Revista Tecnologia e Sociedade
ISSN: 1984-3526

https://periodicos.utfpr.edu.br/rts

Captura e armazenamento de carbono: análise do marco regulatório brasileiro.

Felipe Gobi Tonissi
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil
gobetonissi@gmail.com

Felipe Berkenbrock
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil
felipe_berkenbrock@hotmail.com

Robert Marcelo Soster Culpi
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil
culpirobert@ufpr.br

Luciano Batista da Silva
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil
lucianobatista@ufpr.br

Thiago Henrique Moreira Goes
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil
thiagogoes@ufpr.br

RESUMO

A mitigação das mudanças climáticas impulsiona tecnologias como a captura e armazenamento de carbono (CCS), essenciais para setores de difícil descarbonização, como cimento e aço. Este artigo analisa o Projeto de Lei 1425/2022, que propõe um marco regulatório para CCS no Brasil, abrangendo armazenamento geológico, segurança ambiental e governança. Utilizando técnicas de Processamento de Linguagem Natural (PLN), como LDA e k-means, identificam-se cinco eixos temáticos principais, relacionados à gestão de armazenamento, sustentabilidade, regulação pública, inovação e governança industrial. Os achados revelam a abrangência do PL e seu potencial impacto na estruturação de políticas públicas e no fortalecimento institucional do setor, reforçando a conexão entre ciência, tecnologia e sociedade no contexto da transição energética brasileira.

PALAVRAS-CHAVE: Captura e armazenagem de carbono. Sustentabilidade. Créditos de carbono. Regulação. Mudanças climáticas.

INTRODUÇÃO

A necessidade urgente de mitigar os impactos das mudanças climáticas tem impulsionado o uso de soluções como os créditos de carbono e as tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS). A CCS permite capturar o dióxido de carbono das fontes de emissão e armazená-lo de maneira segura, enquanto os créditos de carbono oferecem incentivos econômicos para a adoção de práticas mais sustentáveis. Mesmo diante de seus benefícios, a CCS enfrenta desafios significativos em termos de custo e desempenho em escala comercial. Estudos como os de Rai, Victor e Thurber (2009) e Hu, Pan e Huang (2020) destacam que, embora a tecnologia seja promissora, a complexidade da cadeia de valor dificulta avanços tecnológicos e a adoção em larga escala. Para superar essas lacunas, é essencial uma harmonização internacional, diretrizes para reutilização de dutos e legislações de segurança. Além disso, a integração de normas operacionais e práticas recomendadas pode aprimorar os marcos regulatórios existentes (EL-KADY; AMIN; KHAN; EL-HALWAGI, 2024).

Deve-se dizer que existe a necessidade de incentivos e subsídios graduais para a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de captura de carbono, bem como a industrialização e otimização dessas tecnologias para permitir ganhos de escala (BRAZZOLA; MORETTI; SIEVERT; PATH; LILLIESTAM, 2024). Estes elementos estão fortemente relacionados com aspectos institucionais e regulatórios dos países (DJANKOV, 2009; BLIND; MUNCH, 2024). Neste sentido, no Brasil, o Projeto de Lei 1425/2022 visa estabelecer um Marco Legal para as Atividades de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), incluindo normas sobre o armazenamento no subsolo e a supervisão pela ANP.

A proposta de um marco regulatório CCS versa sobre uma tecnologia com implicações profundas sobre o futuro da transição energética, a estrutura produtiva nacional e a governança ambiental. Conforme destacam Gomes, Schiavi e Costa (2023), a adoção de tecnologias sustentáveis demanda um discurso público que legitime suas aplicações sociais e ambientais. Do mesmo modo, Christ, Chaparro, Galante e Shikida (2024) enfatizam que os impactos da regulação devem ser analisados à luz de suas consequências sobre os sistemas produtivos. Além disso, como apontam Santos, Schneider e Santoyo (2024), a adoção de novas tecnologias sustentáveis no Brasil depende da interação entre políticas públicas, acesso a recursos e a mobilização de atores sociais. Neste sentido, o CCS representa um caso emblemático da articulação entre ciência, tecnologia e sociedade.

Portanto, o objetivo desta pesquisa é realizar uma análise detalhada do texto do projeto de lei, empregando técnicas de Processamento de Linguagem Natural (PLN) para identificar, agrupar e interpretar os principais temas abordados. Essa abordagem visa fornecer uma compreensão estruturada e aprofundada dos elementos norteadores do documento legislativo.

