial no contexto brasileiro.

2.1 Transição Energética

A crescente demanda global por energia tem resultado em um aumento significativo na emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), especialmente o CO₂, intensificando o aquecimento global e as mudanças climáticas. Esse fenômeno é impulsionado pelo crescimento populacional, avanços tecnológicos e outros fatores (YANG *et al.*, 2023; STOCKER, 2014; ROSE; AL., 2017). Apesar da urgência na transição para energias renováveis, os combustíveis fósseis ainda predominam devido à infraestrutura consolidada, à alta demanda global e à estabilidade energética que proporcionam enquanto as fontes renováveis avançam e escalam em viabilidade.

As emissões antropogênicas de CO₂ e outros GEE são os principais contribuintes para as mudanças climáticas. Essas emissões de CO₂ estão diretamente ligadas a processos industriais e ao consumo de energia, tornando fundamental a transição para fontes renováveis e o uso eficiente da energia para alcançar a neutralidade de carbono (ZHOU, 2023; YANG *et al.*, 2023; TAN *et al.*, 2016; AMINU *et al.*, 2017)

Segundo o cenário de desenvolvimento sustentável projetado pela Agência Internacional de Energia (IEA), será necessário armazenar cerca de 650 MtCO₂ antropogênico por ano até 2030 para que as metas de redução de emissões sejam alcançadas. Atualmente, os grandes projetos comerciais de CCS possuem uma capacidade de armazenamento em torno de 40 Mt por ano, o que corresponde a aproximadamente 6% do volume necessário.

Os setores de energia e indústria estão entre os principais responsáveis pelas emissões globais de CO₂, sendo que o setor industrial responde por cerca de 20% do total. Apesar de suas emissões absolutas serem menores do que as de outros setores, o setor industrial apresentou o crescimento mais acelerado nas emissões de GEE entre 1990 e 2019 (IEA, 2020; OH; AL-JUAIED, 2024). Em um cenário de escassez energética e mudanças climáticas, atingir as metas

de neutralidade de carbono é uma ambição premente.

Até 2050, estima-se que o aquecimento global chegue a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (IPCC, 2018). Assim, alcançar emissões líquidas zero de CO₂ até meados deste século, ou antes, é fundamental para limitar o aquecimento global e evitar impactos climáticos severos. De acordo com a IEA, em seu relatório Net Zero by 2050 (BOUCKAERT *et al.*, 2021), há a necessidade de redução da energia fóssil consumida atualmente é de aproximadamente 80%, com repercussões consideráveis sobre as refinarias de petróleo.

Ao longo dos anos, as emissões de GEE, especialmente o CO₂, cresceram continuamente, resultando em impactos globais consideráveis em escala global, como o aumento das temperaturas. Esse cenário se agrava com a crescente demanda por energia impulsionada pelo rápido crescimento populacional. A figura 1 ilustra a evolução dos GEE em nível global, destacando a necessidade urgente de estratégias para mitigação.

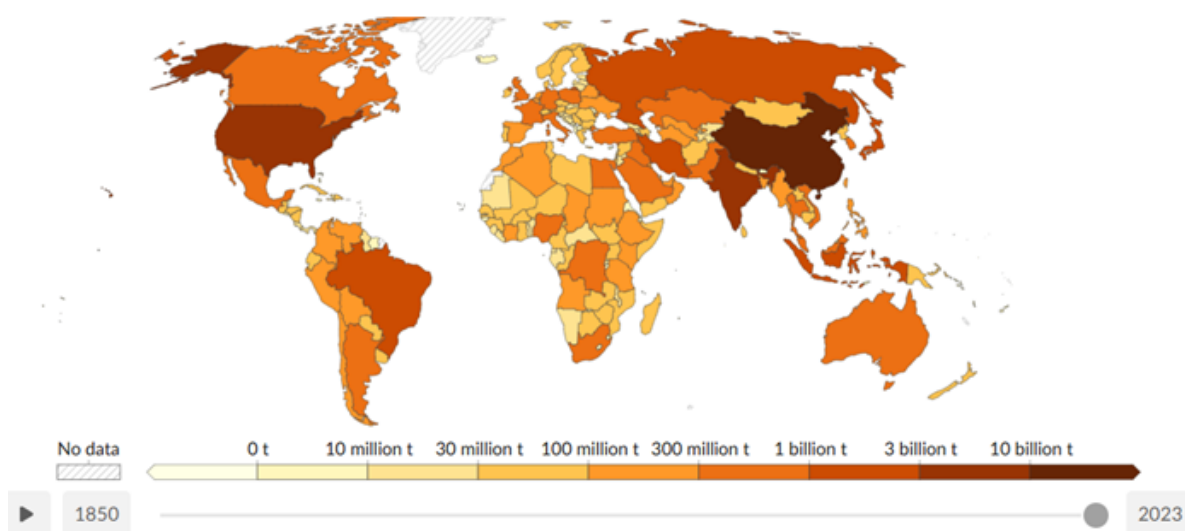


Figura 1 – Mapa de calor global de emissões de Gases de Efeito Estufa. Fonte: <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>

Em um panorama global, a Agência Internacional de Energia (IEA) elaborou um gráfico que apresenta as emissões de CO₂ nos principais países e regiões do mundo, como pode ser observado na Figura 2. O gráfico apresenta os dados reais de emissões referentes ao ano de 2021, marcando um ponto de referência importante após a queda temporária nas emissões globais provocada pelos efeitos iniciais da pandemia da Covid-19. Com base nesses dados, a IEA traçou projeções para os anos seguintes, considerando diferentes cenários de políticas climáticas e transição energética. Essas previsões permitem visualizar possíveis trajetórias de emissões, evidenciando o papel que cada região pode desempenhar no enfrentamento das mudanças climáticas e reforçando a urgência de medidas efetivas para atingir as metas do Acordo de Paris e limitar o aquecimento global.

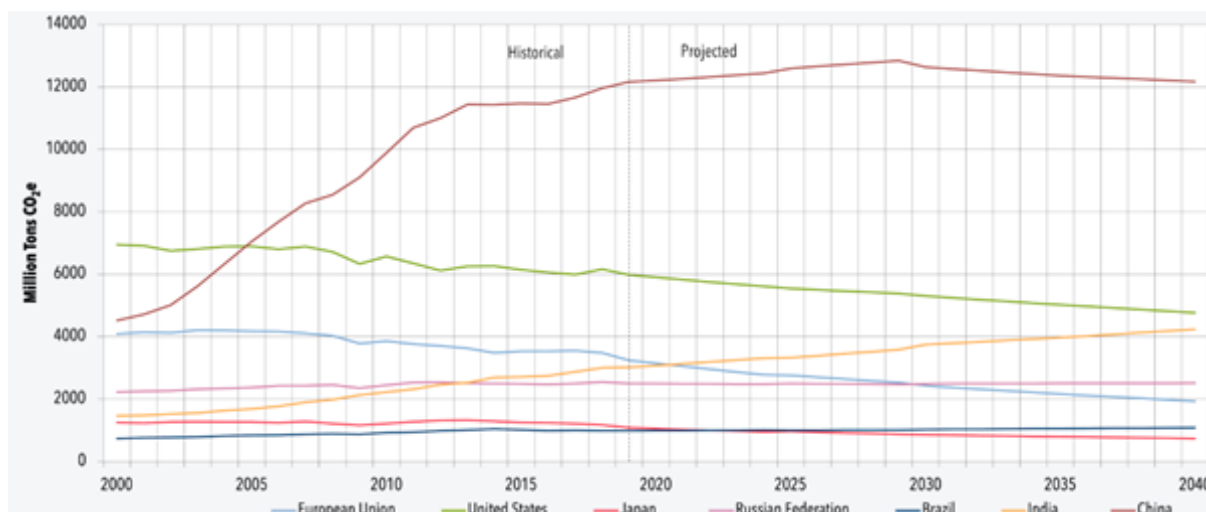


Figura 2 – Emissões de CO₂ nos principais países e regiões. Fonte: (IEA, 2021)

Diante disso, é essencial adotar estratégias eficazes para reduzir as emissões, incluindo a transição para fontes renováveis e a implementação de tecnologias mais limpas, garantindo um futuro mais sustentável.

2.2 Captura e Armazenamento de Carbono

Em busca de uma transição energética sustentável, o CCS surge como uma estratégia crucial para a redução das emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa. Por ser um método tecnicamente viável, o CCS permite diminuir significativamente as emissões provenientes de fontes como geração de energia, processamento de gás natural e processos industriais em curto prazo (TAN *et al.*, 2016; BRINCKERHOFF *et al.*, 2011). Nesse contexto, o CCS é reconhecido como uma solução-chave para mitigar as emissões de carbono nos setores energético e industrial, sendo fundamental para o cumprimento das metas ambientais globais, incluindo o limite de aquecimento a 2°C (IPCC, 2005; IEA, 2016; YANG *et al.*, 2023).

Estima-se que o CCS possa contribuir com 14% do potencial total de mitigação de gases de efeito estufa necessário para limitar o aquecimento global a 2°C até 2050 (TAN *et al.*, 2016; IBP, 2024). Nesse sentido, a adoção dessas tecnologias é fundamental para impulsionar a transição para um futuro de baixo carbono, tornando-se uma ferramenta estratégica na redução das emissões, especialmente de CO₂, e no combate às mudanças climáticas.

O CCS retém o dióxido de carbono gerado pela queima de combustíveis fósseis, transportando-o para locais seguros de armazenamento a longo prazo, evitando sua liberação na atmosfera (IPCC, 2005; CALLAS *et al.*, 2022). Sob uma perspectiva sequencial, a cadeia de valor do CCS é estruturada em três etapas fundamentais para mitigar as emissões de CO₂ oriundas de atividades industriais: (i) captura do CO₂, seja diretamente da atmosfera ou por meio de processos industriais de separação; (ii) transporte até locais apropriados; e (iii) armazenamento permanente

em formações geológicas profundas ou reaproveitamento como insumo para novos produtos e processos. No entanto, dada a complexidade técnica e os custos elevados associados a cada fase, a cooperação entre diferentes agentes industriais é essencial para viabilizar projetos de CCS de forma eficiente, tanto do ponto de vista operacional quanto econômico.

Atualmente, os modelos de negócios para CCS estão consolidados em diversos países e, de modo geral, são classificados em duas categorias principais: cadeia completa e cadeia parcial. No modelo de cadeia completa, uma única entidade é responsável por todas as etapas da cadeia de valor (da captura ao armazenamento). Essa configuração foi amplamente adotada em projetos pioneiros (first-of-a-kind), mas seu alto custo de implementação e os riscos concentrados tornaram esse modelo progressivamente menos atrativo.

Em contrapartida, o modelo de cadeia parcial fragmenta as responsabilidades entre diferentes operadores especializados, permitindo a criação de mercados de nicho e serviços integrados. Essa abordagem tem se destacado por distribuir riscos entre os participantes, inibir práticas monopolistas e facilitar a escalabilidade dos projetos de CCS (IEA, 2023a; OGCI, 2023).

Três formatos principais emergem nesse modelo segmentado: (i) Captura como Serviço (capture as a service, ou CaaS); (ii) Transporte como Serviço (Transportation as a Service, ou TaaS) e; (iii) Armazenamento como Serviço (Storage as a Service, ou StaaS). Provedores de CaaS assumem o projeto, construção e operação de sistemas de captura de CO₂, permitindo que os emissores mantenham o foco em suas atividades principais. No modelo TaaS, empresas especializadas oferecem soluções de transporte, ou seja, por modais terrestres, fluviais ou marítimos, para transferir o CO₂ capturado até os pontos de uso ou armazenamento. Já os operadores de StaaS oferecem serviços completos de armazenamento, incluindo seleção e caracterização de sítios geológicos, perfuração e operação de poços, monitoramento ambiental e gerenciamento de riscos e seguros. Na prática, muitas empresas combinam dois ou mais desses serviços, refletindo a crescente complexidade e interdependência da cadeia de valor do CCS (GCCSI, 2024a).

2.2.1 CCS no Contexto brasileiro

A matriz energética do Brasil é considerada uma das mais sustentáveis do mundo, contando com uma parcela considerável de recursos renováveis, como energia hidrelétrica, eólica e solar. Contudo, ainda existe um extenso caminho a ser percorrido, pois muitos dos GEE estão ligados às alterações no uso do solo e aos setores industriais e energéticos, que continuam a gerar volumes significativos de CO₂, tornando o CCS uma opção estratégica para a descarbonização (ALLAH; MARQUES; CARVALHO, 2024; UNFCCC, 2015).

As atividades de pesquisa voltadas para CCS começaram em 2006 no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras (CENPES), em colaboração com universidades e instituições brasileiras de pesquisa e desenvolvimento, no âmbito da Rede de P&D em Mudanças Climáticas

e Sequestro de Carbono. O principal objetivo da iniciativa foi construir e fortalecer a base tecnológica e a infraestrutura nacional, além de aplicar os resultados obtidos diretamente nas operações da empresa (IGLESIAS *et al.*, 2015).

Além disso, alinhado com as tendências globais, o primeiro trabalho que buscou elaborar o potencial das regiões brasileiras para o armazenamento geológico de CO₂ foi o Atlas Brasileiro de CCS (KETZER *et al.*, 2015). O Atlas foi um marco na identificação do potencial de armazenamento geológico de CO₂ no Brasil. O levantamento identificou formações geológicas adequadas, com destaque para as bacias sedimentares *onshore* e *offshore*, como locais estratégicos para a estocagem segura de carbono. Esse atlas foi fundamental para demonstrar a viabilidade da tecnologia CCS no país, contribuindo para iniciativas de descarbonização e fortalecendo o papel do Brasil nas ações globais de redução das emissões de GEE.

A relevância do Atlas CCS tornou-se ainda mais evidente quando observamos as características geológicas do Brasil. O conhecimento detalhado das bacias sedimentares mapeadas no estudo está diretamente ligado à formação geológica do país, que oferece condições naturais ideais para o armazenamento de CO₂, reforçando a viabilidade técnica e estratégica da implementação do CCS em território nacional.

Com o passar dos anos, criou-se o Sistema de Informações Geográficas (GIS) CCUS Brasil, que é uma plataforma hospedada em nuvem e disponibilizada gratuitamente e terá um impacto significativo na aceleração das tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de CO₂ (CCUS) no país, contribuindo para a descarbonização das atividades do setor industrial nacional. Além disso, o projeto inclui a criação de um novo Atlas Digital de CCUS no Brasil, voltado para a divulgação técnico-científica dos conteúdos abordados, destacando a metodologia aplicada, os dados incorporados na plataforma, as premissas técnicas adotadas e os resultados alcançados (PUC, 2024).

Essas iniciativas são especialmente importantes diante do grande potencial das bacias sedimentares brasileiras, especialmente na área *offshore*, as quais possuem grande capacidade para armazenar CO₂ (GOULART *et al.*, 2020; KETZER *et al.*, 2015; CIOTTA *et al.*, 2021). A análise dessas regiões para a aplicação do CCS é uma estratégia essencial para a descarbonização, pois permite identificar os locais com maiores emissões e direcionar ações mais eficazes para a redução do carbono.

No Brasil, houve progressos notáveis em CCS entre 2005 e 2020 (IGLESIAS *et al.*, 2015). Contudo, a maior parte dos progressos ainda está fortemente vinculada ao conceito de Recuperação Aprimorada de Petróleo (RAP) ou pesquisas acadêmicas, que não se concretizaram. Portanto, o que se vê no país é a implementação da RAP, e não o CCS de fato. Entretanto, apesar dessas limitações no cenário geral, a Petrobras destaca-se como líder mundial em projetos de CCUS, tendo em vista que em 2024, reinjetou 14,2 milhões de toneladas de CO₂ nos reservatórios do pré-sal da Bacia de Santos, o que corresponde a 28% da capacidade global anual de injeção de CO₂ reportada pelo GCCSI. Desde 2008, a empresa acumulou 67,9 milhões de toneladas de

CO₂ reinjetadas, utilizando RAP associada ao CCUS (GCCSI, 2024c)

Para avançar na implementação do CCS no país, é fundamental compreender o potencial geológico para armazenamento de CO₂. Nesse sentido, a primeira análise da viabilidade do armazenamento de CO₂ nas áreas *offshore* brasileiras em nível de bacia foi apresentada por (KETZER *et al.*, 2015) e foram categorizadas em três níveis de prospectividade: baixa, média e alta. Com base nessa classificação, as bacias de Camamu-Almada e Ceará foram consideradas de baixa prospectividade; Sergipe-Alagoas e Espírito Santo, de média; e Campos, Santos, Potiguar e Recôncavo, de alta prospectividade para armazenamento geológico de CO₂ (CIOTTA *et al.*, 2021).



Figura 3 – Seleção de áreas com potencial para armazenamento de CO₂. Fonte: (CIOTTA *et al.*, 2021)

Segundo Iglesias *et al.* (2015), estudos pioneiros sobre CCS e a capacidade teórica de armazenamento de CO₂ em campos de hidrocarbonetos, aquíferos e jazidas de carvão no Brasil indicaram que as bacias sedimentares do país poderiam, potencialmente, acomodar mais de 2.035 GtCO₂. Avaliações mais recentes reforçam esse potencial, apontando que o Brasil está preparado para impulsionar projetos promissores de CCS (CIOTTA *et al.*, 2021).

A Lei nº 15.042/2024, sancionada em dezembro de 2024, institui o Sistema Brasileiro de

Comércio de Emissões (SBCE) com o objetivo de criar um ambiente regulado para a negociação de créditos de carbono no Brasil. Essa legislação busca incentivar a redução das emissões de GEE e promover a preservação ambiental por meio de mecanismos econômicos que valorizam ações sustentáveis no país (BRASIL, 2024).

Nesse contexto regulatório em consolidação, a implementação de atividades de CCS torna-se essencial para alcançar metas efetivas de mitigação das emissões de CO₂. Embora as tecnologias de CCS apresentem desafios técnicos e operacionais, seu avanço, aliado a esforços coordenados internacionalmente e ao alinhamento com o Acordo de Paris, é fundamental para potencializar o aplicação do CCS (NUNES; COSTA, 2019).

2.3 Armazenamento Geológico de CO₂

Além de identificar oportunidades estratégicas para a aplicação do CCS nas bacias sedimentares, é igualmente importante compreender tecnicamente como o armazenamento geológico de CO₂ (geological carbon storage, ou GCS) funciona. O IPCC (2005) define a captura e o GCS como um processo que envolve a separação do CO₂ emitido por fontes estacionárias, como usinas de energia e instalações industriais, seguida do transporte e do armazenamento de longo prazo em formações geológicas adequadas. Após a captura, o CO₂ pode ser convertido em estado líquido e transportado por dutos, rodovias ou vias marítimas até locais como minas desativadas, campos de petróleo esgotados ou outras formações geológicas capazes de mantê-lo isolado da atmosfera.

Luo *et al.* (2023) apontam que o armazenamento *offshore* em ambientes marinhos profundos, apesar de ainda incipiente no Brasil, constitui uma alternativa técnica e economicamente promissora para o sequestro de carbono, dada a estabilidade e densidade do CO₂ em condições subaquáticas. Ciotta *et al.* (2021) destacam que, devido à extensão territorial e importância econômica do Brasil, os esforços do país na redução de emissões atraem atenção internacional. O armazenamento de CO₂ em campos de petróleo e gás esgotados *offshore* apresenta vantagens como infraestrutura existente, dados técnicos disponíveis, viabilidade econômica e menor impacto ambiental. O estudo estima a capacidade de 85 campos brasileiros, relacionando-a às emissões e à infraestrutura, e conclui que a proximidade de grandes cidades costeiras favorece o uso desses campos para armazenamento, reduzindo a distância de transporte e aproveitando estruturas já instaladas.

De acordo com Aminu *et al.* (2017), o GCS se destaca como uma das opções mais promissoras para o sequestro de CO₂. Conforme representado na Figura 4, essa categoria abrange diferentes formações geológicas, incluindo: (1) reservatórios de petróleo e gás esgotados, (2) uso de CO₂ para recuperação avançada de petróleo e gás, (3_a e 3_b) formações salinas profundas, tanto *offshore* quanto *onshore*, (4) uso de CO₂ para recuperação de metano em camadas de carvão, (5) camadas de carvão não mineráveis, e (6) outras opções sugeridas, como basaltos,

folhelhos petrolíferos e cavidades subterrâneas. Essas alternativas oferecem uma ampla gama de possibilidades técnicas para isolar o CO₂ da atmosfera, aproveitando as características geológicas do subsolo para garantir segurança e estabilidade no longo prazo.

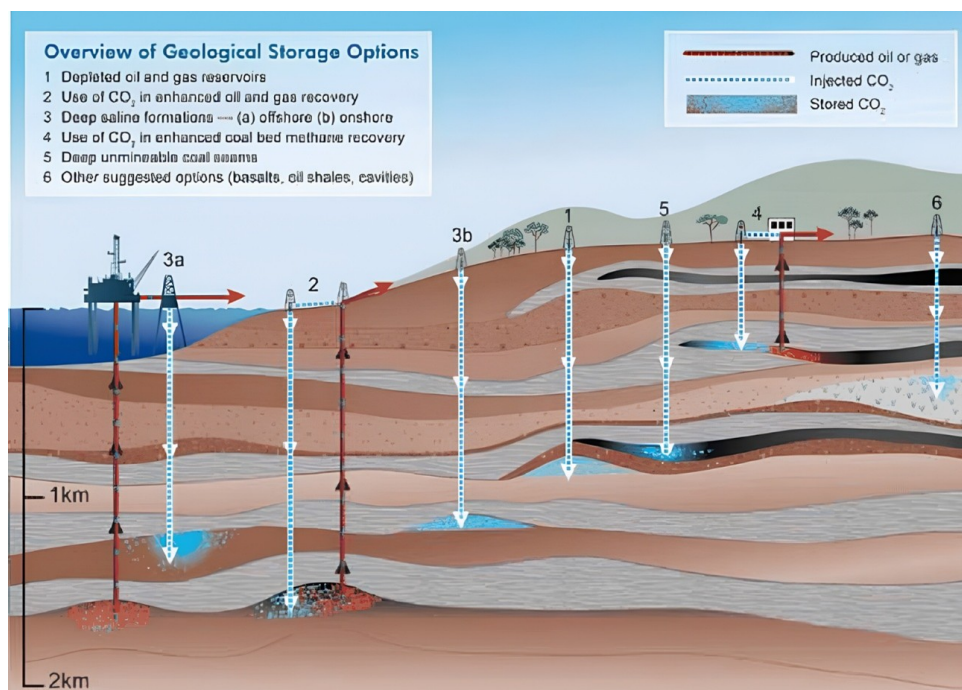


Figura 4 – Algumas opções para armazenamento geológico de CO₂. Fonte: (IPCC, 2005)

A Figura 4 apresenta uma visão geral das principais alternativas para o GCS. Entre elas, destaca-se o armazenamento subterrâneo como uma das estratégias mais promissoras para o sequestro seguro e duradouro de carbono (IPCC, 2005). Esse tipo de armazenamento inclui formações geológicas profundas como aquíferos salinos, reservatórios de petróleo e gás esgotados, além de camadas de carvão (BACHU, 2000; YANG *et al.*, 2008; AMINU *et al.*, 2017).

Estudos mais recentes apontam que o Brasil possui condições favoráveis para avançar com projetos eficazes de GCS (CIOTTA *et al.*, 2021). Entre os locais com maior potencial, destacam-se as bacias *offshore* e os reservatórios depletados, especialmente na região do Pré-Sal (DREXLER *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022).

O GCS apresenta um significativo potencial de mitigação, com estimativas apontando para a possibilidade de reduzir até 26,4 milhões de toneladas de CO₂ equivalente por ano. Além disso, estudos indicam que os reservatórios geológicos brasileiros possuem capacidade para armazenar cerca de 2.000 GtCO₂ (CÂMARA; ANDRADE; ROCHA, 2011).

De acordo com Bachu (2000), o GCS utiliza tecnologias já consolidadas pela indústria de petróleo e gás, o que reduz a necessidade de novos desenvolvimentos tecnológicos. O principal desafio, no entanto, está na identificação dos locais e métodos mais adequados para garantir

o armazenamento seguro e duradouro do CO₂. Entre as opções mais promissoras estão os reservatórios de petróleo e gás esgotados e os aquíferos salinos profundos.

A capacidade de armazenamento de CO₂ do Brasil é atraente devido às bacias sedimentares que abrangem o país, tanto em terra quanto no mar (KETZER *et al.*, 2015; GOULART *et al.*, 2020). Essa capacidade é estimada em 3121 MtCO₂, exclusivamente nos campos offshore (CIOTTA *et al.*, 2021).

Além disso, muitas das principais cidades brasileiras e, consequentemente, grandes fontes de emissões de CO₂ estão localizadas no litoral. Isso torna os campos *offshore* especialmente atrativos para o GCS, pois reduzem a distância necessária para o transporte do carbono capturado. Assim, o uso de campos de petróleo e gás esgotados como locais de armazenamento representa uma alternativa eficiente ao descomissionamento tradicional, ao reaproveitar a infraestrutura existente e o conhecimento técnico já disponível (YANG *et al.*, 2023). As bacias de Santos e Campos aparecem como as áreas mais promissoras, seguidas pelo Recôncavo e, em menor grau, pelo Nordeste. Esses fatores indicam um cenário favorável para o desenvolvimento de projetos-piloto de CCS próximos às regiões costeiras com maiores emissões (CIOTTA *et al.*, 2021).

Essa perspectiva territorial ganha ainda mais relevância quando considerada em conjunto com os setores que mais contribuem para as emissões no país. Dentre eles, o setor de óleo e gás se destaca como o principal emissor de GEEs no Brasil, sendo responsável por mais de 65% das emissões nacionais (SILVA; WEBER, 2023). Apesar de seu papel estratégico na segurança energética nacional, o setor tem buscado alinhar-se às metas de transição energética, adotando medidas para mitigar suas emissões. Entre essas ações estão a adoção de tecnologias de CCUS, investimentos em fontes renováveis de energia e outras estratégias de compensação (NETTO *et al.*, 2021).

O armazenamento de CO₂, aliado a métodos de seleção e qualificação de locais de injeção (CALLAS *et al.*, 2022), representa uma tecnologia com grande potencial para o setor de óleo e gás, devido à sua capacidade de armazenar CO₂ em reservatórios depletados (ZOBACK; SMIT, 2023; GCCSI, 2022). Não de forma surpreendente, as áreas do pré-sal estabeleceram recordes em reinjeção de CO₂ em 2022, mesmo operando com emissões totais inferiores à média global de 9,5 kgCO₂e.

No ano de 2023, o GCCSI registrou 115 projetos de CCS globalmente (GCCSI, 2023). No Brasil, a cadeia ainda está em consolidação regulatória (ANP, 2024) e requererá incentivos e investimentos em pesquisa e desenvolvimento (CCSBR, 2023), mas é amplamente reconhecida como essencial para o progresso da economia do Brasil em transição energética (IBP, 2024).

Nesse sentido, o avanço dos projetos de CCS é fundamental para que haja uma redução das emissões de CO₂ nos setores de energia e indústria, contribuindo efetivamente para a transição energética do país.

2.4 Terminologia de Cluster e Hub de CCS

Os conceitos de clusters e hubs de CCS foram desenvolvidos recentemente para organizar melhor as estratégias de captura e armazenamento de carbono. Um cluster industrial refere-se a uma concentração geográfica de empresas, fornecedores e instituições interligadas que atuam em um mesmo setor. Esses agrupamentos surgem por diversos fatores, como a proximidade de matérias-primas, disponibilidade de transporte (como portos), oferta de mão de obra qualificada e acesso a mercados consumidores. No contexto do CCS, a formação de clusters é particularmente relevante, pois muitas fontes intensivas de emissão de CO₂, sejam industriais ou ligadas à geração de energia, tendem a se concentrar em áreas geográficas compactas. Esses agrupamentos geralmente se desenvolvem ao redor de polos energéticos, usinas ou zonas portuárias, favorecendo a implementação de infraestrutura compartilhada para projetos de CCS (GCCSI, 2016).

Já o conceito de hub pode assumir dois significados. O primeiro refere-se a pontos centrais de coleta ou distribuição de CO₂, que podem atender a um ou mais clusters. O segundo diz respeito ao hub de armazenamento, onde o CO₂ coletado é injetado em reservatórios adequados. Os hubs podem ser instalados tanto na extremidade de captura quanto na extremidade de armazenamento de dutos multiusuário ou mesmo em ambos os pontos, funcionando como elementos essenciais na estrutura integrada de transporte e sequestro de carbono (GCCSI, 2016; WANG, 2024).

Os hubs de coleta atuam como pontos de conexão entre diversas fontes de captura de CO₂, formando o que se denomina “cluster”. Dentro desses clusters, os volumes capturados variam significativamente de acordo com as características de cada fonte emissora. Ao centralizar o transporte do CO₂ comprimido, os hubs de coleta e armazenamento possibilitam um sistema ponto a ponto mais eficiente, reduzindo os custos associados à infraestrutura de transporte entre os emissores individuais e os locais de injeção geológica.

Wang (2024) destaca três principais vantagens no desenvolvimento de clusters e hubs de CCUS: (i) compartilhamento de custos, que permite dividir investimentos e despesas operacionais entre múltiplas fontes industriais conectadas a locais de armazenamento, reduzindo o custo por tonelada de CO₂ transportado e viabilizando novos projetos; (ii) estabilidade operacional, obtida pela integração entre diversos emissores e sumidouros, equilibrando variações na taxa de emissão e na capacidade de armazenamento; e (iii) ambiente político e regulatório favorável, com menor impacto ambiental e social, além de maior agilidade nos processos de licenciamento. Segundo GCCSI (2016) e Sun *et al.* (2021), essa abordagem é especialmente relevante para plantas de menor escala, que, individualmente, não conseguiriam arcar com os custos da cadeia completa de CCS. A integração em clusters industriais e hubs estratégicos, inspirada em modelos logísticos, promove economias de escala e eficiência no transporte por meio de modais integrados.

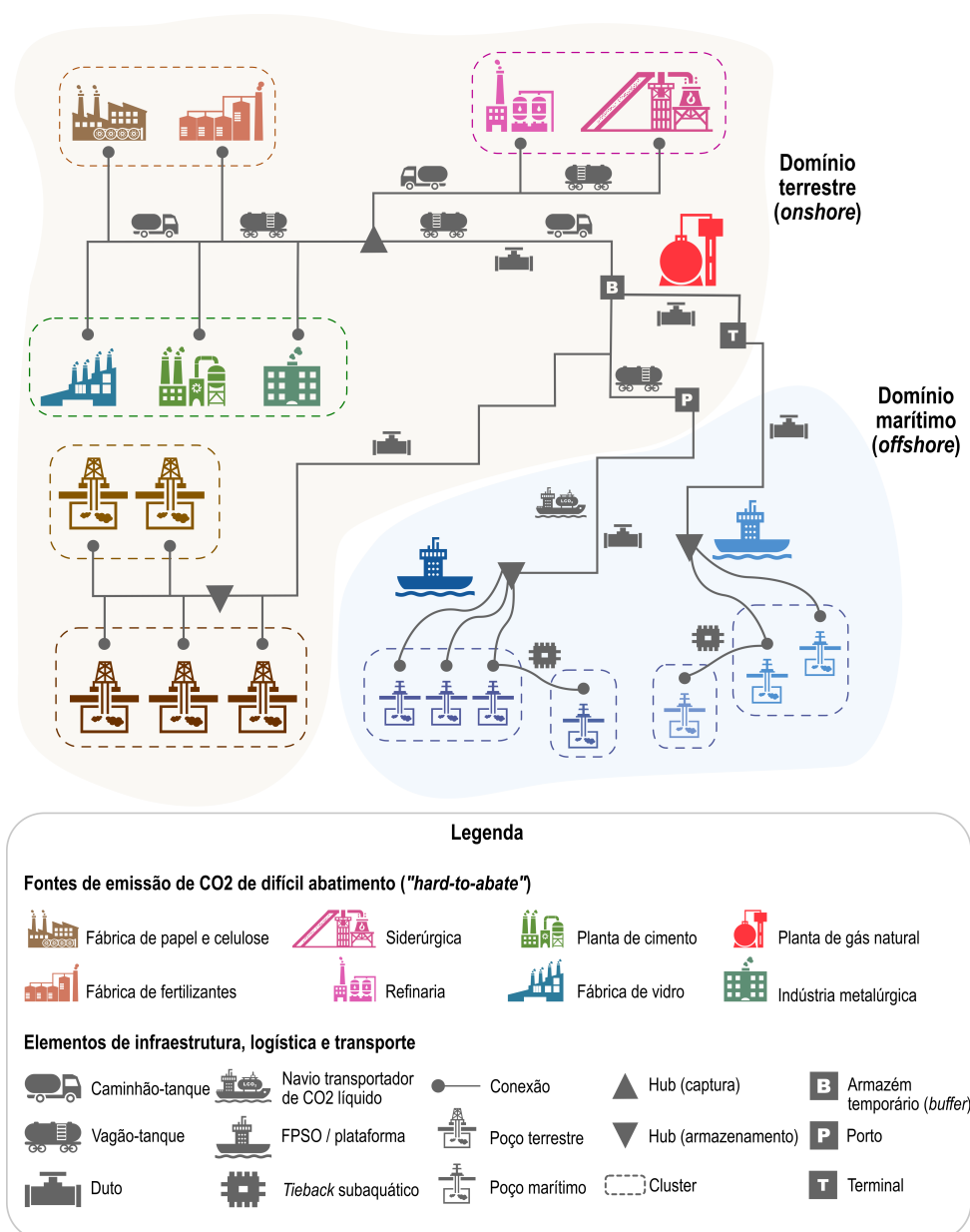


Figura 5 – Mapa conceitual de uma cadeia de valor de CCS altamente interconectada, conectando emissores industriais *offshore*, redes de transporte multimodal e locais de armazenamento *offshore*

A Figura 5 mostra a cadeia integrada de CCS em ambientes terrestres e marítimos, envolvendo várias fontes industriais difíceis de descarbonização. A logística inclui caminhões, vagões, navios, dutos e estruturas offshore, conectados a hubs, terminais e depósitos organizados em clusters para otimizar o transporte e o armazenamento do CO₂ em reservatórios *onshore* e *offshore*.

O modelo de clusters e hubs de CCS baseia-se em três pilares: infraestrutura compartilhada, transporte e capacidade de armazenamento, apoiados pela concentração de emissões, o que torna o sistema mais econômico e eficiente. Apresentamos a seguir os principais termos associados a clusters, hubs e demais elementos fundamentais da cadeia de valor do CCUS, que servem de base conceitual para os modelos matemáticos e de dados desenvolvidos neste estudo.

Esses conceitos foram adaptados a partir de referências técnicas anteriores (GCCSI, 2016) e contextualizados à realidade brasileira, de forma a refletir as particularidades do território nacional, a diversidade dos modais logísticos e as exigências de infraestrutura para viabilizar projetos de CCUS. Os três primeiros termos são especialmente relevantes para a etapa de estruturação dos dados, enquanto os demais funcionam como extensões conceituais que sustentam outras dimensões da modelagem proposta.

- **Fonte de Difícil Abatimento (HTA):** Um emissor pontual de CO₂, como uma instalação industrial ou planta de produção, cuja atividade principal pertence a um ou mais dos seguintes setores: alumínio, cimento, vidro, papel e celulose ou aço.
- **Fonte Territorial:** Um município federativo com uma soma anual de emissões de CO₂ diferente de zero dos setores energético e industrial.
- **Escala Territorial:** Uma área territorial definida pela agregação de fontes territoriais, alinhada com as divisões geográficas estabelecidas pelo IBGE.
- **Cluster de captura de CCS:** Uma concentração geográfica de fontes HTA com potencial para compartilhar infraestrutura de captura de CO₂.
- **Cluster de armazenamento de CCS:** Uma concentração geográfica de poços terrestres ou marítimos localizados sobre bacias sedimentares de alta prospectividade, elegíveis para injeção de CO₂.
- **Hub de captura de CCS:** Um nó estratégico projetado para agregar CO₂ de um ou mais clusters de captura de CCS e conectá-lo a modalidades de transporte.
- **Hub de armazenamento de CCS:** Um nó estratégico que serve como ponto de entrega para CO₂ transportado de um hub de captura de CCS para armazenamento geológico permanente.
- **Redes de CCS:** Um sistema integrado composto por vários clusters e hubs de captura e armazenamento de CCS dentro da mesma escala territorial.

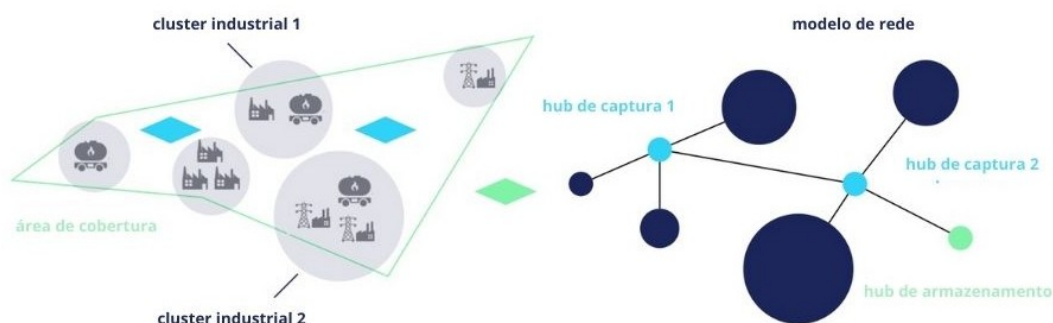


Figura 6 – Visão Geral de Cluster e Hubs de CCS. Fonte: Elaborado pela autora

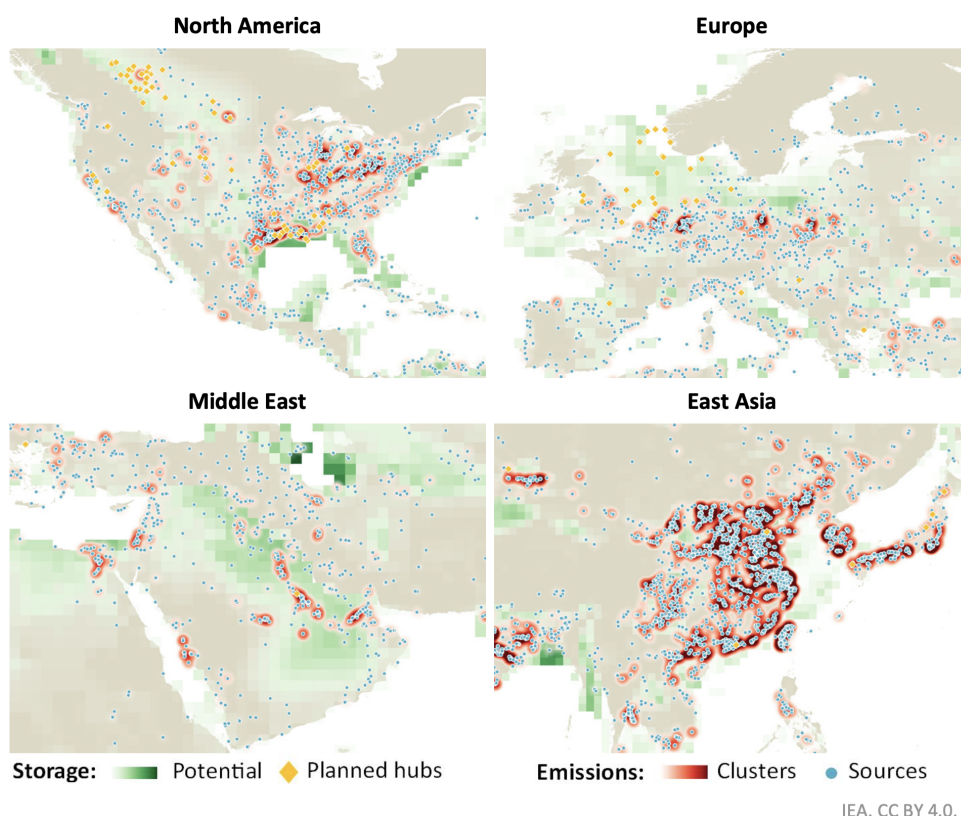


Figura 7 – Tríade central de interesse (numerada) e fatores extrínsecos que sustentam o modelo de clusters e hubs do CCS. Fonte: Elaborado pela autora

2.5 Origem e evolução dos conceitos de hubs e clusters

Os conceitos de hubs e clusters industriais de CCS surgiram possivelmente na Iniciativa Climática de Roterdã, lançada em 2006 na Holanda, com o objetivo de promover cooperação entre diversos atores industriais e criar redes integradas de captura, transporte e armazenamento de CO₂ (ENGELBURG, 2011; EVERAARS, 2012). Essa iniciativa, apoiada por políticas locais e compromissos de longo prazo, deu origem ao hub Porthos, previsto para iniciar operações em 2026, com capacidade de reduzir 2,5 milhões de toneladas de CO₂ por ano por 15 anos. Em 2007, o Departamento de Minas e Petróleo da Austrália Ocidental lançou o South West Hub, primeiro projeto piloto de CCS *onshore* na região, voltado à mitigação das emissões de carvão na Bacia de Perth. Apesar da meta inicial de captar entre 5 e 6 Mtpa até 2023, o projeto permanece em estágio inicial e foi superado em escala por iniciativas como o CarbonNet, em Victoria, e os centros de Pilbara e Perth–Kwinana (STALKER; GENT, 2014; DMP/WA, 2013).

Em 2016, uma série de relatórios apontou a existência de 16 clusters e hubs industriais em grande escala, com potencial conjunto para capturar cerca de 60 Mtpa de CO₂ (GCCSI, 2016). Desde então, a aceleração das metas de descarbonização tem impulsionado o surgimento de novos projetos de CCS e modelos de negócios baseados em hubs em diversas regiões. Em resposta a esse avanço, a IEA elaborou em 2022, um mapeamento global que identifica clusters emissores de CO₂ de setores *hard-to-abate*, hubs planejados de CCS e o potencial teórico de armazenamento em regiões como América do Norte, Europa, Oriente Médio e Leste Asiático. O banco de dados concentra-se em fontes pontuais com emissões superiores a 0,1 Mtpa, abrangendo indústrias como aço, cimento, produtos químicos, refino e geração de energia (Figura 8).



IEA. CC BY 4.0.

Figura 8 – Clusters HTA, hubs CCS planejados e potencial de armazenamento de CO₂ para territórios internacionais selecionados em 2022. Fonte: adaptado de (IEA, 2023b), p. 82.

A América do Norte é um dos polos mais ativos em CCS, impulsionada por incentivos políticos e forte participação industrial. Nos estados do Texas, Louisiana e Mississippi, próximos a áreas de armazenamento offshore, há alta concentração de clusters e projetos, como a retomada do Petra Nova e planos para transformar Houston em um hub de baixo carbono, além de outras iniciativas em desenvolvimento (MECKEL *et al.*, 2021; WENDT *et al.*, 2022). No Canadá, Alberta reúne cerca de 10 grandes instalações, responsáveis por 53% das emissões industriais do país, destacando-se como polo estratégico de CCS (ZHAO *et al.*, 2024).

Na Europa, a Espanha aplicou uma metodologia para identificar 15 hubs industriais prioritários para CCS, sendo 11 do setor elétrico e 4 de indústrias intensivas em emissões,

majoritariamente costeiros, responsáveis por 20,6% das emissões nacionais em 2018. O estudo avaliou 183 instalações e 110 possíveis locais de armazenamento, considerando distância máxima de 200–300 km entre fonte e sumidouro, com critérios como capacidade e qualidade geológica, disponibilidade de dados e custos, sendo estes o principal entrave. Cimento, siderurgia e papel e celulose foram setores prioritários (SUN *et al.*, 2021).

Um estudo voltado aos países bálticos utilizou dados geológicos e espaciais integrados, além de análises regulatórias e de infraestrutura, para mapear possíveis clusters e hubs de CCS na região. Em 2021, as principais fontes emissoras da Estônia, Lituânia e Letônia emitiram cerca de 8,2, 6,0 e 1,75 Mtpa de CO₂, respectivamente, com destaque para os setores de energia, cimento, químicos e refino. O modelo proposto delineou três clusters conectados por diferentes modos de transporte, com armazenamento planejado tanto em terra quanto no local offshore E6, na Letônia, que é considerado o maior da região e capaz de atender 20 dos 26 maiores emissores. O estudo também identificou oportunidades de integração entre CCS e tecnologias como recuperação de calor geotérmico, carbonatação mineral e produção e armazenamento de hidrogênio, reforçando o papel estratégico dessas soluções na transição para a neutralidade de carbono nos países bálticos (SHOGENOVA *et al.*, 2023).

Dinamarca, Noruega, Holanda e Reino Unido lideram a CCS na Europa, seguidos por países como Bélgica, França e Alemanha, que avançam via parcerias. A União Europeia adota hubs de captura e armazenamento como modelo central, apoiada por políticas favoráveis e novos modelos de negócio; em 2023, havia 119 projetos em desenvolvimento (GCCSI, 2023). No Oriente Médio e Norte da África, oito países têm metas de emissões zero, mas a capacidade instalada é limitada: apenas 11 projetos em desenvolvimento e três operacionais (3,8 Mtpa), com destaque para o CCS de Jubail, na Arábia Saudita, previsto para 9 Mtpa em 2027 (ROWAIHY *et al.*, 2025; GCCSI, 2024c).

No Leste Asiático, Índia e China se destacam pelos esforços em CCS. Na Índia, segundo maior produtor mundial de cimento, um estudo identificou sete clusters potenciais para CCS a partir de 101 instalações, com capacidade de reduzir até 91 MtCO₂/ano. Quatro desses clusters estão na Bacia de Krishna-Godavari, mas a escassez de dados geológicos sobre armazenamento limita o avanço da tecnologia no país (GCCSI, 2024b). Já na China, estratégias de longo prazo foram desenvolvidas para a província de Guangdong, com foco na indústria petroquímica, utilizando infraestrutura de petróleo e gás existente (WANG, 2024).

2.6 Clusters e Hubs no contexto brasileiro

Relatórios recentes sugerem a divisão do Brasil em oito possíveis polos regionais de CCS, com potencial estimado de redução de cerca de 88,3 MtCO₂ por ano (S&P Global, 2023; OGCI, 2024). Esses polos foram classificados em três níveis conforme sua capacidade de mitigação, como mostrado na Tabela 1. Caso todos sejam implementados com sucesso, podem adicionar

até US\$ 3,2 bilhões anuais ao PIB e gerar cerca de 210 mil empregos. Com o desenvolvimento ainda em fase inicial, o Brasil tem a chance de aproveitar as lições de países que já operam polos de CCS.

Nível	Hub Regional	Unidades da federação participantes	Potencial de abatimento [MtCO ₂ /ano]	Setores industriais predominantes
1	Alto Sudeste	Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro	37.6	Ferro e aço, cimento, energia
2	SP-MS	Mato Grosso do Sul, São Paulo	18	Etanol, refinarias
3	Centro-Oeste	Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso	8.4	Etanol, cimento
	Alto Nordeste	Ceará, Rio Grande do Norte	6.1	Energia, cimento
	Baixo Nordeste	Alagoas, Bahia, Paraíba, Pernambuco, Sergipe	4.7	Cimento, amônia e metanol, processamento de gás
	Paraná	Paraná	4.8	Cimento, refinarias
	Rio Grande do Sul	Rio Grande do Sul	5	Energia, refinarias
	Santa Catarina	Santa Catarina	3.7	Energia

Tabela 1 – Hubs regionais no Brasil, suas unidades federativas participantes, potencial estimado de redução e setores industriais predominantes

O CCS tem ganhado destaque no Brasil pelo potencial de descarbonizar a indústria, com pesquisas concentradas no corredor Sul-Sudeste e propostas como um hub para destilarias de etanol (SILVA *et al.*, 2018). A Confederação Nacional da Indústria (CNI) apresenta três cenários de descarbonização: sem precificação, com taxação e com mercados de carbono. Ela destaca a necessidade de tecnologias acessíveis, engajamento industrial e estabilidade regulatória (CNI, 2023). Estima-se que siderurgia, química e materiais possam reduzir até 140 MtCO₂ nas próximas décadas (ICCBR, 2023), embora persistam lacunas para adaptar modelos de clusters e hubs ao contexto nacional.

O acordo entre o Governo do Estado do Rio de Janeiro e a Petrobras para o Hub de Cabiúnas prevê armazenar 0,1 MtCO₂/ano no norte fluminense, ainda como projeto de Pesquisa e Desenvolvimento. No Brasil, o desenvolvimento de clusters e hubs de CCS mas o projeto ainda está apenas na fase de pré-viabilidade, com regulamentações em elaboração, incluindo o “PL do CCS” (BRAZIL, 2022) e a Lei nº 14.993/2024, que atribuiu à ANP como órgão regulador das atividades de CCS no país (BRAZIL, 2024; ANP, 2025). Os hubs possuem um papel fundamental na expansão da CCS a curto prazo, ao oferecerem um caminho promissor para transformar essa tecnologia de um centro de custos em uma oportunidade de negócio viável.

No Brasil, o desenvolvimento da tecnologia de CCS tem sido historicamente ligado à indústria de petróleo e gás, principalmente por meio do RAP. O RAP reside em sua capacidade de gerar receita por meio do aumento na produção de petróleo, tornando economicamente viável a implementação de projetos de CCS que, de outra forma, seriam financeiramente inviáveis. No entanto, essa dependência limita o avanço da CCS em países com poucos recursos de hidrocarbonetos, os quais precisarão desenvolver estratégias alternativas para alcançar metas ambiciosas de descarbonização por meio do GCS (SUN *et al.*, 2021).

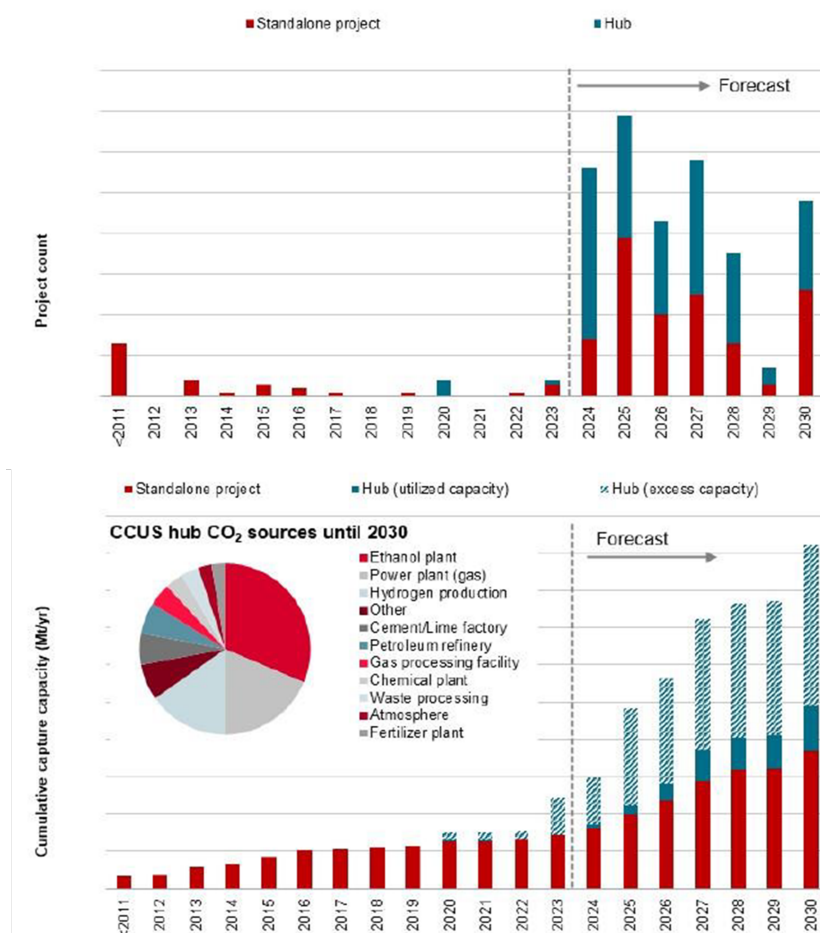


Figura 9 – Evolução de projetos de CCS: crescimento de hubs, capacidade de captura acumulada e fontes de CO₂ até 2030. Fonte: (S&P Global, 2023)

Grande parte da atividade industrial brasileira está concentrada nas áreas costeiras da região Sudeste. Destaca-se, nesse contexto, a expressiva atividade siderúrgica localizada em três estados (Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais), classificados pela S&P Global como a região do Alto Sudeste. Já a produção de etanol se concentra principalmente em duas regiões: SP e MS, formada pelos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, e a região Centro-Oeste, que abrange Goiás, Distrito Federal e Mato Grosso.

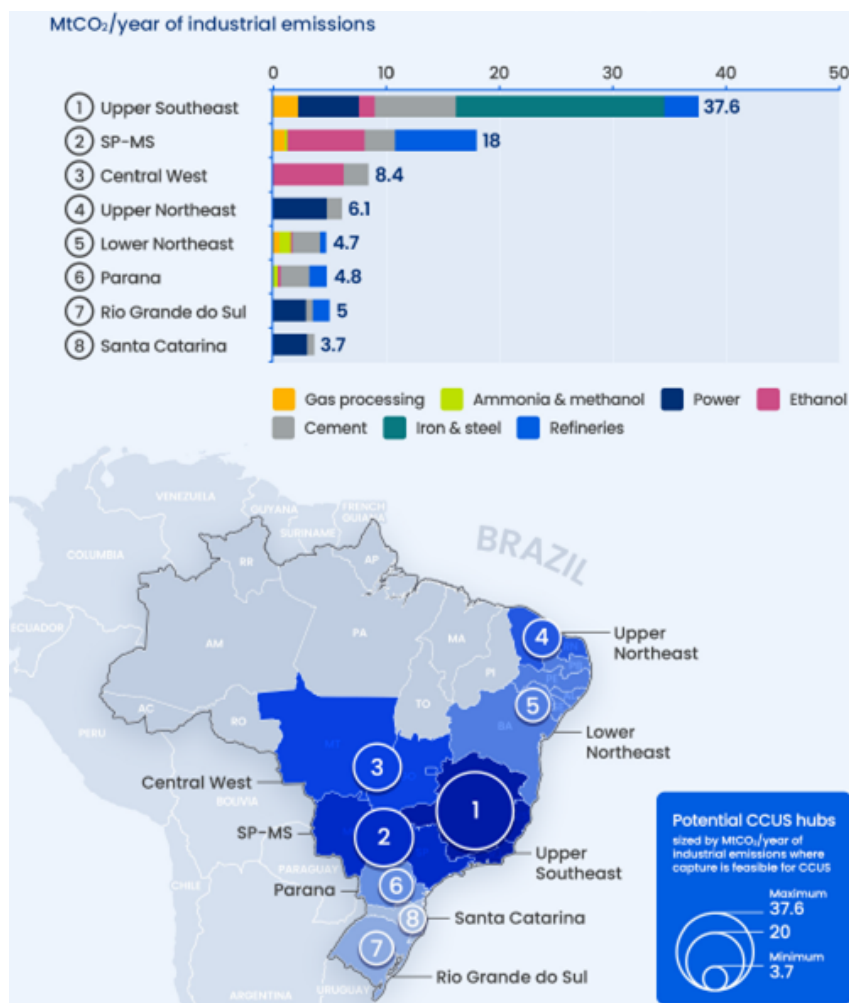


Figura 10 – Potencial de redução de CCS nas principais regiões do Brasil. Fonte: (OGCI, 2024)

A figura 10 apresenta o potencial de CCS nas principais regiões industriais do Brasil, com base nas emissões de CO₂, expressas em milhões de toneladas por ano (MtCO₂/ano). O mapa identifica oito regiões com viabilidade técnica para implantação de hubs de CCS, destacando o Sudeste como o principal polo, com 37,6 MtCO₂/ano. Os setores industriais emissores incluem energia, refinarias, cimento, ferro e aço, etanol, processamento de gás e produção de amônia/metanol. Regiões como SP-MS (18 MtCO₂/ano) e Centro-Oeste (8,4 MtCO₂/ano) também possuem destaque. Já as regiões Nordeste e Sul apresentam menor volume, mas ainda com potencial relevante.

A Petrobras identificou alto potencial de armazenamento de CO₂ nos campos esgotados da Bacia de Campos e na Bacia do Paraná, cuja formação salina profunda pode armazenar mais de 12 GtCO₂ (Figura 11). Estudos preliminares avaliam o potencial baseado na pressão, e a combinação de grandes emissões industriais com ampla capacidade de armazenamento torna essas áreas promissoras para polos de CCUS, desde que superados desafios técnicos, regulatórios e econômicos.