REFERENCIAL TEÓRICO

Economias de escala no mercado de crédito de carbono

A economia de escala é o fenômeno em que os custos médios de produção diminuem à medida que a quantidade produzida aumenta. Esse conceito reflete a eficiência adquirida com a produção em larga escala, onde os custos fixos são diluídos por um maior número de unidades produzidas, resultando em uma produção mais eficiente e econômica (BESANKO; DRANOVE; SCHANLEY; SCHAEFER, 2017; PINDYCK; RUBINFELD, 2017). As economias de escala atuam como fontes de ganhos competitivos, aumento do poder de barganha e vantagens no comércio internacional (BESANKO et al. 2017). Vale notar que, em mercados regionais com custos de transporte elevados ou produtos diferenciados, a importância das economias de escala pode ser maior, tornando-as uma barreira à entrada (SPENCE, 1980; SCHMALENSEE, 1981).

No contexto do mercado de crédito de carbono, a ameaça das mudanças climáticas se tornou uma questão econômica e política significativa, com cientistas alertando para o impacto da acumulação de CO_2 e outros gases de efeito estufa. O debate sobre as mudanças climáticas data de eventos como a Cúpula da Terra de 1992 e o Protocolo de Kyoto de 1997 (BRETSCHGER, 2024; NORDHAUS, 1993). Em resposta, surgiram diversas medidas, como programas de redução de emissões, mercados de crédito de carbono e marcos regulatórios (CALEL; COLMER; DECHEZLEPRÊTRE; GLACHANT, 2021). Tais medidas podem ser fortalecidas pelas economias de escala associadas à produção em larga escala de tecnologias climáticas, como a captura e armazenamento de carbono (CCS). Além de ampliar sua viabilidade econômica, a difusão dessas soluções envolve escolhas regulatórias, institucionais e sociais (FAIRCHILD, 2020).

Como observado por Gomes et al. (2023), a adoção de tecnologias sustentáveis depende não apenas de sua eficiência técnica, mas também da construção de discursos públicos que legitimem sua implementação e ampliem a compreensão social sobre seus benefícios e riscos. El-Kady et al. (2024) argumentam que, para alcançar economias de escala e tornar a CCS mais acessível e eficiente, é essencial reduzir significativamente os custos de captura e transporte de CO_2, além de integrar de maneira segura e econômica as tecnologias em clusters industriais. Calel et al. (2021) indicam que o modelo de incentivos econômicos, como subsídios, deve ser alinhado com inovações que tenham o melhor trade-off entre geração de energia e viabilidade econômica. Além disso, a busca pela economia de escala também depende de mecanismos regulatórios eficientes, que equilibrem a redução de emissões, viabilidade dos investimentos e preços competitivos para os consumidores (BUSCHNELL; CHONG; MANSUR, 2013; CALEL et al., 2021). Por fim, inovações tecnológicas e marcos regulatórios são fundamentais para superar os obstáculos relacionados às eficiências de escala na CCS, especialmente com projetos de pesquisa e desenvolvimento contínuos.

Avanços tecnológicos e regulatórios no mercado de crédito de carbono

A captura e armazenamento de carbono (CCS) é considerada estratégica para setores de difícil descarbonização, como o de cimento e aço. No entanto, sua adoção enfrenta obstáculos como alto custo inicial, complexidade de design, integração operacional e desempenho limitado em escala comercial (Brazzola et al., 2024). Embora empregada há décadas, a CCS apresenta curva de aprendizado lenta, com estrutura de custos rígida. Comparada a tecnologias como solar e eólica, a CCS evolui mais lentamente, em razão da complexidade de suas cadeias técnicas e da interdependência entre os sistemas.

Mesmo assim, há avanços. Estudos mostram reduções graduais nos custos operacionais e no capital necessário, o que pode viabilizar economias de escala no longo prazo (Rai et al., 2009). Contudo, a estabilidade regulatória é essencial. A imprevisibilidade das políticas climáticas e os altos custos iniciais inibem investimentos (Zhang et al., 2017; Zhou & Li, 2019). A precificação eficaz do carbono e políticas de incentivo consistentes são fundamentais para destravar o potencial da CCS.

A regulação também influencia a inovação. Segundo Blind e Munch (2024), padrões internacionais promovem investimentos em P&D e patentes, enquanto regulações nacionais mais rígidas podem inibir a inovação. Já a desregulamentação aumenta o registro de patentes, mas sem necessariamente gerar valor social. A experiência europeia reforça essa lógica: Calel (2020) demonstrou que regulamentações recentes estimularam efetivamente o desenvolvimento de tecnologias limpas entre empresas britânicas.