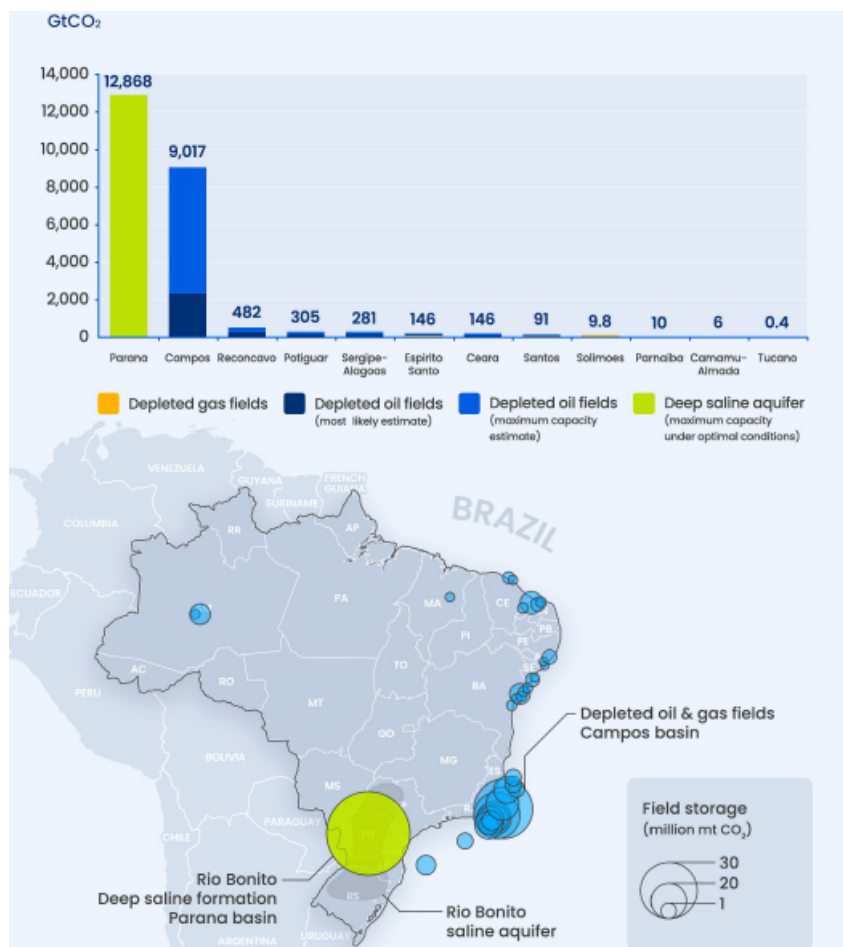


Figura 11 – Potencial de armazenamento subterrâneo do Brasil. Fonte: (OGCI, 2024)

Mas, ainda é necessário realizar uma avaliação financeira quantitativa mais detalhada para projetos de clusters de CCS, incluindo uma análise clara dos custos envolvidos na implementação e operação de clusters e hubs (Oil and Gas Climate Initiative (OGCI), 2019).

Superar desafios financeiros e tecnológicos é essencial para que o Brasil aproveite os benefícios dos clusters e hubs de CCS, que possibilitam economias de escala e reduzem custos e riscos para os setores industrial e energético (LIU; ZHANG; LIANG, 2023). A infraestrutura estratégica em áreas com alta concentração de emissões torna os projetos mais viáveis, consolidando uma cadeia de valor eficiente para a descarbonização. O setor de óleo e gás tem buscado estratégias integradas, planejando hubs próximos a múltiplas fontes emissoras para ampliar a captura de CO₂.

3 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem estruturada e progressiva para o desenvolvimento de um modelo de negócios de hubs e clusters de CCS (hub-and-clusters business model, ou HCBMs), dividida em três grandes etapas: avaliação estratégica, validação econômica e execução operacional. Considerando que o Brasil ainda está em estágio inicial na consolidação de uma cadeia de CCS plenamente operacional e enfrenta limitações na disponibilidade de dados específicos e confiáveis para decisões estratégicas, o trabalho concentra-se na fase crítica de triagem e seleção. Essa etapa inicial tem como objetivo identificar as áreas com maior potencial para o estabelecimento de hubs e clusters, com base em critérios técnico-científicos alinhados às metas de descarbonização. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia robusta e replicável, estruturada em três etapas principais.

1. **Preparação de dados:** com a curadoria e sistematização de bases relevantes;
2. **Análise geoespacial:** onde são aplicadas ferramentas analíticas para identificar padrões, sobreposições e áreas prioritárias;
3. **Geração de ativos de valor:** que são os produtos finais desta etapa (mapas, indicadores e classificações) que servirão de base técnica para orientar as fases posteriores.

A abordagem destaca a triagem como uma etapa inicial fundamental no desenvolvimento de HCBMs, estabelecendo uma base metodológica robusta que garante que decisões futuras sobre viabilidade econômica e execução operacional sejam respaldadas por critérios técnico-científicos rigorosos. Conforme ilustrado na Figura 12, essa fase estratégica permite a identificação preliminar de áreas com maior potencial para a implantação de clusters e hubs de CCS. Embora exploratória, a triagem é determinante para orientar os passos seguintes do processo, reduzindo incertezas e promovendo a alocação eficiente de recursos. A seguir, cada subprocesso que compõe a etapa de triagem e seleção é detalhado, precedido pela apresentação das premissas conceituais e metodológicas que embasam este estudo.

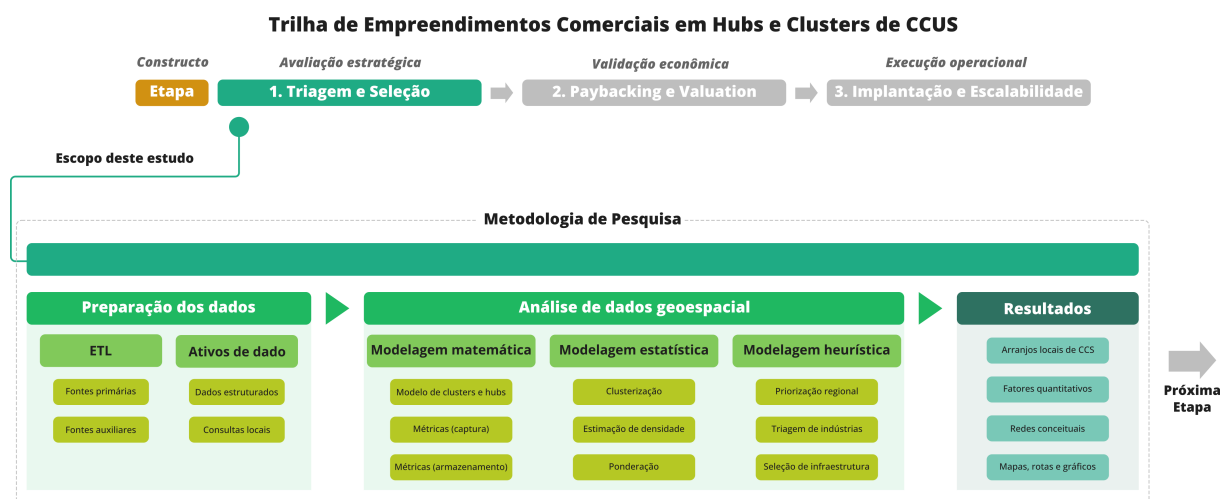


Figura 12 – Diagrama das etapas holísticas do projeto para um modelo de negócios de hubs e clusters da CCS e sua relação com o escopo e a metodologia de pesquisa deste estudo. Fonte: Elaborado pela autora

3.1 Poços elegíveis para clusters de armazenamento

A seleção de poços para injeção segura e permanente de CO₂ baseia-se em critérios técnicos rigorosos e nas normas da ANP, especialmente as Resoluções nº 699/2017 (ANP, 2017) e nº 817/2020 (ANP, 2020), que definem classificações operacionais e procedimentos para descomissionamento. Essas diretrizes garantem a integridade estrutural, o reaproveitamento seguro e o cumprimento dos requisitos ambientais para o armazenamento geológico de CO₂.

A base de dados utilizada para esta avaliação é composta majoritariamente por informações públicas disponibilizadas pela própria ANP, o que assegura transparência e replicabilidade ao processo metodológico. Os poços considerados elegíveis para integração em clusters de armazenamento devem atender simultaneamente a todos os seguintes critérios:

- P1. O poço faz parte do banco de dados público da ANP** - A análise considera exclusivamente os poços disponíveis na base pública da ANP, garantindo transparência, reprodutibilidade e acesso aberto aos dados utilizados. Essa base inclui informações sobre localização, status operacional, histórico de produção, entre outras variáveis essenciais para a triagem.
- P2. O poço apresenta status compatível com reaproveitamento** - A ANP estabelece 19 possíveis status operacionais para poços, que refletem sua condição atual e histórica. Estes status são os seguintes: (i) Abandonado permanentemente; (ii) Abandonado temporariamente com monitoramento; (iii) Abandonado temporariamente sem monitoramento; (iv) Arrasado; (v) Produzindo; (vi) Injetando; (vii) Produzindo e injetando; (viii) Retirando gás natural estocado; (ix) Injetando para armazenamento; (x) Equipado aguardando início de operação; (xi) Fechado; (xii) Em observação; (xiii) Em perfuração; (xiv) Em avaliação;

(xv) Em completação; (xvi) Em intervenção; (xvii) Operando para captação de água; (xviii) Cedido para captação de água; (xix) Operando para descarte.

Foram selecionados para armazenamento de CO₂ os poços com status que indicam integridade estrutural e viabilidade técnica para reaproveitamento, como “abandonado temporariamente com monitoramento”, “injetando”, “fechado” e “injetando para armazenamento”. Poços com status “abandonado permanentemente” foram excluídos devido às dificuldades técnicas e regulatórias, principalmente em áreas offshore.

P3. O poço está localizado em ambiente *offshore* - A análise prioriza poços *offshore* devido à sua maior densidade espacial e à sua correlação com as principais reservas de petróleo do Brasil. Essa escolha reflete tanto a distribuição geográfica dos dados quanto uma decisão técnica fundamentada por especialistas, concentrando o estudo em bacias sedimentares marítimas com infraestrutura legada substancial.

P4. O poço é considerado tecnicamente viável para reaproveitamento - Embora o reaproveitamento de poços para injeção de CO₂ ainda seja objeto de debates técnicos e regulatórios, estudos do Reino Unido (UK, 2022) e iniciativas de CO₂ Storage (CO₂, 2022) indicam sua viabilidade em casos específicos, apesar dos desafios em ambientes offshore e da menor economicidade em comparação à perfuração de novos poços. Considerando a ausência de poços dedicados ao armazenamento de CO₂ nos registros da ANP e a falta de regulamentação específica, este estudo adota como premissa metodológica a viabilidade técnica do reaproveitamento, alinhando-se a perspectivas da indústria que apontam para casos pontuais de retrofit (BEAUBOUF, 2024).

P5. O poço possui um índice de oportunidade de reaproveitamento quantificável - Nem todos os poços na base pública da ANP tiveram vida produtiva ou descobertas bem-sucedidas; para formar clusters de armazenamento, são priorizados aqueles com potencial de reaproveitamento, considerando localização, status técnico e histórico. Para refinar essa seleção, criamos um Índice de Oportunidade de Reposicionamento, que combina critérios técnicos e espaciais em uma métrica de 0 a 1. Poços com pontuação acima de 0,3 foram mantidos, equilibrando representatividade e confiabilidade para garantir que apenas candidatos com condições mínimas favoráveis avancem na avaliação.

3.2 Preparação de Dados

Os dados deste estudo foram processados por meio de um pipeline ETL (Extrair, Transformar, Carregar) padronizado, garantindo integridade, rastreabilidade e consistência das informações públicas usadas na triagem, além de possibilitar atualizações futuras. Foram usadas duas categorias de fontes: primárias e auxiliares. As fontes primárias incluem o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), principal ferramenta de monitoramento das

emissões de gases de efeito estufa no Brasil, e o repositório público da ANP, que fornece dados essenciais sobre poços, campos e infraestrutura das cadeias upstream, midstream e downstream, fundamentais para estruturar a cadeia de valor de CCS no país.

As fontes auxiliares complementaram o núcleo informacional do estudo, fornecendo dados adicionais para enriquecer a triagem e qualificação dos ativos analisados. Essas fontes incluíram tanto instituições públicas quanto entidades privadas, com destaque para órgãos governamentais como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Além disso, foram considerados relatórios setoriais, publicações corporativas e websites institucionais de empresas com atuação direta ou indireta nos setores de energia e indústria.

Embora tenham fornecido informações importantes, como dados socioeconômicos, infraestrutura logística e projeções energéticas, essas fontes tiveram papel complementar e menor impacto que as fontes primárias. Para integrar os dados de forma eficiente e consistente, foram aplicadas técnicas avançadas de engenharia de dados, como web scraping, compressão, serialização e limpeza semântica, convertendo dados brutos e heterogêneos em estruturas otimizadas para análise, conforme ilustrado na Figura 13.

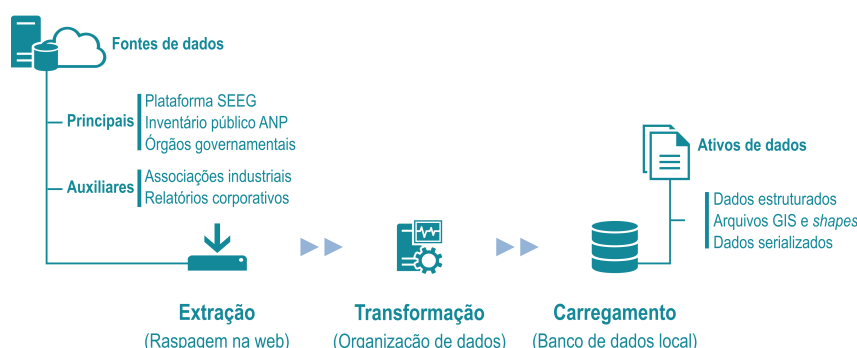


Figura 13 – Pipeline ETL usado para organizar o banco de dados para este estudo. Fonte: Elaborado pela autora

3.3 Modelagem Matemática

3.3.1 Clusters e Hubs de CCUS

Baseado na terminologia de Cluster e Hubs na Subseção 2.4, definem-se a seguir os principais conjuntos que compõem a estrutura lógica de uma rede de CCS, conforme a escala territorial considerada:

$$C_i^e := \{c_{im}^e\}_{m=1}^{m_i}, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (1a)$$

$$S_j^e := \{s_{jn}^e\}_{n=1}^{n_j}, \quad j = 1, 2, \dots, J, \quad (1b)$$

$$H_C^e := \{c_i^e\}_{i=1}^I, \quad c_i^e \in C_i^e, \quad (1c)$$

$$H_S^e := \{s_j^e\}_{j=1}^J, \quad s_j^e \in S_j^e, \quad (1d)$$

$$B^e := \{b_k^e\}_{k=1}^K. \quad (1e)$$

As Equações (1a) a (1e) representam, respectivamente:

- C_i^e : o i -ésimo *cluster de captura* de CO₂, composto por m_i fontes industriais de difícil abatimento;
- S_j^e : o j -ésimo *cluster de armazenamento*, contendo n_j poços tecnicamente viáveis para injeção permanente de CO₂;
- H_C^e : o conjunto dos *hubs de captura*, com um hub representativo associado a cada cluster de captura;
- H_S^e : o conjunto dos *hubs de armazenamento*, análogas aos de captura;
- B^e : o conjunto das *infraestruturas de suporte* à rede CCUS, incluindo buffers de armazenamento intermediário, terminais logísticos e portos de exportação.

O índice e denota a escala territorial adotada para a análise, assumindo neste estudo dois possíveis valores: S , para a escala estadual, e IR , para a escala de regiões intermediárias (segundo a classificação do IBGE). Todos os elementos definidos nos conjuntos acima estão associados a coordenadas geoespaciais fixas, referenciadas ao sistema geodésico oficial brasileiro, ou seja, ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas SIRGAS 2000. Os parâmetros I , J e K correspondem, respectivamente, ao número total de clusters de captura, clusters de armazenamento e instalações de infraestrutura presentes na rede para a escala e .

Como abstração, a rede CCS sobre a escala e pode ser representada formalmente pelo tuplo:

$$\mathcal{N}^e := (C^e, S^e, B^e), \quad (2)$$

onde $C^e = \bigcup_{i=1}^I C_i^e$ e $S^e = \bigcup_{j=1}^J S_j^e$ representam, respectivamente, os conjuntos agregados de fontes emissoras e de locais de armazenamento viáveis dentro da rede CCS. Ressalta-se que B^e tende a exibir relativa independência em relação à escala e , uma vez que as instalações de infraestrutura possuem localização física fixa, não sendo afetadas diretamente por variações nas estimativas de emissões decorrentes de mudanças na agregação territorial.

3.3.2 Estimativa da Densidade Emissiva Estratificada

Neste trabalho de pesquisa, adotou-se o seguinte coeficiente como métrica base para a triagem inicial de potenciais clusters de captura de CO₂:

$$\rho_k = \frac{E_k(t)}{A_k}, \quad E_k > 0, \quad k = 1, 2, \dots, M, \quad (3)$$

onde ρ_k é denominado densidade emissiva, definida como a razão entre as emissões totais $E_k(t)$, expressas em toneladas métricas de equivalentes de CO₂ para o ano t , e a área A_k da unidade territorial correspondente, medida em quilômetros quadrados. O índice k representa as diferentes fontes territoriais dentro da escala analisada, sendo M o número total de unidades consideradas.

Analogamente ao conceito de pressão na física, essa métrica captura uma forma de “pressão ambiental”, ao quantificar a intensidade espacial do potencial de aquecimento global, conforme os padrões do AR5/GWP, distribuída ao longo dos limites da fonte territorial. A densidade emissiva foi fixada no ano de 2022 para garantir consistência com o banco de dados principal. Como o cálculo em nível municipal gera granularidade excessiva e pouco prática para triagem, foi aplicada uma estratificação que reescala a densidade para uma área de referência maior, adequada aos cenários reais de implantação de redes de CCS no Brasil.

$$\bar{\rho}_{k,e} = \frac{E_k(t)}{\bar{A}_e}, \quad E_k > 0, \quad k = 1, 2, \dots, M_e, \quad (4)$$

Nesta equação, \bar{A}_e representa a área mediana de todas as unidades territoriais A_k dentro da escala e considerada. Essa normalização permite realizar comparações escalonadas entre diferentes regiões, viabilizando uma triagem mais eficiente, comparável e tecnicamente robusta de potenciais clusters de captura de CO₂. Nesse sentido, temos as seguintes etapas:

1. **Escolha da escala territorial:** Definição da unidade geográfica de análise (município, microrregião, mesorregião, região intermediária ou estado), equilibrando granularidade e aplicabilidade prática.
2. **Aplicação de modelo generalizado:** Cálculo da densidade emissiva por meio do modelo abstrato $\rho = \frac{E}{A}$.
3. **Seleção da emissão de referência:** Utiliza-se o total de emissões territoriais dos setores de *energia e indústria*, por município, com base nos dados do SEEG.
4. **Classificação das fontes:** Marcação dos polos como emissores líquidos (positivos) ou fontes com balanço neutro/negativo.
5. **Cálculo da densidade emissiva estratificada:** Aplicação da Equação 4, resultando em um indicador padronizado que viabiliza análises comparativas entre diferentes regiões.

Isto permite identificar áreas com maior “pressão ambiental”, ou seja, maior densidade emissiva, e, portanto, maior prioridade para o desenvolvimento de Clusters de Captura e Armazenamento de Carbono.

3.3.3 Função Categoria de Emissões

Embora o uso da densidade emissiva estratificada $\bar{\rho}$ contribua para mitigar a variabilidade da pressão ambiental entre diferentes territórios, ela mantém uma natureza de valor contínuo. Essa característica, apesar de útil para análises quantitativas detalhadas, pode dificultar a gerenciabilidade prática do processo de triagem, especialmente quando o objetivo é classificar ou priorizar áreas para implantação de infraestrutura de captura de CO₂ em larga escala.

Uma abordagem viável para superar essa limitação consiste em transformar a variável contínua $\bar{\rho}$ em uma função categórica. Nessa abordagem, cada unidade territorial é atribuída a uma categoria discreta, com base em faixas predefinidas de intensidade emissiva. Este mapeamento permite a criação de um sistema de classes ordenadas, facilitando a identificação e priorização de regiões de interesse para o desenvolvimento de clusters de captura.

A definição dessas categorias envolveu os seguintes procedimentos:

- (i) **Fracionamento da meta nacional da NDC por escala territorial:** Primeiramente, a meta nacional de emissões, estabelecida pela Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil, foi distribuída proporcionalmente entre os estados federativos, utilizando como critério a participação relativa de cada estado nas emissões nacionais observadas no ano base.
- (ii) **Estabelecimento de limiares de emissão para categorização:** Em um segundo momento, foram definidos intervalos quantitativos de densidade emissiva, tendo como referência o valor fracionado da meta nacional alocada a cada estado. Esses limiares serviram como base para a criação das categorias discretas de classificação.

Em termos de contexto, a meta climática brasileira para o período considerado visava, até 2025, uma redução de 37% nas emissões de GEE em relação aos níveis históricos, conforme compromisso firmado na NDC. Isso estabelece um teto nacional de emissões da ordem de 1,3 GtCO₂e, aqui representado pela variável E_{lim} .

Para realizar a distribuição proporcional dessa meta entre os estados federativos, foi aplicada a seguinte fórmula de fracionamento:

$$E_{S,\text{lim}} = \frac{\sum_{p=1}^{M_S} E_{S,p}(t)}{\sum_{k=1}^M E_k(t)} \times E_{\text{lim}}(t^*), \quad (5)$$

onde:

- $E_{S,\text{lim}}$ representa o limite de emissões atribuído ao estado federativo S ;
- $E_{S,p}(t)$ é a emissão do p -ésimo emissor territorial dentro do estado S , no ano de referência t ;
- $E_k(t)$ corresponde à emissão da k -ésima fonte territorial no conjunto nacional, também no ano t ;
- M_S indica o número total de fontes territoriais dentro do estado S ;
- M é o número total de fontes territoriais em todo o território nacional;
- $E_{\text{lim}}(t^*)$ é o teto nacional de emissões projetado para o ano-alvo t^* (2025);
- t representa o ano base de análise, que neste estudo foi fixado em 2022.

Em essência, a Equação (5) realiza uma distribuição proporcional da meta nacional de emissões ($E_{\text{lim}}(t^*)$) entre os estados federativos, com base na participação relativa de cada estado nas emissões observadas no ano base (t). Embora esse procedimento envolva uma projeção retrospectiva, partindo de uma meta futura para gerar um critério atual de triagem, o procedimento é tecnicamente sólido e fundamentado em dados reais de emissões. Isso proporciona uma base coerente e cientificamente defensável para a definição de limiares de densidade emissiva e para a categorização das unidades territoriais no contexto da triagem de potenciais clusters de captura de CO_2 .

3.3.4 Definição dos Limiares de Classificação Categórica

Os limiares de emissão utilizados para a classificação categórica das fontes territoriais foram calculados como frações proporcionais do limite estadual de emissões $E_{S,\text{lim}}$, definido previamente na Subseção 3.3.3. Este procedimento garante que a categorização das fontes emissoras esteja alinhada com a meta estadual de redução de gases de efeito estufa, conforme estabelecido pela NDC brasileira.

Especificamente, os limiares foram estabelecidos da seguinte forma:

$$\bar{\rho}_{e,10\%} = 10\% \times \frac{E_{S,\text{lim}}}{\bar{A}_e} \Bigg|_{t=2022} \quad (6a)$$

$$\bar{\rho}_{e,50\%} = 50\% \times \frac{E_{S,\text{lim}}}{\bar{A}_e} \Bigg|_{t=2022} \quad (6b)$$

onde:

- $\bar{\rho}_{e,10\%}$ representa o primeiro limiar de densidade emissiva estratificada, correspondente a 10% do limite estadual de emissões, ajustado pela área mediana \bar{A}_e da escala territorial e ;
- $\bar{\rho}_{e,50\%}$ representa o segundo limiar, correspondente a 50% do mesmo limite;
- \bar{A}_e é a área mediana das unidades territoriais pertencentes à escala e (por exemplo, estados ou regiões intermediárias), conforme definido anteriormente;
- O parâmetro temporal t foi fixado em 2022, que corresponde ao ano de referência utilizado para o inventário de emissões.

Esses limiares dividem o espaço da densidade emissiva estratificada em três categorias distintas de emissão, refletindo diferentes níveis de pressão ambiental em relação ao teto de emissões definido para cada estado federativo.

Assim, para cada fonte territorial situada na escala e , estabelece-se a seguinte classificação de status emissivo:

- **Emissor Categoria A:** fonte territorial cuja emissão total, no ano t , resulta em uma densidade emissiva estratificada inferior a 10% da meta de seu respectivo estado. Essas fontes representam áreas de baixa prioridade na triagem inicial para formação de clusters de captura de CO₂.
- **Emissor Categoria B:** fonte cuja emissão total situa-se entre 10% e 50% da meta estadual, indicando um nível intermediário de pressão ambiental. Essas áreas são consideradas de atenção moderada no processo de formação de clusters de captura de CO₂.
- **Emissor Categoria C:** fonte cuja emissão total atinge ou supera 50% da meta estadual. Essas fontes representam áreas de alta prioridade para consideração em estratégias de captura de CO₂, por sua contribuição expressiva para as emissões totais do estado.

Assim, a classificação de cada fonte k pode ser formalizada através da função categórica de emissão, definida como:

$$\alpha_{k,S}(t) = \begin{cases} A, & \text{se } \bar{\rho}_{k,S}(t) < 0.1 \times \frac{E_{S,\text{lim}}}{\bar{A}_e} \\ B, & \text{se } 0.1 \times \frac{E_{S,\text{lim}}}{\bar{A}_e} \leq \bar{\rho}_{k,S}(t) < 0.5 \times \frac{E_{S,\text{lim}}}{\bar{A}_e} \\ C, & \text{se } \bar{\rho}_{k,S}(t) \geq 0.5 \times \frac{E_{S,\text{lim}}}{\bar{A}_e} \end{cases} \quad (7)$$

para todo $k = 1, 2, \dots, M$, onde:

- $\alpha_{k,S}(t)$ indica a categoria de emissão atribuída à k -ésima fonte dentro do estado S , no ano de referência t ;

- $\bar{\rho}_{k,S}(t)$ representa a densidade emissiva estratificada da fonte k , considerando a escala territorial e e o estado S ao qual pertence.

Este sistema de classificação oferece uma estrutura objetiva e operacional para a priorização de territórios no planejamento da infraestrutura de captura de carbono, ao traduzir a variabilidade contínua das emissões em classes discretas, diretamente vinculadas aos compromissos climáticos nacionais.

3.3.5 Índice de Oportunidade para Reaproveitamento de Poços

Criamos o índice de oportunidade para reaproveitamento de poços, representado por O_w , com o objetivo de quantificar o potencial de um poço de petróleo ou gás natural (*well w*) para ser reaproveitado como unidade de armazenamento permanente de CO₂ no contexto de uma futura rede de CCS.

Esse índice é calculado de forma normalizada, assumindo valores no intervalo $0 \leq O_w \leq 1$, e considera um ano de referência futuro, denotado por t^* , a partir do qual se estima que o hub de CCUS da região estará minimamente operacional. Neste estudo consideramos $t^* = 2030$, alinhado com metas de curto a médio prazo para a transição energética.

A formulação matemática do índice de oportunidade do poço é dada por:

$$O_w(t^*) = \begin{cases} 1 - \frac{t^* - t_a}{t_{0,w} + s - t_a}, & \text{se } t_{0,w} + s \geq t_a \\ 0, & \text{se } t_{0,w} + s < t_a, \end{cases} \quad (8)$$

onde:

- t_a representa o ano atual ou o ano-base da análise. Para este estudo, foi definido como $t_a = 2022$, assegurando consistência com o banco de dados de emissões de CO₂ utilizado nas demais etapas da modelagem;
- t^* é o ano futuro de referência para início das operações do hub de CCS, adotado como 2030;
- $t_{0,w}$ indica o ano de início da produção do poço w ;
- s representa a vida útil média de produção dos poços da base de dados analisada (estimada com base em séries históricas de produção);
- N é o número total de poços incluídos na base de dados, sendo $w = 1, 2, \dots, N$.

O índice O_w expressa, de forma inversamente proporcional, o tempo restante de vida produtiva do poço até o ano de referência t^* . Poços mais próximos do fim de sua vida útil

em t^* apresentam valores mais elevados de O_w , sinalizando melhor oportunidade técnica e econômica para reaproveitamento. Já poços com produção ainda ativa e com vida útil remanescente significativa tendem a apresentar valores mais baixos, refletindo menor atratividade para conversão.

A interpretação dos valores de O_w é a seguinte:

- Quando O_w aproxima-se de 1, indica que o poço estará esgotado ou próximo do fim de sua produção antes ou ao redor de t^* , sendo tecnicamente mais viável para conversão em poço de armazenamento de CO_2 .
- Quando O_w aproxima-se de 0, indica que o poço ainda terá produção ativa e significativa mesmo após t^* , tornando-se menos atrativo para reaproveitamento imediato.
- Caso o poço não atenda à condição $t_{0,w} + s \geq t_a$, ou seja, já tenha ultrapassado sua vida útil média antes do ano-base (t_a), o índice é forçado a zero, refletindo inviabilidade prática.

Para assegurar um nível mínimo de maturidade e viabilidade dos poços considerados no estudo, foi adotado o seguinte critério de filtragem, já estabelecido na premissa P5, na subseção 3.1 deste trabalho:

$$O_w(2030) \geq 0.3 \quad (9)$$

Com essa restrição, apenas poços com O_w acima de 0,3 foram incluídos nas análises subsequentes, garantindo que as oportunidades selecionadas apresentem um equilíbrio entre maturidade de produção e viabilidade técnica para conversão em instalações de armazenamento geológico de CO_2 .

Nas regiões de Campos e Santos, o levantamento inicial identificou um total de 494 poços com potencial para reaproveitamento em armazenamento geológico de CO_2 . No entanto, após a aplicação do critério de corte baseado no índice de oportunidade de reaproveitamento ($O_w \geq 0,3$), o número de poços elegíveis foi reduzido para 387. Essa triagem visa priorizar poços com maior viabilidade temporal de conversão, alinhados ao horizonte operacional previsto para os hubs de CCUS, além de fornecer uma base quantitativa para priorização de ativos durante as fases de triagem e seleção de locais de armazenamento.