Ainda assim, a CCS avança lentamente. Até 2019, havia apenas 19 plantas operacionais e 32 em construção no mundo (Waxman et al., 2021). Parte dessa estagnação decorre de subsídios mal calibrados e mecanismos de crédito de carbono imperfeitos (Zhang et al., 2019). Mesmo com respostas positivas aos incentivos, estes ainda são insuficientes para garantir o investimento necessário em larga escala.

Segundo Acemoglu et al. (2023), políticas eficazes devem combinar subsídios à inovação verde com metas sociais claras. Isso significa alinhar os ganhos tecnológicos a objetivos públicos, como eficiência ambiental e inclusão produtiva. No Brasil, esse debate ganha relevância. Conforme Christ et al. (2024), a consolidação de práticas sustentáveis exige mais que inovação técnica: requer governança regulatória transparente, integração de dados e adesão a padrões internacionais. A baixa adesão aos relatórios de sustentabilidade no setor sucroenergético brasileiro exemplifica os riscos de políticas mal articuladas.

Dessa forma, o avanço da CCS depende de um ecossistema regulatório e tecnológico que combine eficiência, previsibilidade e legitimidade social. Sem isso, seus benefícios permanecerão restritos a projeções, em vez de integrarem uma estratégia efetiva de mitigação climática.

METODOLOGIA

Aspectos gerais da metodologia

A análise teve como base o texto integral do PL nº 1425/2022, complementado pelos pareceres e pelo texto aprovado no Senado. Com apoio do RStudio, aplicaram-se técnicas de Processamento de Linguagem Natural (PLN), como limpeza textual, tokenização e análise de trigramas e co-ocorrências. A técnica K-means foi utilizada para agrupar os trechos em clusters temáticos, revelando a estrutura e a lógica do projeto (Silge & Robinson, 2016). A metodologia permitiu identificar cinco núcleos principais: princípios gerais, concessões, obrigações do operador, monitoramento e infraestrutura. Os achados evidenciam como o PL articula instrumentos técnicos e regulatórios com implicações institucionais e sociais. Conforme Gomes et al. (2023), a adoção de tecnologias sustentáveis requer legitimação pública, o que reforça a relevância da análise de marcos legais no contexto da transição energética.

Temas do Projeto de Lei

O Projeto de Lei nº 1425/2022 regula o armazenamento de dióxido de carbono (CO2) como estratégia de descarbonização e redução de emissões de gases de efeito estufa. A proposta abrange o armazenamento permanente em formações geológicas e o temporário para reuso ou comercialização, seguindo normas que garantem a proteção ambiental e boas práticas industriais. O texto estabelece responsabilidades aos operadores, como monitoramento contínuo, gestão de riscos e planos de contingência, além de incentivar tecnologias de captura e economia circular (BRASIL, 2022).

O Capítulo I define os tipos de armazenamento de CO2 e apresenta termos técnicos e regulatórios relacionados à segurança ambiental e à saúde. O Capítulo II destaca os objetivos da Lei, como reduzir emissões, promover tecnologias de captura e armazenamento, e incentivar seu uso em processos comerciais, com princípios de sustentabilidade, inovação e proteção ambiental.

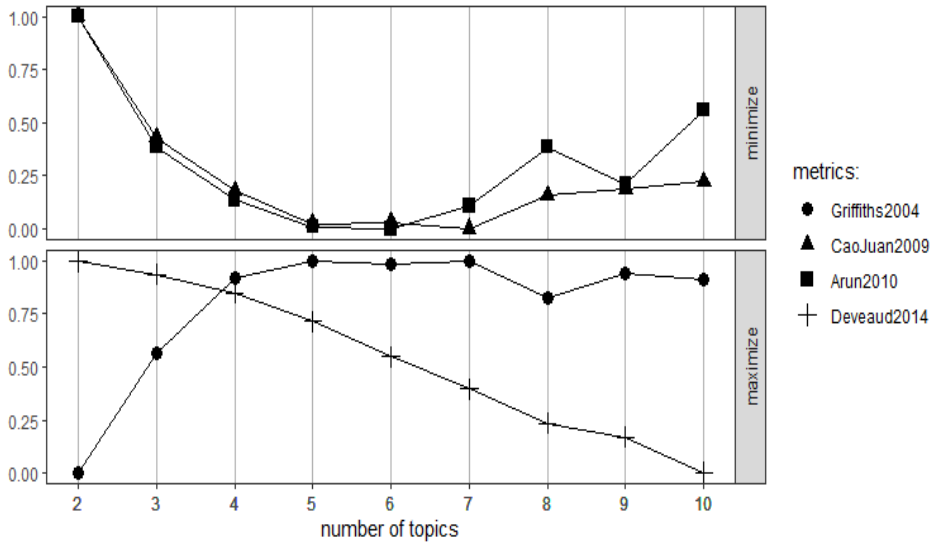
No Capítulo III, são regulamentadas as outorgas para exploração de reservatórios geológicos, com prazo inicial de 30 anos, renovável, e requisitos técnicos e de segurança. Já o Capítulo IV detalha as obrigações dos operadores, incluindo planos de monitoramento, ações rápidas em casos de falhas e manutenção de registros auditáveis.