3.3.6 Capacidade de Armazenamento

A capacidade máxima teórica de armazenamento de CO_2 em uma formação geológica depende da porosidade efetiva da rocha e do volume total disponível, indicando o espaço para retenção do gás ao longo do tempo (KETZER *et al.*, 2015). Segundo Ketzer *et al.* (2015) e o conceito da pirâmide tecnoeconômica do Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF),

essa capacidade é classificada em quatro níveis que refletem restrições técnicas e econômicas crescentes, representando etapas progressivamente realistas do potencial de armazenamento.

- **Capacidade teórica:** representa o limite físico-geológico máximo para o armazenamento de fluidos, assumindo-se que o CO₂ ocupe completamente os espaços porosos disponíveis no reservatório. Trata-se de uma estimativa idealizada, sem considerar restrições práticas de operação.
- **Capacidade efetiva de armazenamento:** corresponde a uma fração da capacidade teórica, obtida por meio da aplicação de parâmetros técnicos e geológicos que refletem a viabilidade operacional. Esses parâmetros incluem, por exemplo, fatores de eficiência de varrido, limitações de pressão e taxa de injeção.
- **Capacidade prática:** representa uma redução adicional da capacidade efetiva, levando em conta barreiras externas ao reservatório, como limitações legais e regulatórias, restrições de infraestrutura, questões socioambientais e fatores econômicos.
- **Capacidade de associação fonte-sumidouro:** refere-se à fração da capacidade prática que pode ser efetivamente associada a fontes identificáveis e capturáveis de CO₂. Essa estimativa considera a viabilidade de acoplamento entre emissores e locais de armazenamento com base em critérios como proximidade geográfica, disponibilidade de infraestrutura e compatibilidade operacional.

A capacidade de armazenamento de CO₂ em campos de petróleo e gás pode ser estimada por análises específicas dos reservatórios, usando dados de reservas e históricos de produção para obter estimativas mais precisas da reutilização dos poços para armazenamento permanente. No Brasil, estudos indicam alto potencial de armazenamento nas bacias sedimentares, especialmente em áreas offshore, posicionando o país como um dos mais promissores para projetos de CCS em larga escala (GOULART *et al.*, 2020; KETZER *et al.*, 2015; CIOTTA *et al.*, 2021).

A identificação e triagem de regiões com viabilidade técnica e econômica para CCS são etapas fundamentais para o avanço da agenda de mitigação das emissões de GEE, tendo em vista o peso das emissões nacionais no cenário global (Brazil, 2015).

Um estudo anterior que avaliou 85 campos distribuídos em 8 bacias sedimentares brasileiras estimou as capacidades efetivas hipotéticas de armazenamento de CO₂ para as bacias de Campos e Santos em aproximadamente 1.915 MtCO₂ e 981 MtCO₂, respectivamente, totalizando cerca de 2.896 MtCO₂ (CIOTTA *et al.*, 2021). Esses resultados indicam que, juntas, as bacias de Campos e Santos concentram mais de 92% da capacidade total de armazenamento identificada naquele estudo. Além disso, mais da metade dos campos avaliados estão localizados nessas duas bacias, reforçando sua relevância estratégica para o desenvolvimento de projetos de CCS no Brasil.

As bacias destacam-se pela alta prospectividade devido ao histórico prolongado de produção de hidrocarbonetos e à concentração de campos maduros, o que favorece projetos de armazenamento de CO₂ ao aproveitar a infraestrutura existente e o conhecimento técnico dos reservatórios. Esses fatores são considerados ativos importantes na seleção de áreas para implementação de CCS (KETZER *et al.*, 2015).

3.3.7 Índice de Importância Areal para Armazenamento de Carbono

Além da capacidade de armazenamento, outro indicador fundamental foi utilizado para reforçar a priorização das bacias de Campos e Santos como áreas preferenciais para a disposição geológica de CO₂: o Índice de Importância Areal para Armazenamento de Carbono (IPA-GCS). Esse indicador inovador faz parte da família de métricas IPA, desenvolvida e continuamente atualizada ao longo da última década pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), com o objetivo de orientar o zoneamento nacional de recursos de óleo e gás (EPE, 2023).

Cada IPA representa um escore ponderado, calculado por meio de uma função multicritério conhecida como FIMA, que sintetiza diferentes variáveis de natureza técnica e econômica. O resultado é apresentado na forma de um mapa de contorno bidimensional discreto, no qual cada unidade geográfica de interesse dentro do setor de óleo e gás recebe uma pontuação de relevância, categorizada em uma escala que vai de baixa a alta importância (EPE, 2007).

A fórmula geral de cálculo do IPA é dada por:

$$IPA = \left[\sum_{i=1}^N w_i a_i(\mathbf{e}) \right], \quad (10)$$

em que \mathbf{e} representa a área elementar de aplicação, uma célula bidimensional (pixel) com resolução de 1 km², identificada por suas coordenadas geoespaciais na grade de referência; w_i corresponde ao peso atribuído ao i -ésimo critério (ou argumento) a_i ; e N é o número total de critérios considerados pela função FIMA, sendo que $\sum_{i=1}^N w_i = 1$. Os colchetes indicam que o valor calculado do IPA é posteriormente categorizado.

A Equação (10) representa a etapa final de um processo tripartite, que envolve previamente a quantificação e a normalização de cada critério de entrada. Para a variante específica voltada ao GCS, denominada IPA_{GCS} , considera-se $N = 5$, e a categorização dos resultados é realizada em uma escala de relevância de 1 a 9.

A Tabela 2 apresenta os critérios, tipos, pesos e objetivos utilizados no cálculo do IPA_{GCS} , cujos pressupostos detalhados podem ser encontrados em (EPE, 2024). Neste estudo, o IPA_{GCS} também foi empregado de forma qualitativa como fator de refinamento no processo de triagem para CCS.

Critério	Tipo	Peso	Objetivo
Reservatórios de interesse (O&G)	Técnico	0.35	Identificação qualitativa de áreas de interesse para armazenamento, com base em plays exploratórios
Base de conhecimento	Técnico	0.20	Indicação da relevância com base na disponibilidade de dados de poços e levantamentos sísmicos 2D e 3D
Emissões de CO ₂	Econômico	0.15	Identificação das principais fontes estacionárias de CO ₂ nos setores energético e de processos industriais
Infraestrutura	Econômico	0.15	Indicação da infraestrutura de transporte disponível
Indústrias de crédito de carbono	Econômico	0.15	Mapeamento de regiões de interesse para comercialização de créditos de carbono

Tabela 2 – Critérios adotados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para o cálculo do Índice de Importância Areal do Petróleo para Armazenamento Geológico de Carbono no Brasil (IPA_{GCS}).

3.4 Modelagem Estatística

3.4.1 Estimador de Densidade Ponderada do Kernel

A estimação de densidade por kernel (KDE) é uma técnica estatística não paramétrica que fornece uma representação contínua e suave da distribuição de variáveis contínuas, sendo mais flexível e precisa que histogramas (BRUCE; BRUCE; GEDECK, 2017). Além do uso unidimensional, o KDE também pode ser aplicado em duas dimensões para analisar densidades espaciais conjuntas, útil em estudos geográficos e correlações entre variáveis físicas.

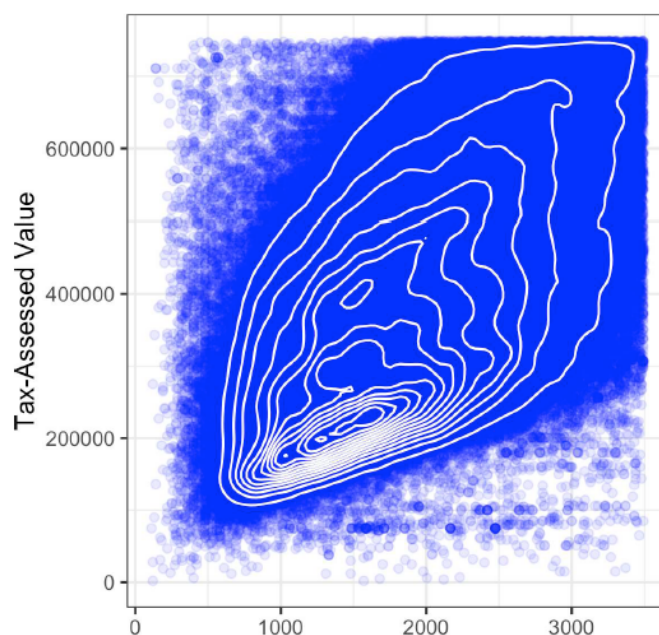


Figura 14 – Gráfico de contorno para valor avaliado por impostos versus pés quadrados acabados. Fonte: (BRUCE; BRUCE; GEDECK, 2017)

Os gráficos de contorno são usados para representar a densidade bidimensional, como exemplificado pela relação entre valor fiscal e área construída, destacando concentrações por linhas de nível. O KDE, uma técnica de aprendizado não supervisionado, identifica a estrutura dos dados sem rótulos e é base para métodos mais avançados, além de permitir modelagem flexível

de distribuições sem suposições paramétricas rígidas (HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN, 2017).

Matematicamente, para um conjunto de amostras $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_M\}$ em \mathbb{R}^d , o KDE clássico em um ponto \mathbf{x} é definido como

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \frac{1}{Mh^d} \sum_{k=1}^M K\left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_k}{h}\right), \quad (11)$$

onde K é a função kernel, geralmente uma função simétrica e com integral unitária (exemplo clássico: a densidade da normal padrão), e $h > 0$ é o parâmetro de largura de banda (bandwidth), que controla o grau de suavização da estimativa. Intuitivamente, cada ponto amostral "espalha" sua massa de probabilidade ao seu redor segundo o kernel K , e a soma dessas contribuições gera a estimativa da densidade no ponto \mathbf{x} .

Essa estimação pode ser vista como uma média suavizada da função densidade verdadeira, e converge para ela quando o número de amostras $M \rightarrow \infty$ e a largura de banda $h \rightarrow 0$ de forma adequada, conforme os teoremas de consistência estatística.

No caso multivariado, a largura de banda pode ser generalizada para uma matriz de covariância \mathbf{H} positiva-definida, permitindo ajustar a suavização de forma anisotrópica e capturar correlações entre dimensões:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |\mathbf{H}|^{-1/2} K\left(\mathbf{H}^{-1/2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_k)\right). \quad (12)$$

No contexto do estimador de densidade por kernel ponderado (WKDE), cada ponto amostral \mathbf{x}_k é associado a um peso $\bar{\rho}_{k,e}$, que reflete a importância relativa, intensidade ou outra característica da observação. Assim, a estimativa ponderada é dada por

$$\hat{f}(\mathbf{x}_r) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \bar{\rho}_{k,e} \kappa_{\mathbf{H}}(\mathbf{x}_r - \mathbf{x}_k), \quad r = 1, \dots, R, \quad (13a)$$

$$\kappa_{\mathbf{H}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\pi|\mathbf{H}|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\mathbf{x}^T \mathbf{H}^{-1} \mathbf{x}\right), \quad (13b)$$

onde $\kappa_{\mathbf{H}}$ é o kernel Gaussiano multivariado com matriz de largura de banda \mathbf{H} . Essa abordagem é especialmente útil para mapear a distribuição espacial de grandezas que possuem magnitude variável associada a cada ponto amostral, como densidades emissivas estratificadas no presente estudo.

A escolha adequada da matriz \mathbf{H} é crucial para obter uma estimativa que equilibre detalhamento e suavização, e pode ser determinada por regras automáticas, como a regra de Scott, que ajusta \mathbf{H} em função do tamanho da amostra e da variabilidade dos dados.

A estimativa do KDE foi implementada com as rotinas do módulo da linguagem Python (VIRTANEN *et al.*, 2020), que oferecem ferramentas eficientes para computação de densidade por kernel multivariado com pesos. Permitindo identificar e visualizar regiões geográficas com maior concentração ponderada de emissões, favorecendo análises territoriais mais refinadas e suporte à tomada de decisão.

3.4.2 Agrupamento de Dados

A identificação dos elementos que compõem os clusters de CCS requer uma estratégia robusta de agrupamento espacial, para a qual foram utilizados algoritmos de aprendizado de máquina não supervisionado. Neste estudo, empregou-se o algoritmo DBSCAN, disponível na biblioteca `scikit-learn` do Python (ESTER *et al.*, 1996), escolhido por sua capacidade de detectar clusters com formatos variados e densidades diferentes, além de ser resistente a ruídos e outliers, comuns em dados geoespaciais usados em análises de CCS.

A flexibilidade do DBSCAN é ideal para planejar infraestrutura de captura, transporte e armazenamento de CO₂, pois identifica agrupamentos com formatos irregulares. Neste trabalho, o DBSCAN isolou regiões com alta concentração de emissões fixas e potencial para compartilhamento de infraestrutura, favorecendo a formação de hubs. Assim, o algoritmo auxilia na priorização territorial, destacando áreas que maximizam o retorno técnico e econômico em projetos de CCS.

Embora o algoritmo HDBSCAN tenha sido considerado, optou-se pelo DBSCAN devido à tendência do HDBSCAN de classificar muitos pontos como outliers, o que dificultaria a formação de clusters consistentes para planejamento de infraestrutura de CCS. Além disso, a maior complexidade e sensibilidade do HDBSCAN tornariam a análise menos replicável e mais difícil de interpretar. Portanto, o DBSCAN foi escolhido por oferecer maior robustez, simplicidade e adequação aos dados espaciais do estudo.

Quando aplicamos o DBSCAN aos conjuntos de dados referentes às instâncias de captura (C) ou de armazenamento (S), o modelo de clusterização pode ser formalmente representado como

$$X_t = \text{DBSCAN}(\mathbf{x}_t, \varepsilon_t, \mu_t, \delta_t), \quad t \in \{C, S\}, \quad (14)$$

onde X_t representa o resultado da clusterização, compreendendo tanto os clusters identificados quanto os pontos classificados como ruído; \mathbf{x}_t é o conjunto de dados específico para a instância t ; ε_t é a distância máxima permitida entre dois pontos para que eles sejam considerados vizinhos; μ_t indica o número mínimo de pontos necessários para formar um cluster; e δ_t é a métrica de distância adotada, que varia conforme o tipo de instância analisada.

No caso de $t = C$, correspondente às instâncias de captura em terra, a métrica δ é

definida pela distância de menor caminho (*shortest-path*) calculada por meio da ferramenta OSRM (LUXEN; VETTER, 2011).

Para determinar as distâncias entre fontes de captura *onshore*, foi usado o OSRM, que modela a malha viária como um grafo dirigido com arestas ponderadas por tempo ou distância. Isso permite calcular o caminho mais curto considerando a rede real de transporte. Essa abordagem é crucial para avaliar a viabilidade logística de projetos de captura e transporte de CO₂, alinhando-se a práticas consolidadas de modelagem de redes que otimizam a localização de infraestruturas. Assim, a clusterização considera não apenas a distância geográfica, mas também a estrutura viária existente, fundamental para formar clusters logisticamente viáveis (OLIVEIRA *et al.*, 2018)..

Por outro lado, para $t = S$, referente às instâncias de armazenamento offshore, a métrica δ é dada pela distância ortodrômica, também conhecida como distância do grande círculo, calculada pela fórmula de Haversine:

$$\delta(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = 2R \arctan \left(\frac{\sqrt{g}}{\sqrt{1-g}} \right), \quad (15)$$

onde

$$g = \sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left(\frac{\psi_2 - \psi_1}{2} \right),$$

em que $R = 6371$ km representa o raio médio da Terra, e $\mathbf{x}_i = (\varphi_i, \psi_i)$ são a latitude e longitude (em radianos) do ponto i , para $i = 1, 2$. Nesse contexto, aplicável ao agrupamento das instâncias de armazenamento *offshore*, o espaço métrico assume o trajeto geodésico direto, tomando os dutos submarinos como referência para a viabilidade do transporte.

3.4.3 Média de poços e construção de macrocampos

Após a triagem inicial dos poços offshore pelo índice de oportunidade (Subseção 3.3.5), a distribuição espacial ainda se mostrou dispersa, refletindo a variabilidade geográfica e os diferentes estágios de maturidade dos campos. Essa heterogeneidade dificultou a identificação de clusters viáveis e atraentes economicamente para armazenamento geológico de CO₂. Para superar esse desafio, foi implementada uma etapa secundária de seleção, dividida em duas fases principais: cálculo da média de poços e construção de macrocampos.

Fase 1 - Média de Poços: O primeiro passo consistiu em aplicar um critério quantitativo de densidade mínima de poços. Para isso, calculou-se a média de poços por campo (η) em cada bacia, considerando apenas os poços previamente aprovados pela triagem primária, ou seja, com índice de oportunidade $O_w \geq 0,3$. Campos cujo número de poços (η_f) estivesse abaixo dessa média foram descartados do conjunto de análise. Essa abordagem foi adotada com o objetivo

de garantir massa crítica suficiente de dados e de possíveis volumes de injeção, evitando que o processo de clusterização fosse influenciado por áreas com baixa densidade de poços.

Matematicamente, o domínio reduzido de análise (B') foi definido como:

$$B' = \{F_f \in B; \eta_f \geq \eta\}, \quad (16)$$

onde:

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i,$$

sendo n o número total de campos na bacia B , e η_i o número de poços no campo i .

Fase 2 - Construção dos Macrocampos: Com o conjunto filtrado de campos, a próxima etapa consistiu na construção de macrocampos, por meio da união de campos vizinhos com base em critérios de proximidade espacial. Esta agregação visou formar domínios mais extensos e geograficamente coesos, reduzindo os custos unitários associados à construção de infraestrutura de transporte (como dutos submarinos) e aumentando a escala de operação dos hubs de armazenamento.

A formulação matemática para os macrocampos segue:

$$\mathcal{F}_k^{B'} = \bigcup_{i=1}^{\zeta_k} F_i, \quad 1 \leq k \leq M, \quad (17)$$

sujeita às seguintes condições:

1. **Critério de distância crítica:** Dois campos só podem ser agrupados se a menor distância entre os seus cascos convexos (*convex hulls*) for inferior ou igual a uma distância crítica pré-definida (\tilde{d}), fixada em 20 km para este estudo:

$$\min_{h(\Omega_i) \cup h(\Omega_j)} \{d(\mathbf{x}_i^h, \mathbf{x}_j^h)\} \leq \tilde{d},$$

onde d representa a distância geodésica calculada pela fórmula de Haversine entre os pontos mais próximos dos cascos convexos das áreas dos campos.

2. **Cobertura total:** A soma dos campos pertencentes a todos os macrocampos deve cobrir a totalidade dos campos selecionados em B' :

$$\sum_k \zeta_k = \xi',$$

sendo ζ_k o número de campos no k -ésimo macrocampo e ξ' o total de campos remanescentes após a fase de *averaging*.

3.5 Modelagem Heurística

Como pilar complementar ao processo de triagem analítica apresentado neste estudo, foi adotada uma abordagem heurística fundamentada na integração entre critérios técnicos, conhecimento setorial e análise contextual para delinear, de forma preliminar, os domínios geográficos com maior potencial para o desenvolvimento de clusters e hubs de CCS.

Essa abordagem tornou-se essencial devido a limitações no contexto nacional, como a falta de inventários completos e atualizados de fontes estacionárias de CO₂, restringindo métodos quantitativos de alta resolução. Além disso, a ausência de infraestrutura dedicada para transporte de CO₂ em longa distância dificulta a definição automatizada de rotas viáveis. Também se destaca a grande heterogeneidade regional do desenvolvimento industrial brasileiro, com desigualdades na concentração de emissores, infraestrutura energética e instalações industriais relevantes para captura de CO₂.

Diante desse contexto, a modelagem heurística incorporou três critérios principais:

1. **Priorização da região Sudeste**, com ênfase nas regiões intermediárias dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, devido à sua expressiva concentração de atividades industriais e de infraestrutura logística.
2. **Seleção de plantas industriais relevantes (fontes estacionárias)**, privilegiando aquelas localizadas dentro ou nas proximidades de áreas territoriais com alta densidade emissiva de CO₂, com destaque para fontes classificadas nas categorias B ou C, segundo critérios de magnitude de emissão ou relevância estratégica para a matriz industrial nacional.
3. **Identificação de terminais portuários e outras instalações logísticas existentes**, que podem futuramente assumir funções de armazenamento temporário ou de interligação modal, servindo como pontos âncora para o desenvolvimento de infraestrutura de transporte e armazenamento de CO₂. Esta escolha considerou o papel já consolidado desses terminais na cadeia de suprimento energético do país, além da facilidade de conversão ou adaptação para novas funções no contexto do CCS.

Como parte do processo de diagnóstico territorial, foi realizada uma análise específica para identificar quais empresas, dentre as potenciais fontes estacionárias de CO₂, já participam voluntariamente do Protocolo de Gases de Efeito Estufa no Brasil (GHG Protocol). Essa iniciativa fornece um inventário público e transparente das emissões corporativas de gases de efeito estufa, permitindo maior visibilidade sobre o perfil emissor das indústrias e seu grau de maturidade quanto à gestão de carbono.

A consideração das empresas participantes do GHG Protocol como elemento adicional de triagem permite refinar a seleção de fontes potenciais para projetos de CCS. Tal escolha

se justifica pelo fato de que organizações já engajadas em programas de reporte voluntário de emissões geralmente apresentam maior prontidão institucional, melhor controle sobre suas fontes emissoras e, muitas vezes, um maior interesse estratégico em integrar iniciativas de descarbonização.

Essa integração entre análise espacial, conhecimento setorial e iniciativas voluntárias de reporte contribui para construir uma visão mais realista e pragmática sobre onde, com quem e em que condições os primeiros projetos de CCS podem ser viabilizados no contexto brasileiro.

3.6 Priorização regional

Neste estudo, os estados do Rio de Janeiro e São Paulo foram selecionados como regiões prioritárias para o desenvolvimento de hubs de CCS em função de uma combinação de fatores habilitadores que os tornam particularmente atrativos para projetos de captura, transporte e armazenamento de carbono.

Os principais critérios considerados foram os elevados níveis de desenvolvimento econômico, que indicam concentração industrial e grandes consumidores de energia, associados a altas emissões de CO₂. As regiões também possuem infraestrutura consolidada (rodoviária, ferroviária, portuária e industrial), facilitando a logística para futuros corredores de transporte de CO₂. Além disso, a alta densidade de emissões estacionárias favorece a formação de clusters economicamente viáveis, com potencial para economias de escala em projetos de captura e transporte.

Além disso, destaca-se a proximidade geográfica desses estados com importantes bacias *offshore* que apresentam elevado potencial de armazenamento geológico de CO₂, como as bacias de Campos e Santos. Essa característica reduz as distâncias envolvidas entre as fontes de emissão e os potenciais sítios de armazenamento, aumentando a atratividade econômica dos projetos e reduzindo os custos associados principalmente ao transporte.

Por fim, é relevante ressaltar que Rio de Janeiro e São Paulo respondem por uma parcela substancial do potencial técnico de abatimento identificado para os futuros hubs de CCS no Brasil. Juntos, esses estados concentram uma fatia significativa dos 44 % associados às categorias 1 e 2 de *tiers* de prioridade, conforme indicado na Tabela 1. Esse dado reforça ainda mais a relevância estratégica dessas regiões como territórios-chave na agenda de descarbonização da indústria nacional.

3.7 Seleção de plantas industriais

Os setores HTA apresentam elevada complexidade técnica e alto custo para mitigação das emissões de CO₂, devido principalmente à alta demanda energética e às emissões inerentes

aos próprios processos industriais, que são frequentemente difíceis de converter para alternativas de baixo carbono. Tradicionalmente, esses setores incluem indústrias de base pesada, como cimento, siderurgia e produtos químicos, além de modos de transporte de longa distância, como aviação, transporte rodoviário de carga e navegação marítima (IEA, 2020).

Nos últimos anos, o escopo da classificação HTA foi ampliado, passando a incluir um conjunto mais diversificado de segmentos industriais. Entre eles, destacam-se a produção de minerais não metálicos (como cal, cerâmica, vidro e produtos de calcinação), a fabricação de papel e papelão, o processamento de gesso, a produção de alumínio e atividades relacionadas ao refino de petróleo e ao processamento de gás natural (PALTSEV *et al.*, 2021; SECHI; GIAROLA; LEONE, 2022). Essa expansão reflete uma compreensão mais abrangente das dificuldades técnicas, econômicas e regulatórias envolvidas na descarbonização de diferentes cadeias produtivas.

No contexto brasileiro, ainda não existe uma norma oficial ou taxonomia padronizada para a categorização de setores HTA. Contudo, a análise das emissões industriais de GEE permite identificar claramente os segmentos com maior contribuição para o total de emissões. Em 2020, por exemplo, os setores de cimento e siderurgia foram responsáveis por aproximadamente 82% das emissões industriais de GEE no país, o que equivale a cerca de 83 MtCO₂e (BRAZIL, 2017; MCTI/BRAZIL, 2021). Esses números evidenciam a centralidade desses setores na agenda de mitigação de carbono da indústria brasileira.

Para fins de amostragem e análise territorial neste estudo, foram identificadas 59 plantas industriais distribuídas em cinco setores considerados representativos da categoria HTA: alumínio (A), cimento (C), vidro (G), papel e celulose (P) e aço (S), como pode ser observado na Tabela 3. Essas instalações estão geograficamente distribuídas em 38 unidades territoriais distintas (fontes estacionárias) e são operadas por um total de 39 grupos empresariais, todos com atuação relevante na economia industrial nacional.

Do ponto de vista da distribuição espacial, a maioria absoluta das plantas mapeadas (81%, correspondendo a 48 unidades) encontra-se no estado de São Paulo, refletindo a concentração histórica de atividades industriais naquele estado. As 11 plantas restantes (19%) estão localizadas no estado do Rio de Janeiro, o que reforça a importância estratégica da Região Sudeste para o desenvolvimento de iniciativas de CCUS no Brasil.

Em termos de distribuição setorial, os percentuais relativos foram os seguintes: 24% das plantas pertencem ao setor de alumínio (A), 22% ao setor de cimento (C), 14% ao setor de vidro (G), 24% ao setor de papel e celulose (P) e 17% ao setor siderúrgico (S). Essa diversidade setorial reforça a necessidade de soluções tecnológicas diferenciadas e adaptadas às especificidades de cada segmento da indústria nacional.

Tabela 3 – Lista de fontes difíceis de abater (HTA) organizadas por setor, local e marcadores de posição (ID da fonte) mencionadas no artigo

Setor HTA	Estado	Instalação municipal	Corporação	ID da fonte	
Cimento	São Paulo	Cajati Jacareí Apiáí	Intercement	C-SP-1 C-SP-2 C-SP-3	
		Itapeva Votorantim Salto de Pirapora - Ponte Alta Salto de Pirapora	Votorantim	C-SP-4 C-SP-5 C-SP-6 C-SP-7	
		Mogi das Cruzes	Tupi	C-SP-8	
			Mizu	C-SP-9	
	Rio de Janeiro	Cantagalo Rio de Janeiro Volta Redonda Cantagalo	Votorantim Mizu Tupi Cimento Nacional	C-RJ-10 C-RJ-11 C-RJ-12 C-RJ-13	
		Piracicaba	ArcelorMittal	S-SP-14	
		São Paulo	Pindamonhangaba Araçariguama	Gerdau	S-SP-15 S-SP-16
			Usiminas Villares Metals	Cubatão Sumaré	S-SP-17 S-SP-18
	Aço	Rio de Janeiro	Barra Mansa Resende	ArcelorMittal	S-RJ-19 S-RJ-20
Volta Redonda			CSN	S-RJ-21	
Rio de Janeiro			Gerdau - Cosigua	S-RJ-22	
			Ternium Brasil	S-RJ-23	
Vidro		São Paulo	Guaratinguetá Jacareí Caçapava	AGC Brasil Cebrace	G-SP-24 G-SP-25 G-SP-26
	Porto Ferreira		Verallia	G-SP-27	
			Vidroporto	G-SP-28	
	São Bernardo do Campo		Wheaton	G-SP-29	
	Rio de Janeiro	Porto Real Rio de Janeiro	Guardian Glass Brasil Schott	G-RJ-30 G-RJ-31	
		Rio Claro	Aldoro	A-SP-32	
Alumínio	São Paulo	Votorantim Sorocaba Alumínio	CBA	A-SP-33 A-SP-34 A-SP-35	
		Votorantim Pindamonhangaba Sorocaba	Danieli Elfer Grupo ISA	A-SP-36 A-SP-37 A-SP-38	
		Pindamonhangaba Itaquaquecetuba	Grupo Recicla BR / Latasa	A-SP-39 A-SP-40	
		Itu Santo André	Hydro Extrusions do Brasil	A-SP-41 A-SP-42	
		Santo André Pindamonhangaba	Novelis do Brasil	A-SP-43 A-SP-44	
		São Bernardo do Campo	Temomecanica	A-SP-45	
		São Paulo	Salto Lençóis Paulista Suzano Nova Campina Jacareí Piracicaba Itapira Bragança Paulista	Blendpaper Bracell Celulose Ecolab Klinge Paper Nouryon Pulp and Performance Oji Papeis Penha SA Santher	P-SP-46 P-SP-47 P-SP-48 P-SP-49 P-SP-50 P-SP-51 P-SP-52 P-SP-53
			Suzano Limeira Jacareí	Suzano	P-SP-54 P-SP-55 P-SP-56
	Papel e Celulose	São Paulo	Mogi Guaçu Luiz Antonio	Sylvamo	P-SP-57 P-SP-58
Jacareí			Wana	P-SP-59	

3.8 Amostragem de infraestrutura

Para considerar, ainda que de forma preliminar, a elevada complexidade logística e tecnológica envolvida na implementação de uma cadeia operacional de CCS no contexto brasileiro, este estudo adotou uma abordagem metodológica exploratória para a identificação de infraestruturas terrestres e offshore potencialmente relevantes. Tal abordagem visou identificar pontos estratégicos que possam futuramente funcionar como “nós” logísticos, hubs de armazenamento temporário ou definitivo e unidades de interface para o transporte de CO₂.

A sondagem foi realizada em duas etapas. Na primeira, selecionaram-se os principais terminais terrestres e portos conectados à malha nacional de gasodutos, organizados em conglomerados que podem funcionar futuramente como estoques de buffer ou pontos de integração multimodal (rodoviário, ferroviário, dutoviário e marítimo). A escolha considerou localização, conectividade com grandes emissores, infraestrutura de dutos e a importância estratégica desses terminais no abastecimento energético, além da sinergia logística com polos industriais relevantes para projetos-piloto de CCS.

Na segunda etapa, o foco deslocou-se para o ambiente offshore, com o objetivo de identificar instalações marítimas que possam, no futuro, desempenhar um papel relevante no armazenamento geológico de CO₂. Diante das limitações de acesso a informações detalhadas sobre infraestrutura submarina, como a localização exata de manifolds, configuração de risers, rotas de tiebacks e disponibilidade de poços de injeção, optou-se por basear a análise espacial exclusivamente em dados abertos relacionados à frota de Floating Production Storage and Offloading Units (FPSOs) atualmente em operação nas bacias de Campos e Santos.

A escolha por priorizar os FPSOs nesta análise deve-se a várias razões técnicas e operacionais. Primeiramente, os FPSOs são unidades flutuantes com comprovada capacidade de processamento, armazenamento e, em muitos casos, injeção de fluídos no subsolo, o que os torna elementos estratégicos no planejamento futuro de CCS offshore. Além disso, FPSOs possuem maior flexibilidade de realocação e adaptação frente a novas demandas operacionais, o que é particularmente relevante em cenários de transição energética e descarbonização industrial.

Outro fator determinante foi a disponibilidade de dados públicos sobre suas localizações geográficas, facilitando a modelagem espacial dos potenciais hubs de armazenamento. As informações consideradas incluem dados de georreferenciamento dos FPSOs, bem como o número de campos petrolíferos atendidos por cada unidade, como apresentado na Tabela 4.

Bacia	Operador	Nº. de FPSOs	Nº. de campos petrolíferos atendidos
Campos	Petrobras	12	12
	Petro Rio	2	3
	Shell Brasil	1	3
	Equinor Brazil	1	1
	Prio Bravo	1	1
Santos	Petrobras	25	26
	Enauta Energia	1	1
	Karoon	1	1
	Total Energies	1	1

Tabela 4 – Resumo de FPSOs por bacia, operador e números

Vale destacar que muitos dos FPSOs mais modernos em operação na Bacia de Santos já estão equipados com tecnologias avançadas para separação de gás na planta (*in-loco*), além de sistemas de reinjeção de CO₂ para fins de EOR. Essas capacidades tecnológicas poderão ser aproveitadas ou adaptadas no futuro para a execução de projetos de GCS.

4 RESULTADOS

4.1 Metas de emissões por fonte territorial

O conjunto de equações apresentado entre (3) e (6b) estabelece a fundamentação matemática para a estimativa das metas de emissões proporcionais a serem atribuídas a cada fonte territorial. Essa metodologia parte de uma decomposição espacial da meta global assumida pelo Brasil em sua NDC para o ano de 2022, visando criar uma correspondência mais realista entre os compromissos internacionais de redução de emissões e as características específicas de cada unidade da federação.

A aplicação desta abordagem aos setores de energia e indústria, em escala estadual ($e = S$), permite quantificar não apenas os volumes totais de emissões permitidos por território, mas também as densidades de emissão que podem ser toleradas por unidade de área territorial. Essa análise é particularmente importante quando se busca planejar a implementação de iniciativas como CCS, cuja viabilidade depende de fatores como a concentração geográfica das fontes emissoras, a proximidade com potenciais locais de armazenamento e a logística de transporte de CO_2 .

Na Tabela 5, são apresentados os limites máximos de emissões estimados para os estados mais relevantes neste estudo. Como destaque, o estado de São Paulo apresenta um limite de aproximadamente 0,038 GtCO₂e para os setores de energia e indústria, o que equivale a 14,6% da meta nacional setorial para 2022. O estado do Rio de Janeiro, por sua vez, possui um limite de cerca de 0,014 GtCO₂e, representando 5,4% da mesma meta. Ambos os estados juntos concentram quase 20% do total permitido para os setores analisados, evidenciando a centralidade da região Sudeste no esforço de mitigação nacional.

A relevância desses dois estados é reforçada quando se observa que, de acordo com as premissas de regionalização adotadas, os hubs da Região Sudeste Superior e o hub SP-MS (São Paulo – Mato Grosso do Sul) juntos respondem por aproximadamente 63% da meta nacional setorial. Especificamente dentro de cada hub, São Paulo representa 86% da meta alocada ao SP-MS, enquanto o Rio de Janeiro responde por 22% da meta dentro do hub Sudeste Superior.

Além dos aspectos quantitativos, a análise também incorpora um olhar sobre a densidade espacial das emissões. Isso é representado pelas colunas de densidade média ($\bar{\rho}_{S,lim}$), e pelas densidades de referência para os percentis de 10% e 50%, que podem orientar o zoneamento de áreas com maior ou menor prioridade para ações de mitigação.

Essa abordagem detalhada contribui para a construção de cenários mais precisos de viabilidade técnico-econômica para projetos de CCS, facilitando o alinhamento entre as metas

climáticas nacionais e as realidades regionais. Ela também oferece subsídios valiosos para a formulação de políticas públicas diferenciadas por estado, considerando suas especificidades industriais, territoriais e socioeconômicas.

Hub regional	Fonte territorial	$E_{S,lim}$ [tCO ₂ e]	\bar{A}_S [km ²]	$\bar{\rho}_{S,lim}$ [tCO ₂ e/km ²]	$\bar{\rho}_{S,10\%}$ [tCO ₂ e/km ²]	$\bar{\rho}_{S,50\%}$ [tCO ₂ e/km ²]
Alto Sudeste	Espírito Santo	1.35e+07	434.17	31091.49	3109.15	15545.74
	Minas Gerais	3.73e+07	363.83	102513.72	10251.37	51256.86
	Rio de Janeiro	1.40e+07	373.61	37593.84	3759.38	18796.92
SP-MS	São Paulo	3.78e+07	281.03	134342.07	13434.21	67171.03
	Mato Grosso do Sul	6.19e+06	2957.41	2094.03	209.40	1047.02
Centro-Oeste	Distrito Federal	4.27e+06	5760.78	741.65	74.16	370.82
	Goiás	1.19e+07	829.25	14316.71	1431.67	7158.36
	Mato Grosso	1.38e+07	4525.30	3051.44	305.14	1525.72
Alto Nordeste	Ceará	6.70e+06	610.63	10966.93	1096.69	5483.46
	Rio Grande do Norte	3.03e+06	217.54	13947.70	1394.77	6973.85
Baixo Nordeste	Alagoas	1.86e+06	255.67	7282.64	728.26	3641.32
	Bahia	1.63e+07	765.94	21261.73	2126.17	10630.87
	Paraíba	2.72e+06	197.80	13729.58	1372.96	6864.79
	Pernambuco	5.24e+06	263.69	19887.54	1988.75	9943.77
	Sergipe	2.59e+06	198.97	13011.17	1301.11	6505.56
Paraná	Paraná	2.05e+07	352.57	58113.91	5811.39	29056.96
Rio Grande do Sul	Rio Grande do Sul	1.87e+07	236.65	79048.06	7904.81	39524.03
Santa Catarina	Santa Catarina	1.36e+07	232.35	58759.78	5875.98	29379.89

Tabela 5 – Limites de emissão por fonte territorial para os setores de energia e indústria)

4.2 Densidade Emissiva e Distribuições Espaciais

A análise bidimensional de WKDE, representada pela função estimadora \hat{f} (conforme Equação (13a)), fornece uma caracterização qualitativa e espacialmente explícita da distribuição da densidade emissiva ao longo do território nacional, considerando diferentes escalas territoriais. Essa abordagem permite identificar, de forma estatisticamente robusta, os gradientes espaciais de emissão de CO₂e a partir de fontes estacionárias.

A Figura 16 mostra os contornos de isodensidade do campo $\bar{\rho}$, revelando concentração significativa de emissões nas regiões Sudeste e Sul, com um pico dominante entre Rio e São Paulo e outro menor em direção ao Nordeste. O formato alongado das isolinhas ao longo do litoral reflete o desenvolvimento econômico e industrial histórico, influenciado por urbanização, conurbação, turismo e produção *offshore* de petróleo.

Esse padrão espacial de emissões é ainda mais evidente quando a análise WKDE é restrita aos setores de energia e indústria. As isolinhas circulares, centradas predominantemente na região Sudeste, refletem a localização das principais fontes HTA do país, evidenciando a forte concentração geográfica dessas atividades emissoras. As duas subsequentes representações (terceira e quarta subfiguras da Figura 16) detalham o panorama regional, enfocando as regiões intermediárias dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo.

No estado do Rio de Janeiro, as emissões são intensamente concentradas na capital e sua Região Metropolitana, além dos polos industriais de Volta Redonda – Barra Mansa e Macaé – Rio das Ostras – Cabo Frio, onde setores como siderurgia, cimento e atividades de apoio à indústria de petróleo exercem papel central na economia local. Em contraste, São Paulo apresenta um perfil de dispersão mais linear ao longo de seus principais eixos produtivos (TAVARES, 2018; GOVSP, 2024), com concentração ao longo da Rota Dutra (São Paulo – São José dos Campos), além de ramificações direcionadas a Campinas e, de forma mais difusa, ao interior, alcançando municípios como São José do Rio Preto.

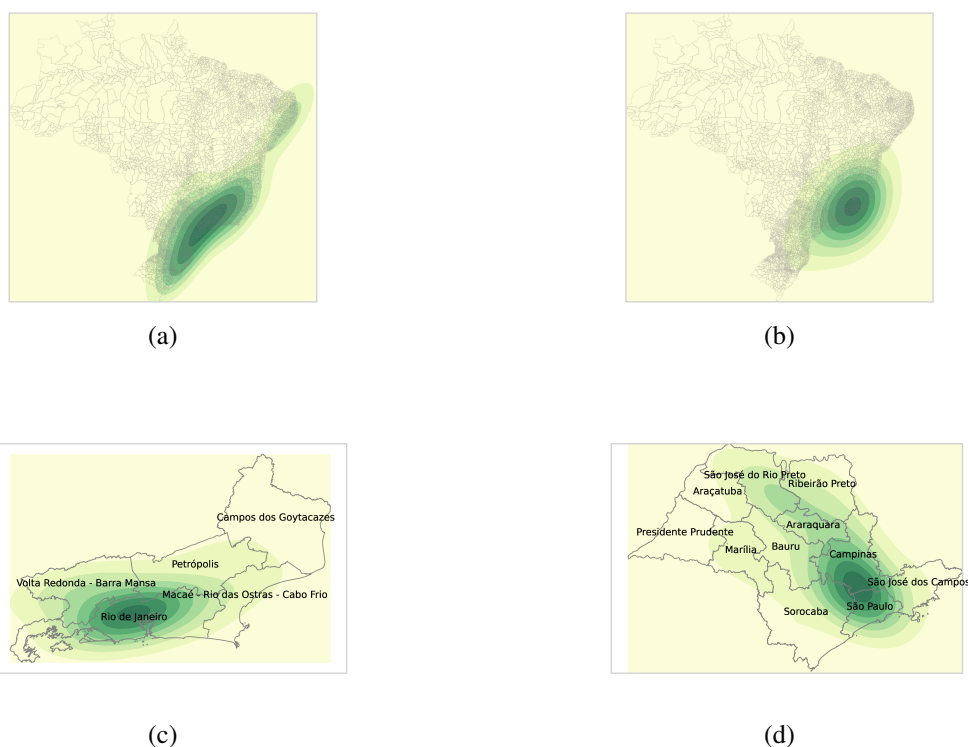


Figura 16 – Contornos de isodensidade para emissões de CO₂: (a) emissões totais no território nacional; (b) emissões dos setores de energia e indústria no território nacional; (c) emissões de energia e indústria nas regiões intermediárias do estado do Rio de Janeiro; (d) emissões de energia e indústria nas regiões intermediárias do estado de São Paulo

Do ponto de vista quantitativo, os efeitos da estratificação espacial das emissões foram avaliados por meio de distribuições acumuladas da densidade emissiva $\bar{\rho}$ para as regiões intermediárias de ambos os estados foco deste estudo (Figura 17). Na escala territorial estadual ($e = S$), os gráficos permitem identificar de forma objetiva quais regiões ultrapassam ou se aproximam dos limiares de 10% e 50% das emissões, servindo como base para a categorização preliminar das principais áreas contribuintes.

No caso do Rio de Janeiro, observa-se que quatro das cinco regiões intermediárias excedem o limite de $\bar{\rho}_{S,10\%} = 3759.38 \text{ tCO}_2\text{e}$, sendo, portanto, classificadas como “emissoras médias”. Entre elas, apenas a capital e sua região metropolitana superam ligeiramente o patamar de $\bar{\rho}_{S,50\%} = 18796.92 \text{ tCO}_2\text{e}$, qualificando-se como “alta emissora”. A região de Campos dos Goytacazes, apesar da expressiva atividade da indústria de óleo e gás, permanece classificada

como “baixa emissora”, resultado que pode ser atribuído a fatores como a sub-representação de fontes *offshore* nas bases de dados ou a própria metodologia de estratificação espacial adotada.

Por outro lado, no estado de São Paulo, todas as regiões intermediárias analisadas situam-se abaixo do limiar de $\bar{\rho}_{S,10\%} = 13434.21$ tCO₂e, sendo categorizadas como “baixas emissoras”. Esse resultado é particularmente relevante quando se considera o tamanho absoluto das emissões estaduais, que supera significativamente as de outros estados.

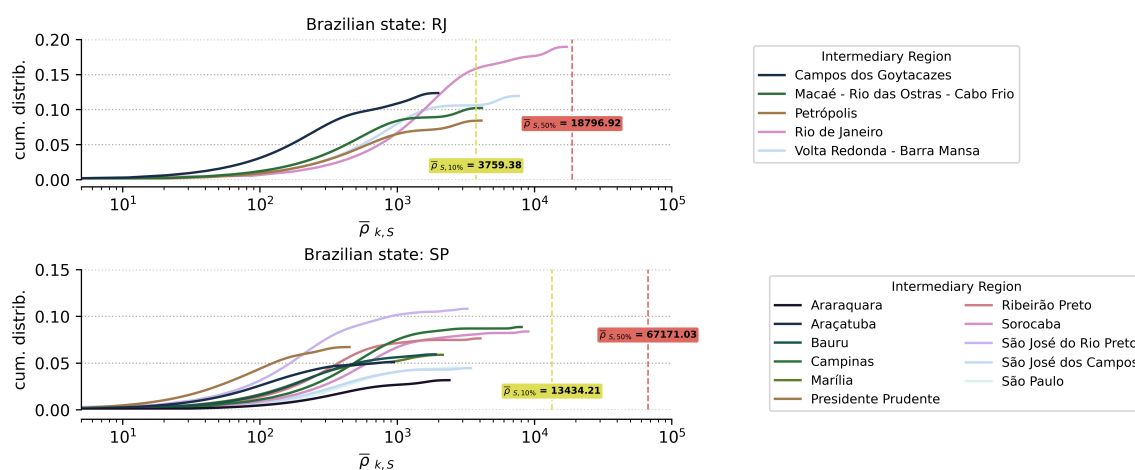


Figura 17 – Distribuições acumuladas da densidade emissiva sobre os municípios das regiões intermediárias, estratificadas segundo a escala territorial estadual ($e = S$): Rio de Janeiro (acima) e São Paulo (abaixo). As linhas verticais indicam os limiares de emissão de baixo e médio porte utilizados como referência na categorização.

O gráfico apresenta as curvas de distribuição cumulativa das emissões médias por região intermediária nos estados do RJ e SP. No eixo horizontal, em escala logarítmica, está a emissão média acumulada $\bar{\rho}_{k,s}$, enquanto o eixo vertical indica a proporção acumulada das regiões com emissões até determinado valor. Essas curvas são monotonicamente crescentes, pois representam a soma acumulada das proporções das emissões, não podendo decrescer. A aparente queda seguida de subida em algumas curvas resulta do efeito visual da escala logarítmica, que comprime os valores menores e estende os maiores, além das diferentes taxas de crescimento das curvas, refletindo a concentração variável das emissões nas regiões intermediárias.

É importante ressaltar que a aplicação dos limiares de densidade emissiva (Equações 6a–6b) nas distribuições acumuladas possui interpretação distinta daquela originalmente atribuída à categorização de fontes territoriais. Embora seja tecnicamente viável rotular as regiões analisadas na Figura 17 como “Categoria-A” ou “Categoria-B” segundo os critérios definidos neste estudo, vale destacar que, quando a escala de análise é estadual ($e = S$), a área média \bar{A}_S considera a totalidade da superfície das fontes territoriais dentro do estado, e não apenas a área específica de cada região intermediária.

Em conformidade com a terminologia introduzida na subseção 2.4, a adoção dos termos “baixa emissora” e “média emissora” é, portanto, a mais adequada neste contexto. Além disso, uma análise comparativa entre estados revela que os limiares de São Paulo são aproximadamente

3,5 vezes superiores aos do Rio de Janeiro. Entretanto, tal diferença não deve ser interpretada como evidência de que uma determinada região em São Paulo possui emissões absolutas superiores às de uma contraparte fluminense. Para uma avaliação mais precisa dos impactos regionais, seria necessário um rastreamento detalhado das emissões por fonte HTA, com base em inventários individualizados por planta industrial.

4.3 Análise da Rede de CCUS: Captura

Visando estabelecer uma base conceitual sólida para o planejamento integrado de uma futura rede nacional de CCS no Brasil, esta subseção dedica-se à etapa inicial da cadeia de valor: a captura de CO₂. A análise aqui apresentada procura estruturar, de forma sistemática e territorialmente orientada, as informações fundamentais para a seleção e priorização das fontes estacionárias de emissão, considerando as particularidades setoriais, geográficas e infraestruturais.

O primeiro passo consistiu na aplicação de um processo de categorização das fontes de emissão, fundamentado em critérios de intensidade emissiva, relevância econômica e estratégica, além da densidade espacial das emissões. Essa etapa envolveu o processamento de bases de dados nacionais e internacionais, incluindo inventários públicos de emissões atmosféricas e registros corporativos, de forma a garantir uma representatividade adequada das principais atividades industriais e energéticas do país. A categorização resultou na identificação de fontes críticas, agrupadas nas chamadas categorias *A* e *B*.

Como desdobramento natural dessa classificação, procedeu-se à identificação e delimitação geográfica dos clusters de captura e hubs de captura, com foco especial nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, previamente selecionados como regiões prioritárias. A delimitação desses agrupamentos territoriais considerou não apenas o volume de emissões, mas também a proximidade entre as fontes, a existência de sinergias logísticas, a maturidade da infraestrutura industrial e a disponibilidade de potenciais corredores de transporte para o CO₂.

A análise espacial revelou que os clusters de captura concentram-se predominantemente em zonas metropolitanas e em eixos industriais consolidados, refletindo um padrão de desenvolvimento industrial historicamente associado à infraestrutura de energia, transporte e serviços. Exemplos emblemáticos incluem a Região Metropolitana do Rio de Janeiro, o eixo Volta Redonda – Barra Mansa – Resende e os corredores industriais de São Paulo, como os que se estendem de Campinas até São José dos Campos.

Além do mapeamento geográfico, foi realizada uma análise preliminar de acessibilidade e conectividade entre as fontes de emissão e os potenciais pontos de interface com a infraestrutura de transporte de CO₂. Para tal, foram calculadas distâncias euclidianas mínimas entre as fontes categorizadas e os hubs de armazenamento previamente modelados nas bacias sedimentares *offshore*. Essa análise teve como objetivo fornecer uma primeira aproximação dos requisitos

logísticos e energéticos necessários para o escoamento do CO₂, considerando diferentes cenários de roteamento.

Outro aspecto relevante da análise foi a consideração de fatores socioambientais e regulatórios que possam influenciar o processo de licenciamento ambiental e a aceitação pública de projetos de captura de CO₂. Embora tais fatores não tenham sido quantificados nesta etapa exploratória, sua inclusão na análise qualitativa reforça a necessidade de abordagens multidimensionais nos futuros estudos de viabilidade.

Esta etapa de caracterização da captura corresponde ao primeiro nível de um processo iterativo de planejamento, cujo detalhamento técnico-econômico das alternativas dependerá de modelagens adicionais, análises de custo-benefício, avaliações do ciclo de vida e simulações de desempenho energético. Assim, os resultados apresentados são preliminares, servindo como orientação para as etapas seguintes, como definição de corredores de transporte, especificação de tecnologias de compressão e projeto das unidades de captura nas instalações mapeadas.

4.3.1 Função de Categorização Emissiva

A análise cumulativa das densidades emissivas por região intermediária, apresentada na Figura 17, forneceu uma visão preliminar da distribuição espacial das emissões dentro de cada estado. Contudo, para um diagnóstico mais refinado e direcionado ao planejamento territorial da infraestrutura de CCS, torna-se essencial aplicar a função de categorização emissiva, representada pela métrica $\alpha_{k,IR}$. Essa função permite classificar as fontes territoriais (neste caso, municípios) com base em uma estratificação da densidade emissiva ajustada à área média das regiões intermediárias (\bar{A}_{IR}), conforme definido na metodologia deste estudo.

Do ponto de vista conceitual, a função $\alpha_{k,IR}$ estabelece um critério estatístico e espacialmente sensível para distinguir entre três categorias principais de fontes emissoras: Categoria A (emissores de baixa intensidade), Categoria B (emissores de intensidade intermediária) e Categoria C (grandes emissores, com densidades acima dos percentis superiores de referência). Essa classificação considera não apenas o volume absoluto de emissões, mas também a concentração espacial relativa à escala das regiões intermediárias, o que garante maior equidade comparativa entre estados com diferentes tamanhos geográficos e perfis socioeconômicos.

Conforme ilustrado na Figura 17, a análise estatística das regiões intermediárias dentro de seus respectivos estados pode ser quantificada a partir da agregação das densidades emissivas dos municípios que as compõem. Essa abordagem permite identificar os principais polos emissores em diferentes escalas territoriais, revelando padrões de concentração que são essenciais para o planejamento de estratégias de mitigação.

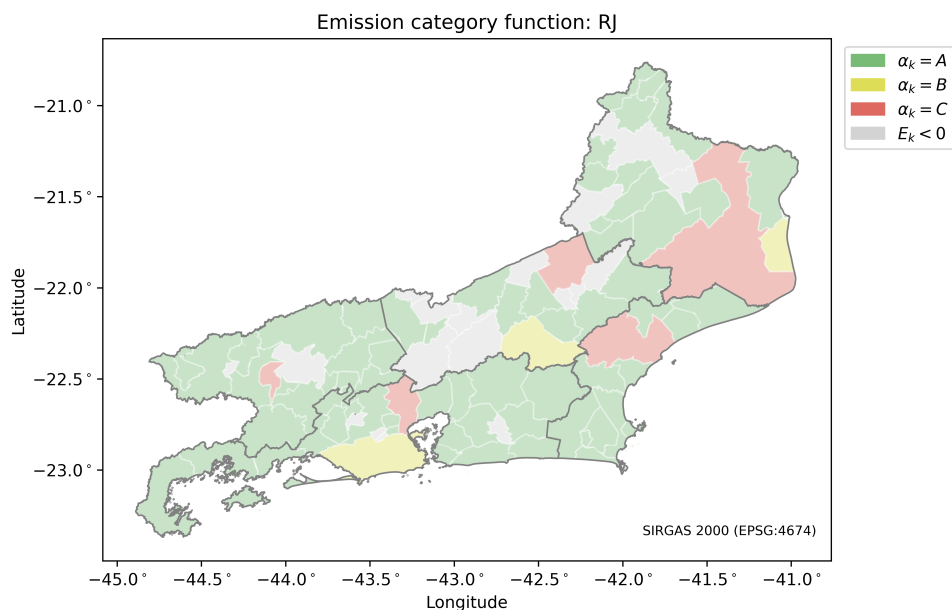
No entanto, para além dessa visão quantitativa acumulada, a função de categorização das emissões oferece uma perspectiva complementar e espacialmente detalhada sobre a distribuição relativa da intensidade emissiva entre as fontes territoriais. Essa função, calculada a partir da

estratificação definida pela área média \bar{A}_{IR} das regiões intermediárias, permite classificar cada município conforme sua relevância na matriz emissiva local, destacando os territórios que apresentam maior potencial impacto ambiental e econômico.

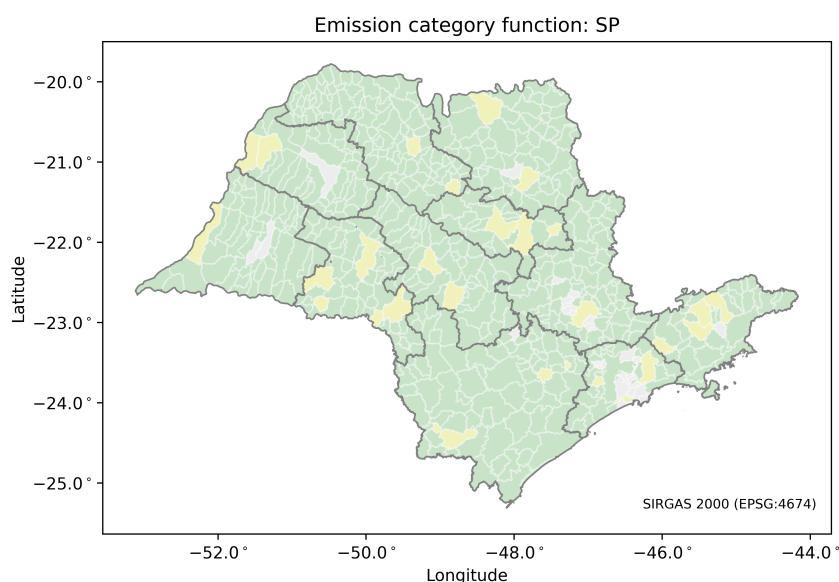
A aplicação dessa função nos estados do Rio de Janeiro e de São Paulo resultou em um panorama espacial bastante revelador (Figura 18). No Rio de Janeiro, de um total de 92 municípios analisados, observou-se uma expressiva predominância de fontes de Categoria A (66 municípios), seguida por uma presença discreta de fontes de Categoria B (3 municípios) e um grupo seletivo de apenas 5 municípios classificados como Categoria C. Além disso, 18 municípios apresentaram saldo negativo de emissões, o que indica áreas com remoções líquidas ou ausência de atividades industriais e energéticas significativas.

Já em São Paulo, o cenário é ainda mais concentrado: entre 645 municípios, verificou-se um predomínio quase absoluto de fontes Categoria A (586 municípios), com 28 municípios classificados como Categoria B e nenhum enquadrado na Categoria C. Também foram identificados 31 municípios com emissões negativas. Esse padrão, que à primeira vista pode sugerir uma menor concentração de grandes fontes emissoras em São Paulo, é resultado da própria estrutura metodológica, que aplica os limiares de categorização de forma relativa a cada estado, levando em conta as respectivas áreas médias das regiões intermediárias.

A análise espacial da variável $\alpha_{k,IR}$ nos estados estudados revela um padrão heterogêneo, alinhado ao contexto socioeconômico brasileiro. A categoria C, que inclui os maiores emissores per capita ou por área, é pouco frequente, refletindo a concentração de grandes instalações industriais e de geração de energia. A categoria B, com emissões intermediárias, apresenta distribuição moderada, associada a indústrias médias e centros urbanos. Já a categoria A predomina, indicando ampla dispersão de fontes menores, como atividades residenciais, comerciais e agrícolas, que, apesar do menor impacto individual, contribuem significativamente para o total emissivo estadual.



(a) Estado do Rio de Janeiro.



(b) Estado de São Paulo.

Figura 18 – Função de categorização das emissões nos estados analisados, com mapas coropléticos que mostram a relevância relativa das fontes territoriais segundo a densidade emissiva. A escala varia de verde (baixa emissão) a vermelho (alta emissão), e áreas cinza indicam municípios com balanço emissivo negativo

Ao integrar os resultados da categorização emissiva com os mapas de densidade espacial de emissões obtidos pelo WKDE, é possível identificar com maior clareza os principais hotspots territoriais para o desenvolvimento de redes locais de CCS. As fontes das Categorias B e C, quando agrupadas por região intermediária, representam os alvos mais estratégicos para intervenções de curto e médio prazo, considerando aspectos como viabilidade econômica, infraestrutura existente e proximidade a potenciais locais de armazenamento geológico.

A Tabela 6 exemplifica essa priorização ao destacar as cinco principais regiões interme-

diárias nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, que somam cerca de 33,92 MtCO₂e/km² e 40,73 MtCO₂e/km² de densidade emissiva estratificada $\bar{\rho}_{IR}$, respectivamente. Estes valores refletem não apenas a intensidade da atividade industrial e energética, mas também a concentração espacial dos focos emissores, aspectos que são cruciais para o planejamento estratégico de infraestrutura de CCS, incluindo a definição de corredores de transporte, locais de armazenamento geológico e integração com políticas públicas de descarbonização.

Esta função de categorização reforça a importância de se considerar múltiplas escalas territoriais e a heterogeneidade das fontes emissoras, elementos essenciais para a formulação de políticas ambientais eficazes e para o fomento de tecnologias que possam promover a transição energética com impactos socioeconômicos minimizados.

Tabela 6 – Regiões intermediárias promissoras para redes locais de CCS. As fontes territoriais são listadas em ordem alfabética (quarta coluna), enquanto a densidade emissiva total por região intermediária (última coluna) é classificada em ordem decrescente dentro de cada estado

Estado	Região intermediária	Fonte territorial	$\alpha_{k,IR}$	$\bar{\rho}_{k,IR}$ [tCO ₂ e]	$\Sigma \bar{\rho}_{k,IR}$ [tCO ₂ e]
RJ	Rio de Janeiro	Duque de Caxias	C	13220.51	19871.19
		Rio de Janeiro	B	6650.68	
	Volta Redonda - Barra Mansa	Volta Redonda	C	6337.46	6337.46
	Macaé - Rio das Ostras - Cabo Frio	Macaé	C	3058.59	3058.59
	Petrópolis	Cantagalo	C	2446.86	2858.93
		Nova Friburgo	B	412.08	
	Campos dos Goytacazes	Campos dos Goytacazes	C	1122.09	1791.89
		São João da Barra	B	669.80	
SP	Sorocaba	Alumínio	B	2101.46	10288.60
		Apiáí	B	2862.11	
		Salto de Pirapora	B	5325.04	
	Campinas	Campinas	B	9617.44	9617.44
	São Paulo	Itapeberica da Serra	B	2072.58	8532.87
		Mogi das Cruzes	B	2379.54	
		São Vicente	B	4080.75	
	São José do Rio Preto	Santa Adélia	B	2786.11	6368.92
		São José do Rio Preto	B	3582.81	
	Marília	Marília	B	943.45	5925.25
		Ourinhos	B	1569.53	
		Paraguaçu Paulista	B	1237.20	
		Santa Cruz do Rio Pardo	B	1033.85	
		Tarumã	B	1141.21	
	São José dos Campos	Guaratinguetá	B	833.65	5067.28
		Jacareí	B	2487.73	
		Pindamonhangaba	B	834.26	
		Taubaté	B	911.64	
	Ribeirão Preto	Guaíra	B	1209.96	4123.65
		Ribeirão Preto	B	2913.70	
	Araraquara	Araraquara	B	1089.82	3047.59
		Porto Ferreira	B	1111.71	
		São Carlos	B	846.06	
	Bauru	Bauru	B	1098.22	1923.68
		Lençóis Paulista	B	825.46	
	Araçatuba	Andradina	B	684.20	1191.11
		Castilho	B	506.91	
	Presidente Prudente	Presidente Epitácio	B	273.82	273.82

4.3.2 *Clusters e hubs de captura*

A identificação dos clusters de captura iniciou-se com a aplicação do algoritmo DBSCAN (Eq. 14) às fontes classificadas como HTA, representadas por \mathbf{x}_C . O parâmetro espacial ε_C foi fixado em 50 km, refletindo a distância típica de transporte de CO₂ em projetos consolidados (IEA, 2023a). O parâmetro mínimo de fontes para formar um cluster, μ_C , foi definido como 3, buscando equilíbrio entre significância estatística e viabilidade operacional para o planejamento da infraestrutura CCS.

Uma vez identificados os clusters, o procedimento incluiu a substituição dos centróides geométricos pelos medoids correspondentes, que são membros reais do grupo, a fim de garantir uma representação espacial mais precisa e operacionalmente relevante da configuração dos pontos emissores. Cada medoid, portanto, passou a ser considerado o hub teórico de captura, ou seja, o ponto estratégico dentro do cluster que melhor representa a localização ideal para a centralização dos esforços de captura, armazenamento temporário e conexão com a rede de transporte de CO₂.

No estado do Rio de Janeiro, a análise resultou na identificação de dois clusters principais de captura, compostos por 4 e 5 fontes HTA, respectivamente. Ambos os agrupamentos são majoritariamente constituídos por instalações siderúrgicas, refletindo a concentração e a relevância econômica do setor no estado. Os hubs teóricos desses clusters estão localizados em empresas específicas, rotuladas como S-RJ-23 e S-RJ-19, conforme indicado na Tabela 3. Além disso, duas fontes HTA não se enquadraram nos critérios de densidade espacial e foram classificadas como “ruído”, ficando excluídas do agrupamento, o que sugere a existência de emissores isolados ou situados em áreas com baixa concentração industrial.

No estado de São Paulo, a análise inicial identificou três clusters de captura, que foram subdivididos manualmente em cinco. O primeiro cluster é dominado por indústrias de cimento e celulose e papel, com hub em C-SP-8. O segundo cluster, centrado em C-SP-5, é composto principalmente por indústrias de alumínio. O terceiro cluster, heterogêneo, reúne alumínio, siderurgia e celulose e papel, com hub em S-SP-14. O quarto cluster agrega alumínio, cimento e vidro, tendo hub em A-SP-45. O quinto cluster é dominado por instalações do setor de alumínio, refletindo a concentração regional desse segmento.

Além dos clusters definidos, onze fontes HTA foram classificadas como “ruído” pelo algoritmo em São Paulo, correspondendo, em sua maioria, a instalações isoladas distribuídas em diversas regiões intermediárias. Essa dispersão indica desafios adicionais para a inclusão dessas fontes em redes CCUS integradas, podendo demandar soluções específicas como transporte individualizado ou pequenas unidades móveis de captura.

A representação visual desses agrupamentos, por meio dos rótulos das fontes HTA, é apresentada nos gráficos de distância (Figura 19), que facilitam a compreensão das relações espaciais e a proximidade entre os pontos emissores, aspectos fundamentais para o planejamento

estratégico da infraestrutura CCS.

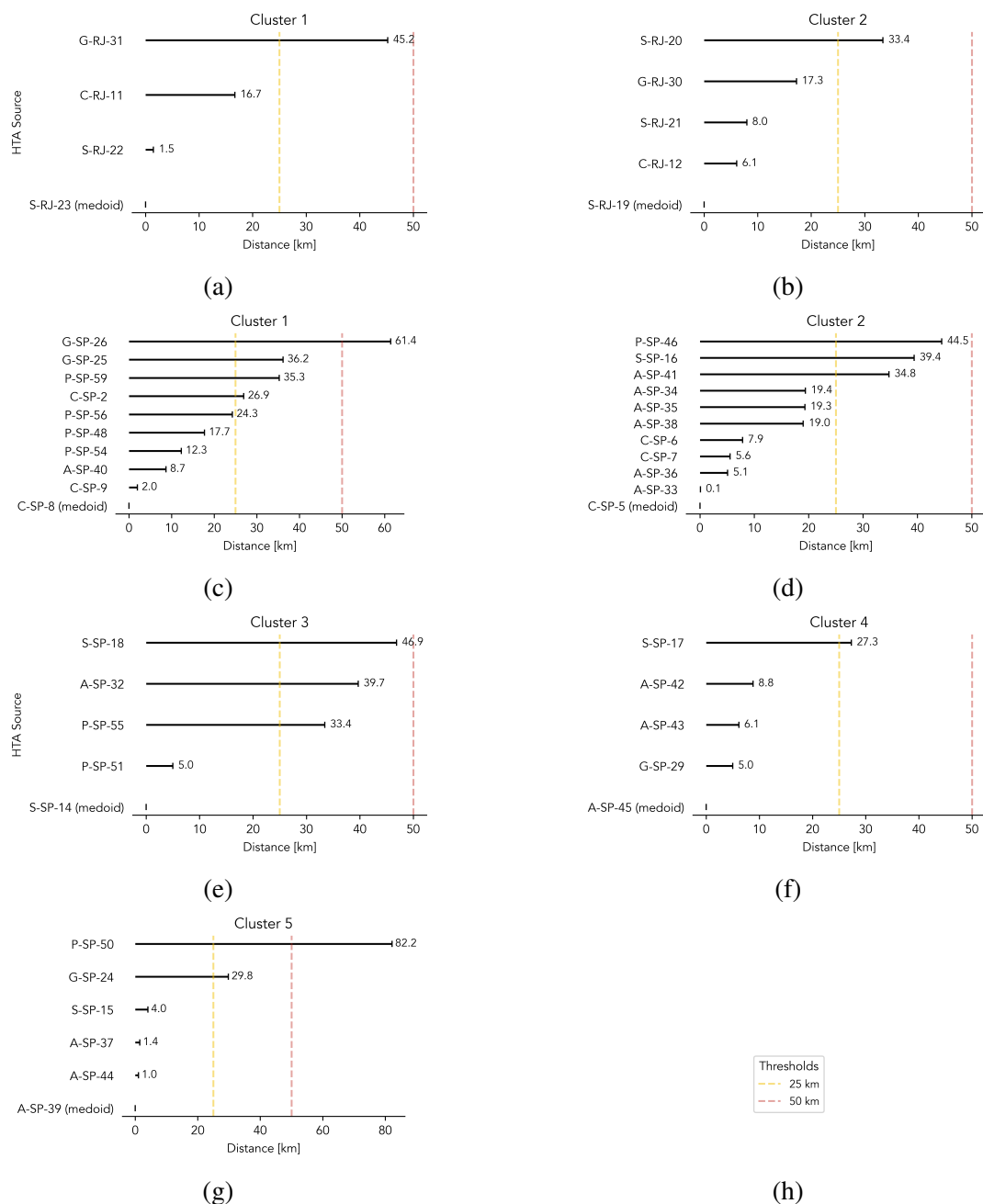


Figura 19 – Gráficos de distância da rota fonte-centro para os aglomerados de captura identificados no Rio de Janeiro — (a) e (b) — e em São Paulo — (c) a (g). As linhas verticais tracejadas representam os limites de distância de referência de 25 km e 50 km do centro do aglomerado (medoide), conforme indicado na legenda (h)

Este processo detalhado de identificação e análise dos clusters e hubs de captura não apenas oferece uma visão clara das dinâmicas espaciais das fontes emissoras HTA, mas também fundamenta decisões estratégicas para a implantação eficiente de redes de CCS. O reconhecimento desses agrupamentos permite priorizar regiões com maior densidade e potencial de redução de emissões, otimizar investimentos e recursos, e planejar soluções logísticas adaptadas

às particularidades locais, promovendo assim um avanço coordenado e eficaz na descarbonização industrial.

4.3.3 *Distâncias entre hubs e instalações*

Foram calculadas as distâncias de rota entre os hubs de captura identificados e diferentes instalações localizadas nos estados do Rio de Janeiro e de São Paulo, com o objetivo de avaliar a conectividade logística entre os pontos emissores de CO₂ e os potenciais locais de escoamento, armazenamento ou exportação. Esta etapa da análise é essencial para apoiar decisões de planejamento de infraestrutura, estimativa de custos de transporte e priorização de projetos-piloto de curto e médio prazo.

No Rio de Janeiro, as distâncias entre hubs e terminais terrestres, considerados potenciais instalações de tamponamento para armazenamento temporário de CO₂, variam significativamente, com distância máxima de aproximadamente 131 km até o terminal T-RJ-TECAM-3. Também foram avaliadas conexões com portos marítimos, que são estratégicos para o transporte do CO₂ capturado a estruturas *offshore*, sendo a maior distância cerca de 444 km até o porto M-RJ-ACU-38. Destaca-se ainda o projeto-piloto de CCS em M-RJ-TECAB-40, sinalizando potencial para investimentos e expansão da infraestrutura.

No estado de São Paulo, observou-se um perfil logístico ligeiramente diferente, refletindo a geografia industrial e de transporte do estado. A distância mais longa entre um hub e um terminal terrestre foi de aproximadamente 447 km, até o ponto T-SP-RIBEIRÃO PRETO-34, localizado no interior paulista. Já em relação aos portos, a maior distância foi de cerca de 305 km, até o terminal marítimo M-SP-TEBAR-0, que pode se tornar um importante elo de conexão entre a captura *onshore* e o armazenamento *offshore* ou a exportação do CO₂ para outras regiões.

A Figura 20 mostra gráficos do tipo “lollipop”, detalhando as distâncias entre hubs de captura e instalações selecionadas. Essa visualização facilita a análise da conectividade física e a comparação entre cenários, apoiando a definição de corredores logísticos viáveis para projetos de CCS. Considerando diferentes tipos de instalações, permite-se identificar sinergias entre a infraestrutura atual e as demandas futuras da cadeia de CCS.

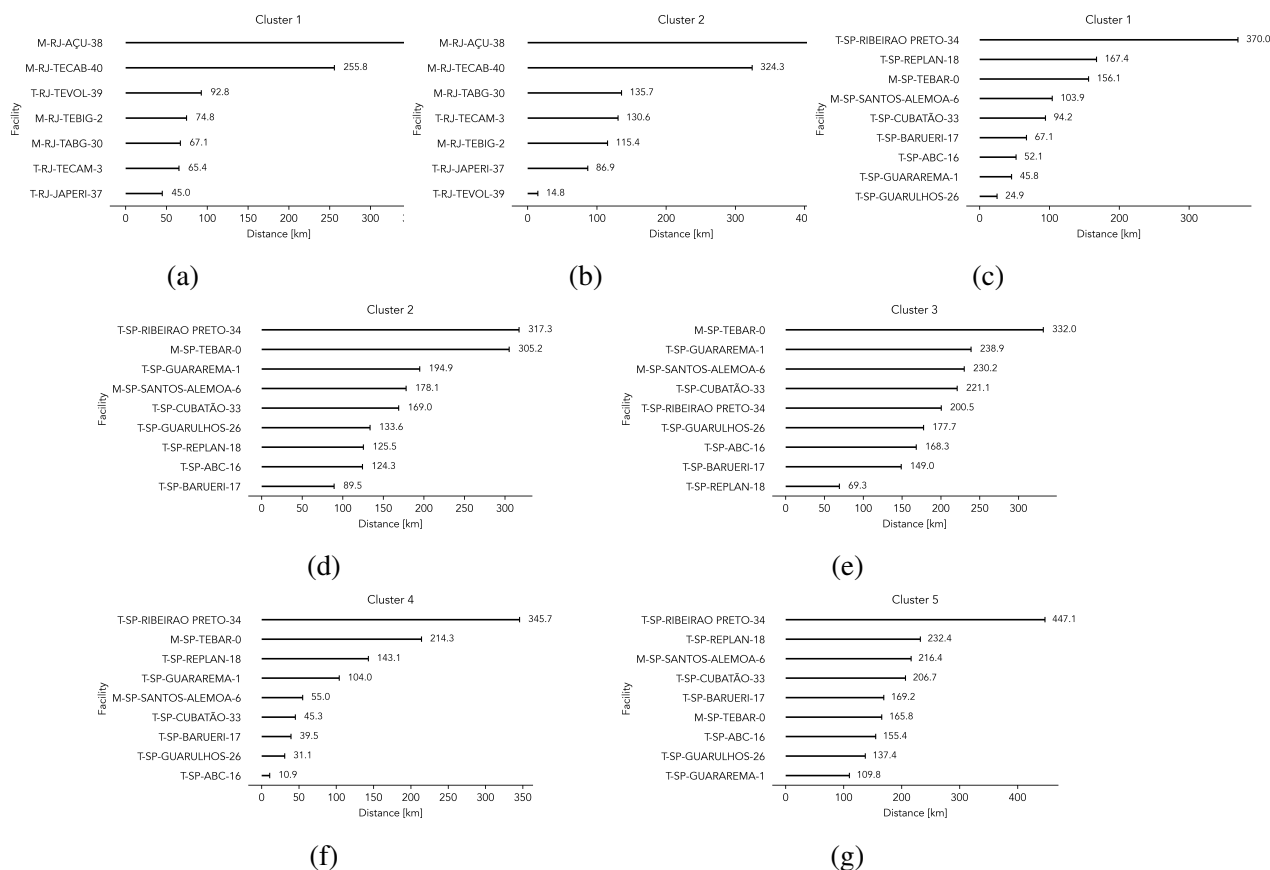


Figura 20 – Gráficos de distâncias entre hubs de captura e instalações (terminais e portos) para os clusters identificados no Rio de Janeiro — (a) e (b) — e em São Paulo — (c) e (g)

4.4 Análise da rede de CCS: armazenamento

A nossa análise da rede de CCS, na parte de armazenamento, está voltada à caracterização espacial e funcional dos clusters e hubs voltados ao armazenamento de CO₂, considerando os estados selecionados como foco deste estudo. Ao contrário da etapa de captura, cuja análise abrange tanto o ambiente *onshore* quanto o *offshore*, a análise de armazenamento está inteiramente restrita às áreas marítimas. Essa delimitação se justifica pelo fato de que as bacias sedimentares mais promissoras para o armazenamento geológico de carbono, tanto do ponto de vista técnico quanto regulatório, encontram-se situadas em territórios *offshore*, com destaque para as regiões que já contam com infraestrutura de exploração de petróleo e gás.

A presença de infraestrutura legada, como poços inativos, dutos submarinos, plataformas e FPSOs, representa um fator estratégico para viabilizar projetos de armazenamento de CO₂ com menores custos e prazos reduzidos de implementação. Além disso, a familiaridade técnica e regulatória com essas áreas, adquirida ao longo de décadas de exploração *offshore*, constitui um ativo institucional importante para a aceleração de projetos-piloto e a transição para soluções industriais em escala.

Neste contexto, a análise conduzida nesta subseção segue uma abordagem em múlti-

plas etapas, que permite uma compreensão abrangente das condições e possibilidades para o armazenamento de CO₂ no *offshore*. Os resultados são organizados da seguinte forma:

- (i) Avaliação do potencial de reaproveitamento de poços injetores a partir de dados técnicos e operacionais disponíveis, combinada com a análise da importância areal para o GCS, por meio do indicador IPA-GCS.
- (ii) Delimitação de macrocampos (ou áreas de interesse ampliadas), com base na distribuição espacial dos ativos legados e em critérios como densidade de poços, profundidade e integridade geológica das formações.
- (iii) Identificação de clusters de armazenamento por meio de técnicas de agrupamento espacial, seguida da definição dos hubs teóricos de injeção, representados pelos centroides dos agrupamentos com maior potencial técnico.
- (iv) Análise das distâncias de rota entre os hubs teóricos de armazenamento e as FPSOs mais próximas, que são tratadas como hubs logísticos operacionais. Essa etapa busca avaliar a viabilidade de conexão direta entre os pontos de coleta e injeção de CO₂, fornecendo subsídios para o planejamento de malhas de transporte submarinas.

Com os dados obtidos poderemos oferecer uma base técnica robusta para subsidiar decisões estratégicas sobre onde priorizar investimentos em infraestrutura de armazenamento de CO₂ *offshore*, considerando não apenas o potencial geológico, mas também a logística e a infraestrutura existente. A integração entre os elementos técnicos e espaciais discutidos nesta seção é essencial para o desenvolvimento eficiente e seguro de redes regionais de CCS no Brasil.

4.4.1 Importância areal para armazenamento, poços elegíveis e macrocampos

As bacias de Campos e Santos concentram os valores mais elevados do índice IPA_{GCS} , refletindo sua expressiva relevância territorial para o armazenamento geológico de CO₂ no contexto *offshore* brasileiro. Esse índice, desenvolvido para orientar o zoneamento estratégico de áreas com potencial de estocagem, incorpora múltiplas variáveis associadas à presença de infraestrutura legada, maturidade da exploração, volume acumulado de produção e conhecimento geológico consolidado. Como resultado, as regiões com escores mais favoráveis (entre 7 e 9) abrangem praticamente toda a extensão das duas bacias, conforme ilustrado na Figura 21.

A distribuição espacial reforça o papel central das bacias de Campos e Santos na transição energética nacional, devido à grande capacidade de armazenamento e infraestrutura consolidada, favorecida pelo índice IPA_{GCS} . Esse índice é útil para planejamento territorial em escala regional, delimitando zonas preferenciais para estudos de viabilidade técnica e econômica. Porém, não tem resolução para decisões locais, exigindo complementação com indicadores mais detalhados, como o índice de oportunidade de reaproveitamento de poços (O_w).

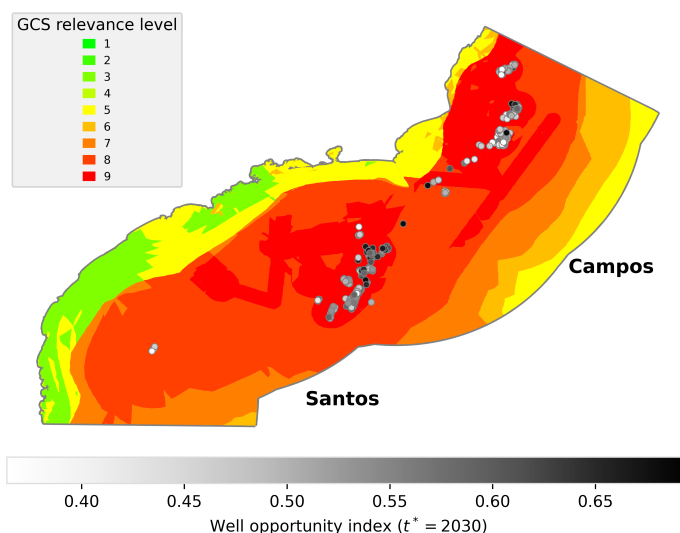
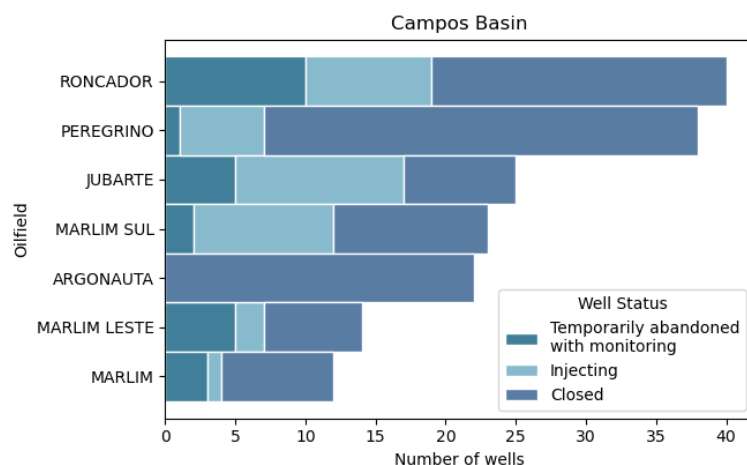


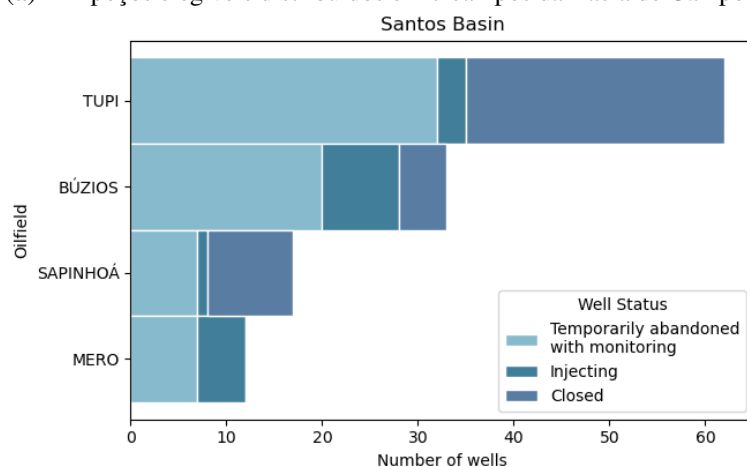
Figura 21 – Importância territorial do petróleo *offshore* para armazenamento geológico de carbono e distribuição de poços elegíveis. O mapa apresenta os valores do índice IPA_{GCS} (de 0 a 9) nas bacias *offshore* brasileiras, conforme metodologia da EPE, bem como a localização dos poços que atendem ao critério de elegibilidade $O_w > 0,3$, segundo esta análise.

Como apresentado na subseção 3.3.5 o índice de oportunidade de reaproveitamento de poços (O_w) aprimora a seleção de áreas para armazenamento ao adicionar uma dimensão analítica mais refinada que o IPA_{GCS} . A aplicação do critério $O_w > 0,3$ aos poços localizados nas bacias de Campos e Santos, que são, além de adjacentes aos estados do Rio de Janeiro e de São Paulo, as mais tecnicamente aptas ao armazenamento de CO_2 , resultou na seleção de 387 poços elegíveis: 214 na Bacia de Campos e 173 na de Santos.

Após o processo de filtragem baseado em médias por campo, o número de poços foi reduzido para 174 em Campos (uma redução de 18%) e 124 em Santos (redução de 28%). Com base nesses conjuntos, foram identificados sete campos de petróleo em Campos e quatro em Santos como áreas tecnicamente promissoras. Esses campos apresentam uma média de poços elegíveis superior à média das respectivas bacias, sendo 11 poços por campo na Bacia de Campos e 9 na de Santos (Figura 22).



(a) 214 poços elegíveis distribuídos em 7 campos da Bacia de Campos.



(b) 173 poços elegíveis distribuídos em 4 campos da Bacia de Santos.

Figura 22 – Distribuição dos poços elegíveis por campo nas bacias de Campos e Santos. Os gráficos mostram os poços com maior potencial de reaproveitamento, filtrados por status operacionais (II, X ou XII) e pelo critério $O_w > 0,3$, totalizando 387 poços. Nenhum poço com status VI foi identificado.

Com base nos campos que atenderam aos critérios de filtragem por média, foram definidos os macrocampos, uma unidade espacial intermediária que agrega campos adjacentes com características compatíveis. A partir dessa modelagem, foram identificados quatro macrocampos na versão reduzida da Bacia de Campos e dois na Bacia de Santos (Figura 23).

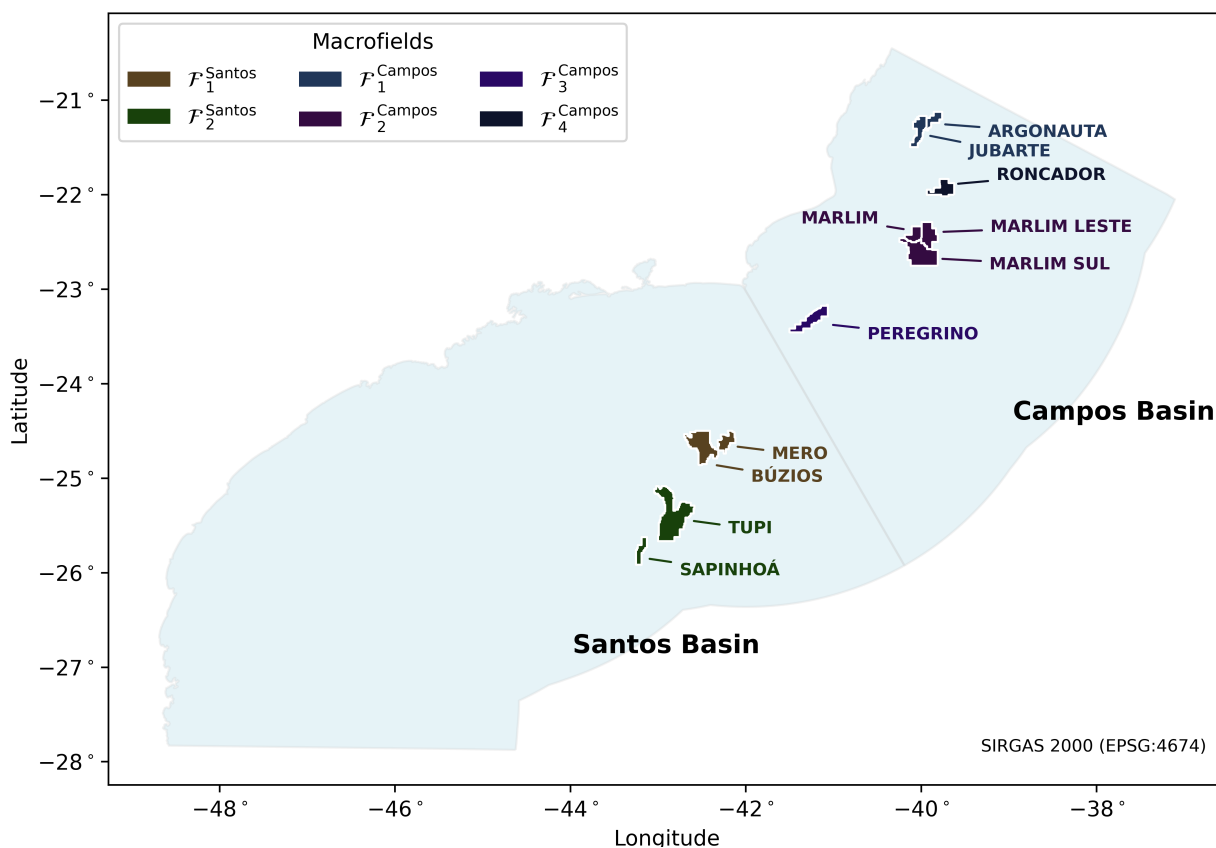


Figura 23 – Modelo de macrocampos aplicado às bacias de Campos e Santos, resultando em quatro macrocampos na primeira e dois na segunda.

Na Bacia de Campos reduzida, a distribuição dos poços elegíveis por macrocampo é: 49 no Complexo Marlim, 47 em Argonauta - Jubarte, 40 em Roncador e 38 em Peregrino. Já na Bacia de Santos reduzida, identificaram-se 45 poços em Búzios - Mero e 79 em Tupi - Sapinhoá. A Tabela 7 apresenta a caracterização completa desses macrocampos, com base nos parâmetros definidos anteriormente na subseção 3.4.3.

B'	i	F_i	η_i	k	ζ_k	\mathcal{F}_k	M
Campos (reduzido)	1	Argonauta	22	1	2	Argonauta - Jubarte	4
	2	Jubarte	25				
	3	Roncador	40	2	1	Roncador	
	4	Marlim	12				
	5	Marlim Leste	14	3	3	Marlim - Marlim Leste - Marlim Sul	
	6	Marlim Sul	23				
	7	Peregrino	38	4	1	Peregrino	
Santos (reduzido)	1	Búzios	33	1	2	Búzios - Mero	2
	2	Mero	12				
	3	Tupi	62	2	2	Tupi - Sapinhoá	
	4	Sapinhoá	17				

Tabela 7 – Caracterização de macrocampos nas bacias reduzidas de Campos e Santos. Os poços elegíveis restantes, após a filtragem baseada na média e a aplicação da restrição O_w , totalizaram 174 em Campos e 124 em Santos, totalizando 298 poços

4.4.2 Clusters e hubs de armazenamento

A identificação de clusters de armazenamento *offshore* foi realizada individualmente em cada macrocampo, por meio da aplicação do algoritmo DBSCAN (ver Eq. 14) ao conjunto de poços elegíveis \mathbf{x}_S de cada unidade. Como o número de poços varia de acordo com o macrocampo, o conjunto de entrada para a clusterização também apresentou dimensões distintas por região. O parâmetro μ_S , que define o número mínimo de pontos para formação de um cluster, foi fixado inicialmente em 5 e limitado a 20, assumindo que esse intervalo representa uma faixa operacionalmente viável para injeção de CO_2 associada a uma única unidade FPSO.

Sempre que o número de poços em um cluster ultrapassava o limite superior (20), novas rodadas do algoritmo eram executadas iterativamente com a redução progressiva do parâmetro ε_S (raio máximo de vizinhança entre poços), de forma a ajustar o tamanho dos agrupamentos e minimizar a ocorrência de “ruído”. Neste contexto, “ruído” refere-se a poços que se comportam como outliers durante a clusterização e, por isso, são excluídos do agrupamento final, sendo considerados não conectáveis de forma prática ou eficiente.

A definição dos hubs de armazenamento partiu, inicialmente, dos centróides dos clusters. No entanto, como o DBSCAN pode gerar centróides que não coincidem com pontos reais do conjunto analisado, optou-se por utilizar esses centróides como coordenadas de referência para a designação de hubs teóricos. Em seguida, cada um desses pontos foi associado à FPSO mais próxima dentro da bacia correspondente, assumindo essas unidades como hubs logísticos operacionais para viabilizar o transporte e injeção do CO_2 capturado.

Embora o procedimento ofereça uma representação coerente das possibilidades espaciais,

há limitações no conhecimento detalhado da malha de interconexões *offshore* nas bacias de Campos e Santos. Assim, os clusters e hubs propostos são cenários teóricos úteis para planejamento inicial, mas que requerem validação com dados operacionais detalhados das operadoras.

A Tabela 8 apresenta a caracterização completa dos 19 clusters de armazenamento identificados, incluindo sua distribuição por macrocampo, o número de poços elegíveis por agrupamento, o raio estimado de cada cluster e a quantidade de poços descartados como ruído. A presença de subíndices nos nomes de alguns clusters indica a realização de etapas adicionais de intraclustering, em resposta à necessidade de fragmentação de agrupamentos inicialmente superdimensionados.

Macrocampo	Cluster de armazenamento	Raio do cluster [km]	Nº. de poços elegíveis	“Ruído”
Argonauta - Jubarte	$C_{1,1}$	6.12	14	7
	$C_{2,1}$	3.14	18	
	$C_{3,1}$	6.12	8	
Roncador	C_1	1.00	20	10
	C_2		10	
Marlim - Marlim Leste - Marlim Sul	C_1	4.56	8	10
	C_2		5	
	C_3		15	
	C_4		11	
Peregrino	C_1	0.07	20	1
	C_2		17	
Búzios - Mero	$C_{1,1}$	7.78	12	5
	$C_{2,1}$	4.45	8	
	$C_{2,2}$		20	
Tupi - Sapinhoá	$C_{1,1}$	7.78	17	19
	$C_{2,1,1}$		16	
	$C_{2,2,1}$		19	
	$C_{2,2,2}$	4.23	6	
	$C_{2,2,3}$		2	

Tabela 8 – Caracterização de clusters de armazenamento, incluindo sua distribuição pelos macrocampos. A última coluna (“Ruído”) indica o número de poços excluídos como outliers durante o agrupamento

4.4.3 Distâncias entre hubs de armazenamento e FPSOs

Conforme delineado na subseção anterior, as unidades FPSO foram adotadas como hubs de armazenamento operacionais para os clusters de poços selecionados em ambiente *offshore*. Essa escolha baseia-se em dois fatores principais: a presença consolidada de FPSOs nas bacias de Campos e Santos e a sua capacidade técnica para operar como terminais de recebimento e reinjeção de CO₂, especialmente com o uso de tecnologias de separação e compressão já embarcadas em diversas unidades.

Para associar clusters de armazenamento a hubs realistas, utilizou-se o centróide teórico

gerado pelo DBSCAN, representando a posição média dos poços. A FPSO mais próxima foi buscada com critério de distância máxima de 20 km, equilibrando viabilidade técnica e eficiência econômica. Clusters com centróide dentro desse raio de uma FPSO ativa foram considerados conectados; caso contrário, classificados como “sem hub viável”.

No contexto *offshore*, as conexões entre poços e FPSOs em projetos de CCS geralmente envolvem redes de dutos flexíveis ou rígidos (risers, flowlines e tiebacks) para transporte do CO₂ comprimido. Plataformas de suporte podem ser usadas como estações intermediárias, mas são mais custosas e complexas. Neste estudo, adotou-se conexões pipeline-based como solução de referência por serem as mais comuns e economicamente viáveis no Brasil.

As Figuras 24, 25, 26 e 27 apresentam os esquemas dos clusters de armazenamento, seus hubs teóricos e as distâncias calculadas para os FPSOs mais próximos. Na Bacia de Campos (Figuras 24 e 25), foi possível estabelecer conexões viáveis para a maioria dos macrocampos. Por exemplo, os clusters situados no macrocampo Argonauta – Jubarte encontram-se a distâncias admissíveis das FPSOs Maria Quitéria e Espírito Santo, ambas operacionais e dotadas de infraestrutura adequada para CCS. Já os clusters formados no complexo Marlim (Marlim, Marlim Leste e Marlim Sul) apresentam proximidade com as FPSOs Anita Garibaldi e Anna Nery, que têm operação recente e são equipadas com módulos de processamento que incluem separação e reinjeção de gás, o que favorece sua conversão para atividades de armazenamento de CO₂.

Apesar desses resultados positivos, é importante observar que diversos poços não foram associados a nenhum hub. Isso ocorre porque o algoritmo DBSCAN identificou parte desses poços como “ruído”, ou seja, elementos isolados espacialmente que não apresentaram densidade suficiente para formar clusters. Embora tais poços possam estar fisicamente ativos ou conectáveis na prática, sua exclusão neste modelo reflete as limitações metodológicas da clusterização espacial pura, sem o suporte de dados operacionais de infraestrutura ou malhas de dutos.

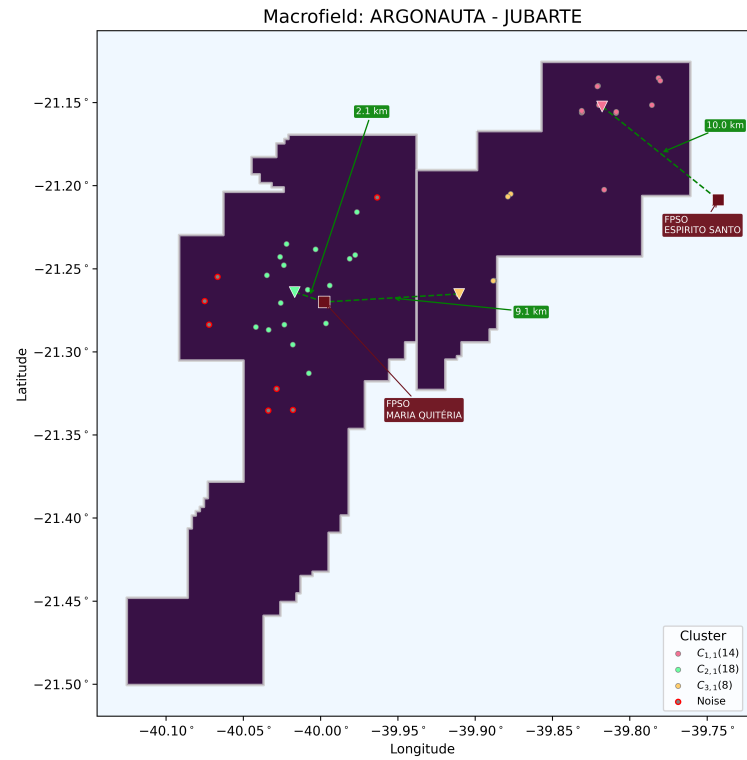


Figura 24 – Arquitetura *offshore* para os macrocampos Argonauta e Jubarte na Bacia de Campos

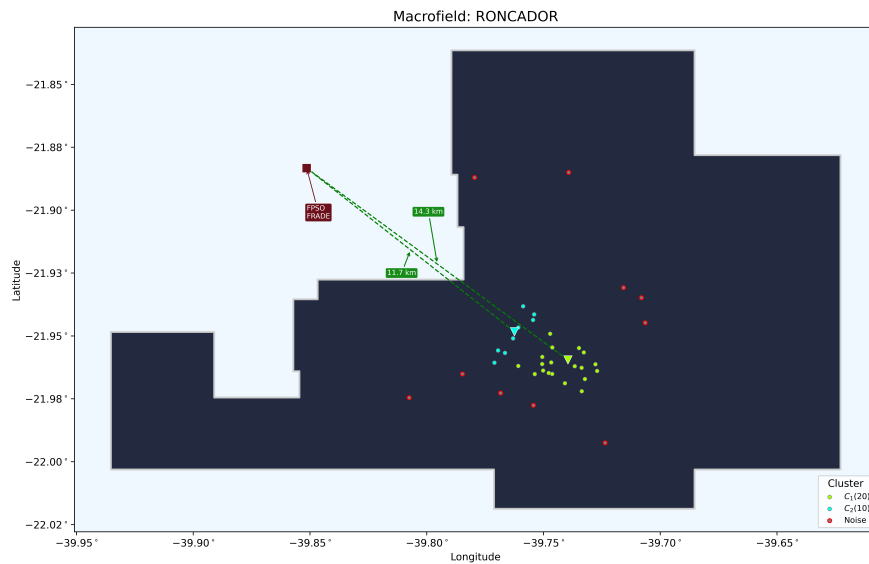


Figura 25 – Arquitetura *offshore* para o macrocampo Roncador na Bacia de Campos

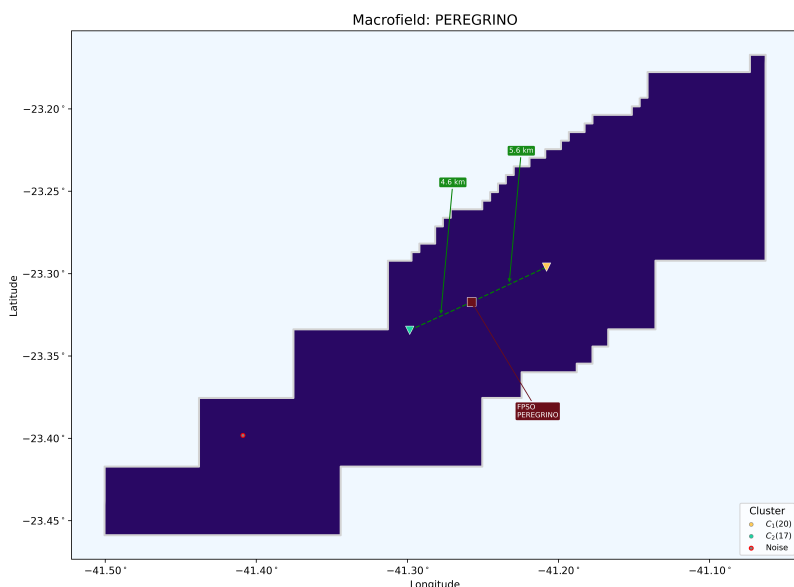


Figura 26 – Arquitetura *offshore* para o macrocampo Peregrino na Bacia de Campos

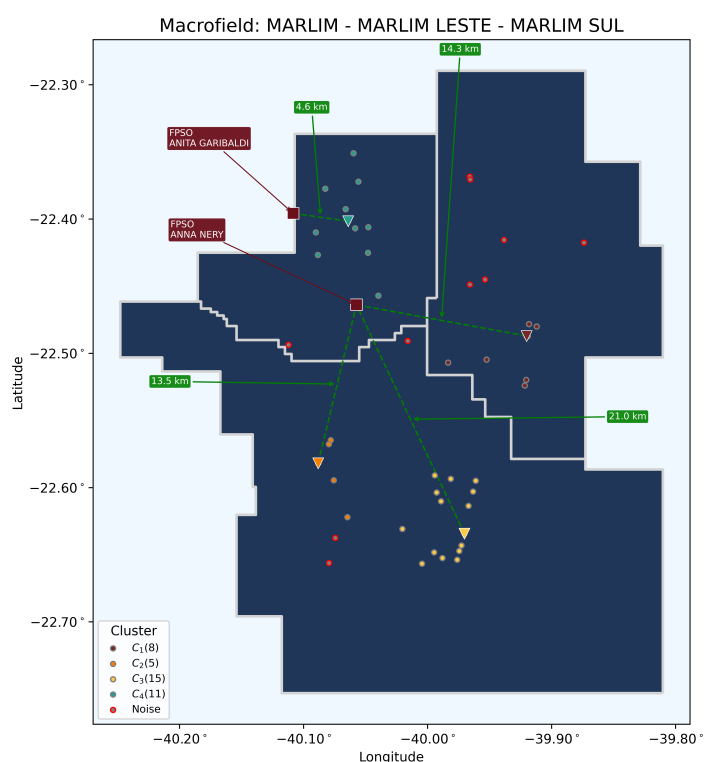


Figura 27 – Arquitetura *offshore* para os macrocampos Marlim, Marlim Leste e Marlim Sul na Bacia de Campos

Por outro lado, a situação observada na Bacia de Santos revelou desafios significativos. Nenhum dos macrocampos analisados —Búzios – Mero e Tupi – Sapinhoá - apresentou FPSOs dentro da faixa de viabilidade de 20 km, mesmo após múltiplas simulações. Embora a FPSO Peregrino seja a mais próxima dessas regiões, sua distância ainda ultrapassa o limite operacional considerado, inviabilizando sua designação como hub para os clusters identificados. Esse

resultado evidencia a necessidade de uma abordagem diferenciada para essas áreas, que podem demandar a instalação de novas unidades dedicadas ao armazenamento ou a reconfiguração de FPSOs existentes, com adaptação de layout e reposicionamento estratégico.

As Figuras 28, 29, 30 e 31 apresentam visualmente essa condição, trazendo tanto versões com anotações de distância quanto diagramas sem rotulagem para melhor visualização espacial.

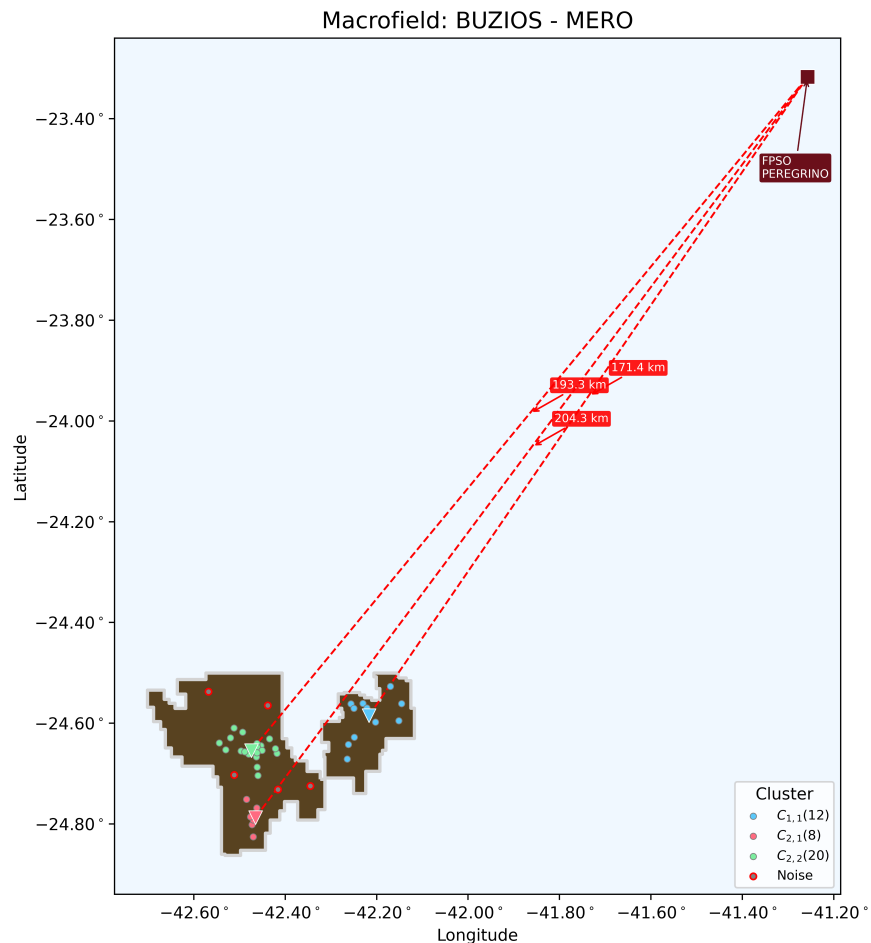


Figura 28 – Macrocampo de Búzios e Mero (com distâncias)

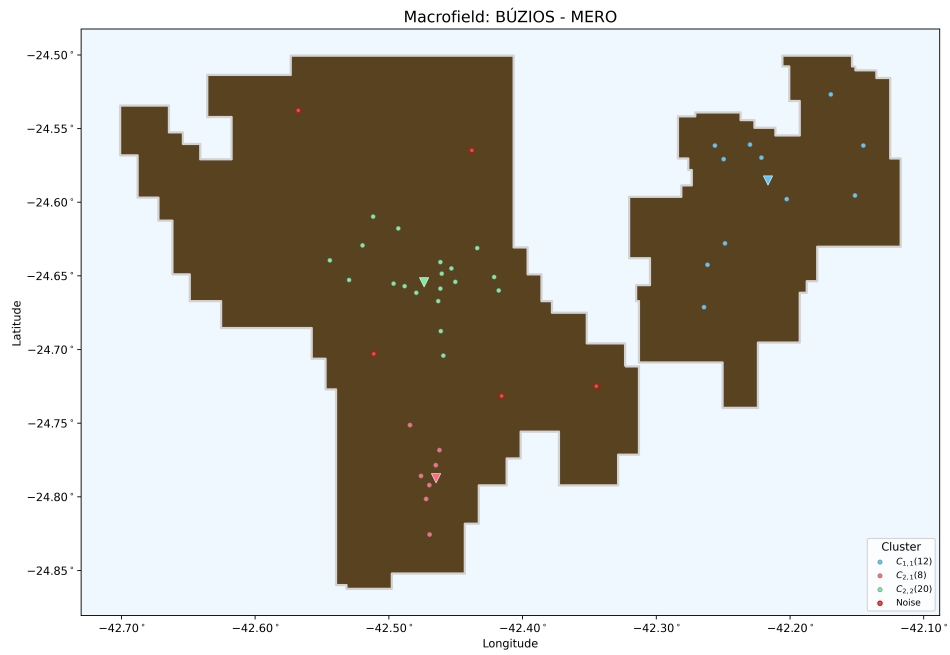


Figura 29 – Macrocampo de Búzios e Mero (sem distâncias)

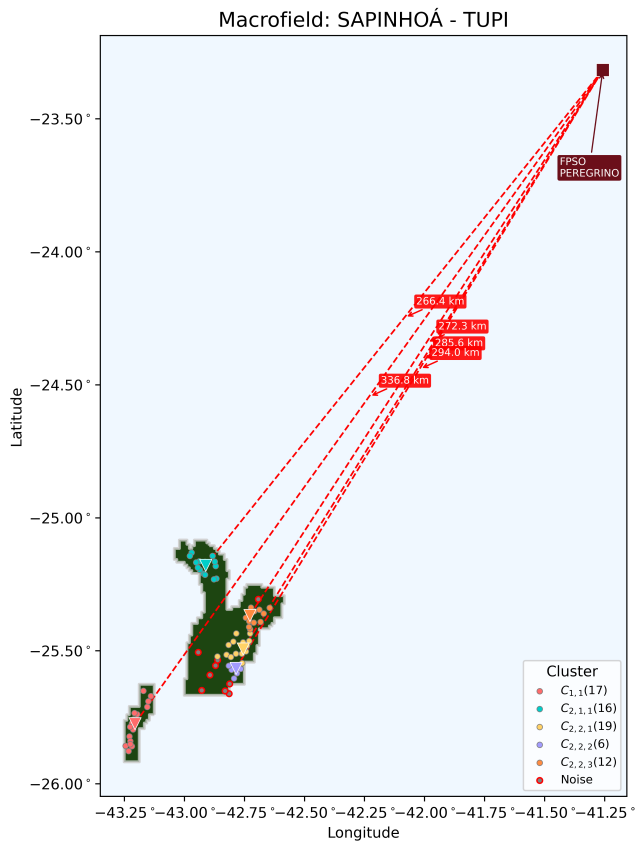


Figura 30 – Macrocampo de Sapinhoá e Tupi (com distâncias)

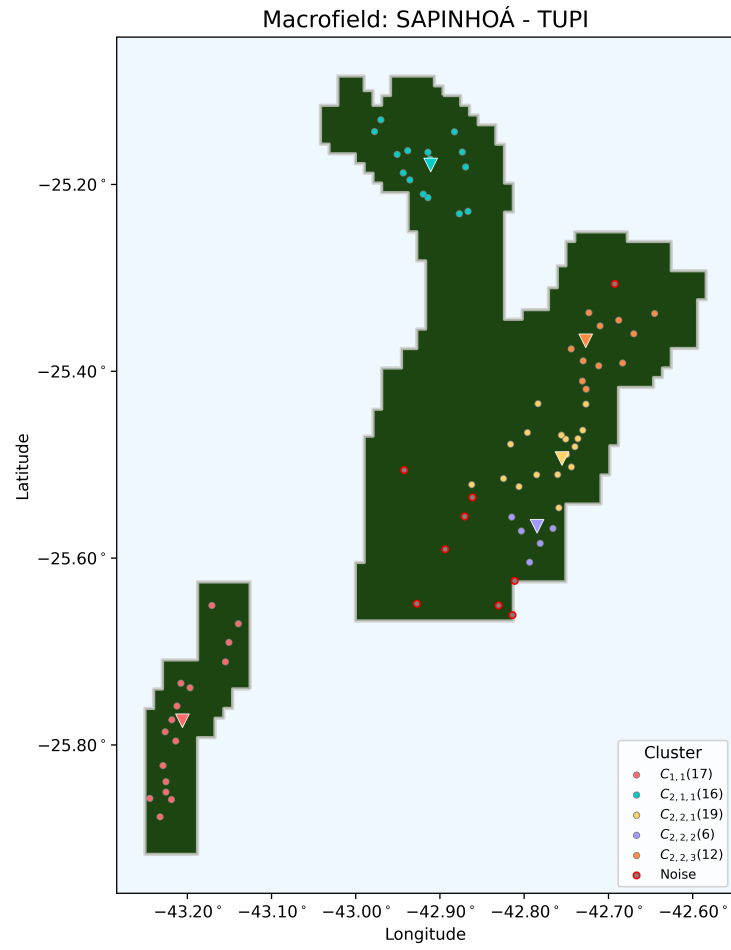


Figura 31 – Macrocampo de Sapinhóia e Tupi (sem distâncias)

5 CONCLUSÃO

Este estudo propôs uma metodologia de triagem técnico-territorial para identificar redes potenciais de CCS no Brasil, com ênfase nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo. A abordagem adotada integrou diferentes dimensões (fontes industriais de emissão, infraestrutura logística e áreas com aptidão geológica para armazenamento) com o objetivo de estruturar arranjos territoriais capazes de conectar emissores relevantes a sumidouros viáveis de CO₂. A partir da combinação entre bases de dados públicas, técnicas computacionais e princípios de engenharia territorial, a pesquisa fornece uma contribuição conceitual robusta para o delineamento de cenários iniciais de implantação da cadeia de CCS no contexto brasileiro.

Ainda assim, os resultados apresentados estão fundamentados em um conjunto significativo de hipóteses. Embora os dados utilizados sejam realistas dentro de suas limitações de abrangência, qualidade e disponibilidade, diversas premissas foram necessárias para modelar o reaproveitamento de ativos existentes da indústria de óleo e gás para fins de abatimento de emissões. A principal dessas premissas diz respeito à possibilidade de reconversão de poços offshore inativos e à utilização de FPSOs como hubs de injeção de CO₂, algo que ainda carece de validação prática no cenário nacional. Apesar dessas incertezas, o estudo oferece um arcabouço metodológico replicável e adaptável, que poderá ser progressivamente refinado conforme avançam os marcos regulatórios, a maturação tecnológica e o acesso a dados mais completos.

As limitações associadas à qualidade e cobertura dos dados utilizados representaram um desafio adicional. Apesar dos esforços para selecionar fontes emissoras de alta intensidade com base em critérios estruturais e econômicos, nem todos os emissores foram contemplados nas análises devido a restrições algorítmicas e lacunas nos registros públicos. O GHG Protocol, principal referência em inventários corporativos de emissões na América Latina, ainda enfrenta fragilidades em termos de completude, rastreabilidade, granularidade e consistência histórica. Embora algumas empresas já detenham capacidade técnica e financeira para liderar iniciativas de CCS, a carência de informações detalhadas sobre a infraestrutura operacional das unidades industriais e sua integração com ativos logísticos compromete a identificação precisa de hubs de captura e seus possíveis pontos de conexão com a malha de transporte.

No que se refere à infraestrutura, observa-se que o Brasil ainda não dispõe de sistemas específicos para o transporte de CO₂. A atual rede dutoviária, com extensão inferior a 6.000 km, é majoritariamente voltada ao escoamento de petróleo e derivados. Embora existam planos bem definidos para a expansão da malha dedicada ao transporte de gás natural, biometano e hidrogênio, não há, até o momento, diretrizes públicas voltadas à criação de corredores de carbono. Nesse contexto, os terminais portuários, FPSOs e demais instalações utilizados como referência neste estudo devem ser interpretados como marcos teóricos para simulação territorial,

e não como elementos de infraestrutura imediatamente operacionais. O mesmo se aplica aos clusters de armazenamento offshore, cujas delimitações são aproximações espaciais construídas com base na elegibilidade de poços e na geometria dos macrocampos, mas que dependem de conhecimento detalhado sobre arranjos de linhas de fluxo, sistemas de injeção e condições geológicas *in situ*.

Os resultados revelam cenários contrastantes entre os dois estados analisados. Em São Paulo, a elevada concentração de emissores industriais e a complexa estrutura logística indicam elevado potencial para a formação de hubs de captura. No entanto, a grande distância até os potenciais pontos de injeção na Bacia de Santos compromete, em grande medida, a viabilidade técnica e econômica da cadeia completa. Alternativas como a implantação de estações de armazenamento temporário ou transporte por modal rodoviário até a costa exigiriam investimentos significativos e ampla articulação entre setores público e privado. Já no caso do Rio de Janeiro, sobretudo na região norte do estado, a proximidade com a Bacia de Campos e a presença consolidada da infraestrutura de óleo e gás oferecem condições mais favoráveis à formação de redes CCS operacionais, embora ainda existam desafios logísticos e incertezas associadas à integração entre emissores e unidades de armazenamento.

Apesar das incertezas quanto à sua viabilidade plena no curto prazo, os modelos baseados em hubs e clusters se apresentam como alternativas promissoras para a descarbonização de setores industriais intensivos em emissões. Ao facilitar a concentração de fluxos de CO₂ e otimizar a conexão entre fontes e sumidouros, esses arranjos oferecem maior eficiência logística e operacional. A recente retomada das discussões sobre CCS no país, evidenciada por iniciativas acadêmicas, esforços regulatórios e o surgimento de bases de dados públicas, ainda não se traduziu em políticas concretas ou investimentos estruturantes. Faltam definições claras sobre diretrizes regulatórias, incentivos econômicos e modelos de negócio viáveis que possam sustentar financeiramente os projetos. Os resultados desta pesquisa sugerem que projetos de grande escala, envolvendo transporte de longa distância e armazenamento offshore, são improváveis de se concretizarem sem a criação de infraestrutura dedicada para a movimentação do CO₂, além de maior articulação entre os diversos agentes envolvidos.

Ainda assim, a metodologia desenvolvida neste trabalho pode ser replicada em outras regiões do país, contribuindo para o mapeamento de novas oportunidades e o aprofundamento do debate técnico sobre as possibilidades de desenvolvimento da cadeia de CCS no Brasil. Estados como Bahia, Pernambuco e Rio Grande do Sul, já apontados pela literatura como promissores, podem se beneficiar da aplicação deste modelo para análise de viabilidade. A replicação nacional da abordagem poderá fomentar ganhos de escala, sinergias regionais e racionalização de investimentos, oferecendo insumos valiosos para o planejamento energético, políticas públicas e decisões empresariais.

Considerando a dimensão territorial do país e a heterogeneidade de suas estruturas produtivas, é provável que o Brasil venha a adotar modelos parciais de cadeia de CCS, baseados

em redes locais e soluções híbridas. O uso do CO₂ para fins industriais, como na recuperação avançada de petróleo, aparece como uma alternativa mais imediata e potencialmente viável. Modelos voltados exclusivamente à captura e utilização (CCU) também devem ser considerados, especialmente para grandes emissores situados longe de áreas com capacidade de armazenamento geológico. Em síntese, este trabalho reforça a percepção de que o CCS, embora ainda envolto por incertezas e desafios, representa uma ferramenta estratégica para o avanço da agenda de descarbonização no Brasil, desde que sustentado por políticas públicas eficazes, investimentos direcionados e progresso contínuo na geração e qualificação de dados.

REFERÊNCIAS

- ALLAH, F. U. M.; MARQUES, A. da S.; CARVALHO, M. Situação atual, desafios e perspectivas futuras da captura e armazenamento de carbono (cac) em usinas termelétricas no brasil. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 136, p. 104198, July 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104198>>. Citado na página 21.
- AMINU, D. M.; NABAVI, S. A.; ROCHELLE, C. A.; MANOVIC, M. A review of developments in carbon dioxide storage. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, p. 1389–1419, 2017. Citado nas páginas 18, 24 e 25.
- ANP. **Resolution N° 699/2017**. 2017. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-699-2017>>. Citado na página 38.
- _____. **Resolution N° 817/2020**. 2020. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-817-2020>>. Citado na página 38.
- ANP. **Relatório sobre a implementação do marco regulatório de CCUS no país**. 2024. Acesso em: 28 maio 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/relatorioccusstm24.04.09.pdf>. Citado na página 26.
- ANP. **Relatório sobre a implementação do marco regulatório de CCUS no país - Atualização 2025**. [S.l.], 2025. Citado na página 33.
- BACHU, S. Sequestration of co₂ in geological media: Criteria and approach for site selection in response to climate change. **Energy Conversion and Management**, v. 41, n. 9, p. 953–970, 2000. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890499001491>>. Citado na página 25.
- BACHU, S.; BONIJOLY, D.; BRADSHAW, J.; BURRUSS, R.; HOLLOWAY, S.; CHRISTENSEN, N. P.; MATHIASSEN, O. M. Co₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. **International journal of greenhouse gas control**, Elsevier, v. 1, n. 4, p. 430–443, 2007. Citado na página 16.
- BEAUBOUF, B. Ccs offering new opportunities for drilling contractors, service firms. **Offshore Magazine**, fev. 2024. Accessed: 2025-05-29. Disponível em: <<https://www.offshore-mag.com/drilling-completion/article/14303719/ccs-offering-new-opportunities-for-drilling-contractors-service-firms>>. Citado na página 39.
- BOUCKAERT, S. *et al.* **Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector**. [S.l.], 2021. Citado na página 19.
- BRASIL. **Lei nº 15.042/2024: Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE)**. 2024. <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L15042.htm>. Acesso em: dia mês ano. Citado na página 24.
- Brazil. **Intended Nationally Determined Contribution**. 2015. Citado na página 48.
- BRAZIL. **Sistema de Registro Nacional de Emissões**. 2017. <<http://sirene.mctic.gov.br>>. Accessed: 2025-05-29. Citado na página 58.

_____. **Bill of Law N° 1425/2022. Brazilian Congress.** 2022. Citado na página 33.

_____. **Federal Law N° 14993/2024. Brazilian Congress.** 2024. Citado na página 33.

BRINCKERHOFF, P. *et al.* **Accelerating the Uptake of CCS: Industrial Use of Captured Carbon Dioxide.** [S.l.], 2011. v. 260. Citado na página 20.

BRUCE, P.; BRUCE, A.; GEDECK, P. **Practical Statistics for Data Scientists: 50+ Essential Concepts Using R and Python.** Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2017. ISBN 9781491952962. Citado na página 50.

CALLAS, C.; SALTZER, S. D.; DAVIS, J. S.; HASHEMI, S. S.; KOVSCEK, A. R.; OKOROFOR, E. R.; WEN, G.; ZOBACK, M. D.; BENSON, S. M. Criteria and workflow for selecting depleted hydrocarbon reservoirs for carbon storage. **Applied Energy**, v. 324, p. 119668, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119668>>. Citado nas páginas 20 e 26.

CCSBR. **1º Relatório Anual de CCS no Brasil.** 2023. Acesso em: 28 maio 2025. Disponível em: <https://www.ccsbr.com.br/_files/ugd/11a7f0_f79d8b3570e04429974fa4a67d444881.pdf>. Citado na página 26.

CIOTTA, M. *et al.* CO₂ storage potential of offshore oil and gas fields in brazil. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Elsevier Ltd, v. 112, 2021. ISSN 1750-5836. Citado nas páginas 22, 23, 25, 26 e 48.

CNI. **Oportunidades e riscos da descarbonização da indústria brasileira: roteiro para uma estratégia nacional.** [S.l.], 2023. Citado na página 33.

CO₂, R. **ERA-NET ACT: Re-using EXisting Wells for CO₂ Storage Operations (REX CO₂).** 2022. Available online. Accessed: 2025-05-29. Citado na página 39.

CÂMARA, G. A. B.; ANDRADE, J. C. S.; ROCHA, P. S. Tecnologia de armazenamento geológico de dióxido de carbono: Panorama mundial e situação brasileira. **Sistemas & Gestão**, v. 6, n. 3, p. 238–253, 2011. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/272688743>>. Citado na página 25.

DMP/WA. **South West CO₂ Geosequestration Hub Project Activity and Progress Report.** [S.l.], 2013. Citado na página 30.

DREXLER, S. *et al.* Impact of rock aging time on the initial wettability of minerals and analogue rocks using pre-salt fluids under reservoir conditions. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. **Offshore Technology Conference Brasil 2019 (OTCB 2019).** [S.l.], 2020. Citado na página 25.

ENGELBURG, B. van. **Rotterdam CCS Network Project - Case Study on Lessons Learnt.** [S.l.], 2011. Citado na página 30.

EPE. **Zoneamento Nacional de Recursos de Óleo e Gás (Portuguese only).** [S.l.], 2007. Citado na página 49.

_____. **Zoneamento Nacional de Recursos de Óleo e Gás (Portuguese only).** [S.l.], 2023. Citado na página 49.

_____. **Carbon capture, utilization, and storage in Brazil - Contributions to site screening and selection.** [S.l.], 2024. Citado na página 49.

ESTER, M.; KRIEGEL, H.-P.; SANDER, J.; XU, X. *et al.* A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: **kdd**. [S.l.: s.n.], 1996. v. 96, n. 34, p. 226–231. Citado na página 52.

EVERAARS, R. **The Rotterdam Climate Initiative: Carbon, Capture & Solved?** Dissertação (Master's thesis) — Erasmus University Rotterdam, 2012. Citado na página 30.

GCCSI. **The Global Status of CCS. Special Report: Understanding Industrial CCS Hubs and Clusters**. [S.l.], 2016. Citado nas páginas 15, 27, 29 e 31.

GCCSI. **Global Status of CCS 2022**. [S.l.], 2022. Citado na página 16.

GCCSI. **Global Status of CCS 2022**. 2022. <<https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/10/Global-Status-of-CCS-2022-Report-Final-compressed.pdf>>. Acesso em: 28 maio 2025. Citado na página 26.

GCCSI. **2023 Thought Leadership: CCS in Europe Regional Overview**. [S.l.], 2023. Citado na página 32.

GCCSI. **Global Status of CCS 2023**. 2023. <<https://status23.globalccsinstitute.com/>>. Acesso em: 28 maio 2025. Citado na página 26.

GCCSI. **Business Models for CCS Hubs - Challenges and Opportunities with a Focus on MENA**. [S.l.], 2024. Citado nas páginas 15 e 21.

_____. **CCUS in the Indian Cement Industry: A Review of CO₂ Hubs and Storage Facilities**. [S.l.], 2024. Citado na página 32.

_____. **Global Status of CCS 2024: Collaborating for a Net-Zero Future**. [S.l.], 2024. Citado nas páginas 23 e 32.

GOULART, M. B. R.; DA, P. V. M. C.; DA, A. M. C.; MIRANDA, A. C. O.; MENDES, A. B.; EBECKEN, N. F. F.; MENEGHINI, J. R.; NISHIMOTO, K.; ASSI, G. R. S. Technology readiness assessment of ultra-deep salt caverns for carbon capture and storage in brazil. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 99, 2020. Citado nas páginas 22, 26 e 48.

GOVSP. **Plano de Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo: 2022-2040 (Portuguese only)**. [S.l.], 2024. Citado na página 64.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction**. 2. ed. New York, NY, USA: Springer, 2017. ISBN 978-0-387-84858-7. Disponível em: <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-84858-7>>. Citado na página 51.

IBP. **Relatório de Atividades 2024**. [S.l.], 2024. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2025/03/relatorio-de-atividades-ibp-2024-26-03-2025-2.pdf>>. Citado nas páginas 20 e 26.

ICCBR. **Opportunities for Brazil in Carbon Markets**. [S.l.], 2023. Citado na página 33.

IEA. **20 Years of Carbon Capture and Storage: Accelerating Future Deployment**. [S.l.], 2016. Citado na página 20.

_____. **CCUS in Clean Energy Transitions**. Paris, France, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>>. Citado nas páginas 18 e 58.

_____. **Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector**. Paris, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>>. Citado na página 20.

IEA. **CCUS Policies and Business Models - Building a Commercial Market**. [S.l.], 2023. Citado nas páginas 15, 21 e 71.

_____. **Net Zero Roadmap - Update 2023**. [S.l.], 2023. Citado na página 31.

IGLESIAS, R. S. *et al.* Carbon capture and geological storage in brazil: An overview. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, v. 5, n. 2, p. 119–130, 2015. ISSN 2152-3878. Citado nas páginas 22 e 23.

IPCC. **Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**. [S.l.], 2005. Citations on pages 25, 29, and 38. Citado nas páginas 20, 24 e 25.

_____. **Global Warming of 1.5°C**. [S.l.], 2018. Citado na página 19.

KETZER, J. *et al.* **Brazilian Atlas of CO₂ Capture and Geological Storage**. [S.l.]: EDIPUCRS, 2015. Citado nas páginas 22, 23, 26, 47, 48 e 49.

LIU, M.; ZHANG, Y.; LIANG, X. Assessing the cost reduction potential of ccus cluster projects in china: A case study. **Energy Policy**, v. 172, p. 113123, 2023. Acesso em: 28 maio 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113123>>. Citado na página 36.

LOTHE, A. E.; GRAVAUD, I.; RINGSTAD, C.; SILVA, E. F. da; SKAGESTAD, R.; SHOGENOVA, A.; SHOGENOV, K.; SOUSA, L. H. C.; WOJCICKI, A.; SINAYUC, C. *et al.* A framework for regional high-level technical screening of promising ccus value chains. In: **17th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-17**. [S.l.: s.n.], 2024. Citado na página 15.

LUO, J. *et al.* Advances in subsea carbon dioxide utilization and storage. **Energy Reviews**, Elsevier, p. 100016, 2023. Citado na página 24.

LUXEN, D.; VETTER, C. Real-time routing with openstreetmap data. In: **Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems**. New York, NY, USA: ACM, 2011. (GIS '11), p. 513–516. ISBN 978-1-4503-1031-4. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2093973.2094062>>. Citado na página 53.

MCTI/BRAZIL. **Fourth National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. [S.l.], 2021. Citado na página 58.

MECKEL, T.; BUMP, A.; HOVORKA, S.; TREVINO, R. Carbon capture, utilization, and storage hub development on the gulf coast. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, v. 11, n. 4, p. 619 – 632, 2021. Citado na página 31.

NETTO, A. L. A.; ALVES, V. H.; PEYERL, D.; JACOBI, P. R.; SANTOS, E. M. D. Panorama das políticas públicas e estratégias para desenvolvimento da captura e armazenamento de carbono: reflexões para o brasil. **Revista Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 10, p. e19305, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.5585/geas.v10i1.19305>>. Citado na página 26.

NUNES, R. d. C.; COSTA, H. K. d. M. Operação e fechamento de instalações de armazenamento para atividades de ccs no brasil. In: **10º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás**. [S.l.]: [s.n.], 2019. Citado na página 24.

OGCI. **The CCUS Hub - A Playbook for Regulators, Industrial Emitters and Hub Developers**. [S.l.], 2023. Citado nas páginas 15 e 21.

OGCI. **OGCI**. 2024. White paper with support from Petrobras. Disponível em: <<https://ogci.com>>. Citado nas páginas 32, 35 e 36.

_____. **Hubs in Action**. 2025. Disponível em: <<https://ccushub.ogci.com/hubs-in-action/>>. Citado na página 15.

OH, S.; AL-JUAIED, M. Decarbonizing industrial hubs and clusters: Towards an integrated framework of green industrial policies. **Energy Research & Social Science**, v. 118, p. 103777, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103777>>. Citado na página 18.

Oil and Gas Climate Initiative (OGCI). **Scaling Up Action: Aiming for Net Zero Emissions**. 2019. Acesso em: 28 maio 2025. Disponível em: <<https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2023/04/OGCI-Annual-Report-2019.pdf>>. Citado na página 36.

OLIVEIRA, G.; ROQUE, W. L.; ARAÚJO, E. A.; DINIZ, A. A. R.; SIMÕES, T. A.; SANTOS, M. D. Competitive placement of oil perforation zones in hydraulic flow units from centrality measures. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Elsevier B.V., v. 147, p. 282–291, 2016. ISSN 0920-4105. Citado na página 55.

OLIVEIRA, G. C.; ROQUE, W. L.; SANTOS, M. D.; MAGALHÃES, R. M. Grafos conexos e centralidade de intermediação: Uma aplicação à modelagem de poços multilaterais em reservatórios petrolíferos. **Comunicações em Informática**, v. 2, p. 1–4, 2018. Citado nas páginas 53 e 55.

PALTSEV, S.; MORRIS, J.; KHESHGI, H.; HERZOG, H. Hard-to-abate sectors: The role of industrial carbon capture and storage (ccs) in emission mitigation. **Applied Energy**, Elsevier, v. 300, p. 117322, 2021. Citado na página 58.

PUC. **Plataforma GIS para Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) no Brasil**. 2024. <<https://www.puc-rio.br/ccus-gis-platform>>. Citado na página 22.

RODRIGUES, H. W. *et al.* Multi-objective optimization of co₂ recycling operations for ccus in pre-salt carbonate reservoirs. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Elsevier Ltd, v. 119, 2022. ISSN 1750-5836. Citado na página 25.

ROSE, S. K.; AL. *et.* The paris agreement and next steps in limiting global warming. **Climatic Change**, Springer, v. 142, n. 1-2, p. 255–270, 2017. Citado na página 18.

ROWAIHY, F.; HAMIEH, A.; ODEH, N.; HEJAZI, M.; AL-JUAIED, M.; AFIFI, A. M.; HOTEIT, H. Decarbonizing saudi arabia energy and industrial sectors: Assessment of carbon capture cost. **Carbon Capture Science and Technology**, v. 14, 2025. Citado na página 32.

SECHI, S.; GIAROLA, S.; LEONE, P. Taxonomy for industrial cluster decarbonization: An analysis for the italian hard-to-abate industry. **Energies**, MDPI, v. 15, n. 22, p. 8586, 2022. Citado na página 58.

SHOGENOVA, A.; SHOGENOV, K.; SLIAUPA, S.; SLIAUPIENE, R. The role of ccus clusters and hubs in reaching carbon neutrality: Case study from the baltic sea region. **Chemical Engineering Transactions**, v. 105, p. 169 – 174, 2023. Citado na página 32.

SILVA, F. T. da; CARVALHO, F. M.; JR, J. L. G. C.; MERSCHMANN, P. R. d. C.; TAGOMORI, I. S.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Co2 capture in ethanol distilleries in brazil: Designing the optimum carbon transportation network by integrating hubs, pipelines and trucks. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Elsevier, v. 71, p. 168–183, 2018. Citado na página 33.

SILVA, I. M. M.; WEBER, N. **1st Annual CCS Report in Brazil 2022/2023**. [S.l.], 2023. Citado na página 26.

SILVA, J.; SANTOS, M.; OLIVEIRA, G. Generalized functionals for qualification of geological carbon storage injection sites. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Elsevier, v. 135, p. 104167, 2024. Citado na página 16.

S&P Global. **Annual Report 2023**. 2023. Acesso em: 28 maio 2025. Disponível em: <<https://www.spglobal.com/en/annual-reports/2023/spgi-annual-report-2023.pdf>>. Citado nas páginas 32 e 34.

STALKER, L.; GENT, D. V. South west hub ccs project in western australia - characterisation of a greenfield site. **Energy Procedia**, v. 63, p. 5041 – 5050, 2014. Citado na página 30.

STOCKER, T. **Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2014. Citado na página 18.

SUN, X.; ALCALDE, J.; BAKHTBIDAR, M.; ELÍO, J.; VILARRASA, V.; CANAL, J.; BALLESTEROS, J.; HEINEMANN, N.; HASZELDINE, S.; CAVANAGH, A.; VEGA-MAZA, D.; RUBIERA, F.; MARTÍNEZ-ORIO, R.; JOHNSON, G.; CARBONELL, R.; MARZAN, I.; TRAVÉ, A.; GOMEZ-RIVAS, E. Hubs and clusters approach to unlock the development of carbon capture and storage – case study in spain. **Applied Energy**, v. 300, p. 117418, 2021. Acesso em: 28 maio 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117418>>. Citado nas páginas 27, 32 e 33.

TAN, Y.; NOOKUEA, W.; LI, H.; THORIN, E.; YAN, J. Property impacts on carbon capture and storage (ccs) processes: A review. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, p. 204–222, 2016. Citado nas páginas 18 e 20.

TAVARES, J. C. Regional planning in the state of são paulo: Hubs, axes and the region of the production vectors. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, SciELO Brasil, v. 20, n. 02, p. 344–367, 2018. Citado na página 64.

UK. **Specific environmental risks from repurposing oil and gas wells**. [S.l.], 2022. Citado na página 39.

UN. **Climate Action Now: Summary for Policymakers**. [S.l.], 2015. Citado na página 15.

UNFCCC. **Climate Action Now: Summary for policymakers**. [S.l.], 2015. Citado na página 21.

VIRTANEN, P.; GOMMERS, R.; OLIPHANT, T. E.; HABERLAND, M.; REDDY, T.; COURNAPEAU, D.; BUROVSKI, E.; PETERSON, P.; WECKESSER, W.; BRIGHT, J.; van der Walt, S. J.; BRETT, M.; WILSON, J.; MILLMAN, K. J.; MAYOROV, N.; NELSON, A. R. J.; JONES, E.; KERN, R.; LARSON, E.; CAREY, C. J.; POLAT, İ.; FENG, Y.; MOORE, E. W.; VanderPlas, J.; LAXALDE, D.; PERKTOLD, J.; CIMRMAN, R.; HENRIKSEN, I.; QUINTERO, E. A.; HARRIS, C. R.; ARCHIBALD, A. M.; RIBEIRO, A. H.; PEDREGOSA, F.; van Mulbregt, P;

SciPy 1.0 Contributors. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. **Nature Methods**, v. 17, p. 261–272, 2020. Citado na página 52.

WANG, R. Status and perspectives on ccus clusters and hubs. **Unconventional Resources**, v. 4, p. 100065, 2024. Acesso em: 28 maio 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.uncres.2023.100065>>. Citado nas páginas 27 e 32.

WENDT, A.; SHERIFF, A.; SHIH, C. Y.; VIKARA, D.; GRANT, T. A multi-criteria ccus screening evaluation of the gulf of mexico, usa. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 118, 2022. Citado na página 31.

YANG, B. *et al.* Advances in carbon dioxide storage projects: Assessment and perspectives. **Energy & Fuels**, ACS Publications, v. 37, n. 3, p. 1757–1776, 2023. Citado nas páginas 18, 20 e 26.

YANG, H.; XU, Z.; FAN, M.; GUPTA, R.; SLIMANE, R. B.; BLAND, A. E.; WRIGHT, I. Progress in carbon dioxide separation and capture: A review. **Journal of Environmental Sciences**, Elsevier, v. 20, n. 1, p. 14–27, 2008. Citado na página 25.

ZHAO, Y. H.; SHAKOURIFAR, N.; SHAHSAVAR, N.; LEI, Y.; ZHAO, B. A holistic framework for evaluating gigaton scale geological co2 storage applied to the alberta oil sands: Physics, policy, and economics. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 134, 2024. Citado na página 31.

ZHOU, Y. Worldwide carbon neutrality transition? energy efficiency, renewable, carbon trading and advanced energy policies. **Energy Reviews**, 2023. Citado na página 18.

ZOBACH, M.; SMIT, D. Meeting the challenges of large-scale carbon storage and hydrogen production. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 120, n. 11, p. e2202397120, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1073/pnas.2202397120>>. Citado na página 26.

APÊNDICE A - CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

Abaixo estão listadas as publicações produzidas durante o período de mestrado.

1. ALMEIDA, B. R.; AMORIM, D. N.; TRAJANO, A. F.; OLIVEIRA, G. P. Geospatial Data Analysis and Onshore Well Infrastructure Opportunity Quantification for CCS Clusters in Brazil. In: ENCONTRO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL E OTIMIZAÇÃO EM PROBLEMAS DA ENGENHARIA – MECOMPE, Recife, 2023.
2. ALMEIDA, B. R.; TRAJANO, A. F.; AVELINO, E. L. ; AMORIM, D. N.; JUSTINO, T. R. C.; OLIVEIRA, G. P. Métricas de oportunidade para reaproveitamento de poços como estratégia de abatimento de CO₂ proveniente de clusters e hubs industriais de CCUS. In: 12 CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS – PDPETRO, Balneário Camboriú, 2024.
3. JUSTINO, T. R. C.; ALMEIDA, B. R.; SANTOS, C. A. S.; SOUZA, J. C.; OLIVEIRA, G. P. Desafios de clusterização de dados geoespaciais para a formação de redes industriais de CCUS. In: ENCONTRO REGIONAL DE COMPUTAÇÃO – ERAD, Natal, 2025.
4. ALMEIDA, B. R.; JUSTINO, T. R. C.; SANTOS, C. A. S.; OLIVEIRA, G. P.; SANTOS, A. A. Geospatial data analysis for source-to-sink hub modeling of high-prospectivity CCUS industrial clusters in Brazil. In: AAPG INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION (ICE), Rio de Janeiro, 2025. (Aceito para publicação)

APÊNDICE B - MATRIZ DE DISTÂNCIAS

O mapa de calor da matriz de distâncias apresenta todas as relações analisadas, incluindo aquelas que foram posteriormente descartadas no processo de seleção.

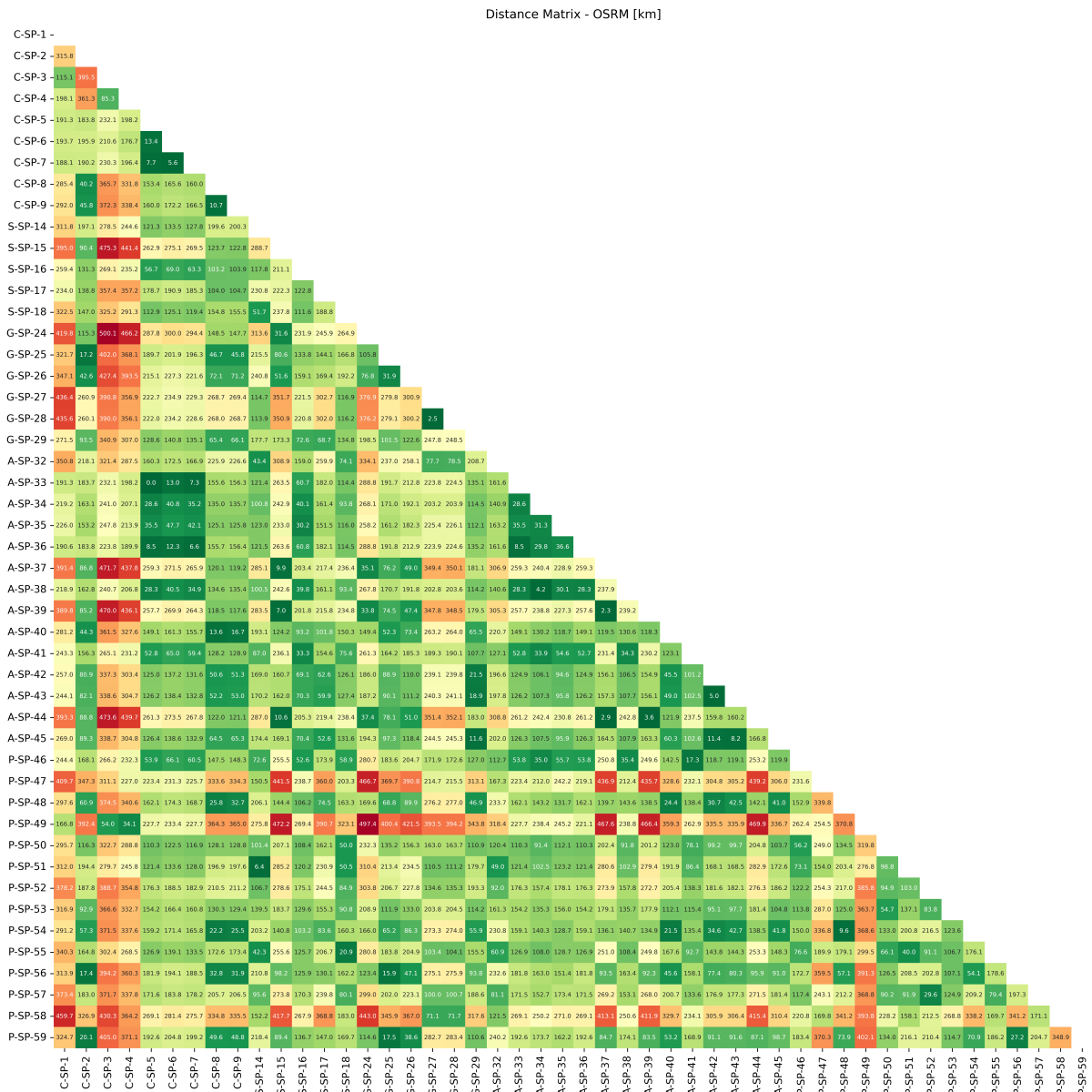


Figura 32 – Matriz de distâncias entre fontes emissoras em km calculadas através da ferramenta OSRM