O Capítulo V determina o monitoramento contínuo das atividades durante a operação e por até 20 anos após seu encerramento, exigindo relatórios atualizados e comunicação de irregularidades às autoridades. Por fim, o Capítulo VI responsabiliza os operadores por danos ambientais, prevendo compartilhamento de responsabilidades e enfatizando boas práticas, transparência e segurança ambiental no armazenamento e gestão do CO2.

Aspectos quantitativos

O primeiro item quantitativo utilizado consistiu na elaboração do gráfico com as métricas para determinar o número ideal de tópicos em modelos de Tópicos Latentes (LDA) (NIKITA, 2020). As métricas no painel superior (Griffiths2004, CaoJuan2009, Arun2010) devem ser minimizadas, enquanto a do painel inferior (Deveaud2014) deve ser maximizada. Um equilíbrio entre elas sugere que o número ideal de tópicos está entre 3 e 5, onde as curvas minimizam ou maximizam seus valores, dependendo da métrica. Ao considerar as quatro métricas em conjunto pode-se perceber que o número de 5 tópicos atende aos quatro de maneira satisfatória.

Gráfico 1 – Testes para quantificação de tópicos.



Fonte: elaboração própria.

Após o uso da LDA, foi realizada uma análise semântica adicional com trigramas e uma matriz de co-ocorrências. Os trigramas, que são sequências de três palavras consecutivas, foram extraídos do corpus textual para capturar relações contextuais mais complexas entre os termos. A matriz de co-ocorrências foi então construída para medir a frequência com que os termos ocorrem juntos em diferentes contextos, permitindo uma compreensão mais profunda das associações semânticas entre as palavras. Essa análise semântica ajudou a aprimorar o modelo de tópicos LDA, proporcionando uma base mais rica para a identificação de padrões temáticos (SILGE; ROBINSON, 2016).

Posteriormente, foi utilizado o algoritmo de Louvain foi aplicado para detectar comunidades em um grafo G. O resultado foi um vetor C, onde cada elemento C_i representa a comunidade atribuída ao nó i. A distribuição das comunidades detectadas pode ser descrita por uma função $f(c)$, onde $c \in \{1,2,\ldots,k\}$ e k é o número total de comunidades identificadas (BLONDEL; GUILLAUME; LAMBIOTTE; LEFEBVRE, 2008).

Para realizar uma redução do número de agrupamentos, foi escolhido o método de k-means, tendo como objetivo reduzir as comunidades detectadas inicialmente para cinco clusters (HAIR; BLACK; BABIN; ANDERSON; TATHAM, 2009). A decisão pelo número $k = 5$ foi fundamentada nos resultados obtidos

previamente por meio da análise de Tópicos Latentes (LDA), que indicou a presença de cinco tópicos principais. Essa abordagem integrou a interpretação temática dos tópicos identificados pela LDA com a estrutura comunitária do grafo, permitindo uma análise mais consistente.

O método de k-means foi aplicado ao vetor C, buscando minimizar a soma dos erros quadráticos internos de cada cluster, conforme a seguinte equação (HAIR et al., 2009):

$$Minimizar \sum_{j=1}^{k} \sum_{i \in cluster_j} \|C_i - \mu_j\|^2$$

Onde $k = 5$, μ_j representa a média dos elementos no cluster j, e C_i é a comunidade original do nó i. Como resultado, obteve-se um novo vetor $\hat{C}$, no qual cada elemento C_i corresponde ao cluster atribuído ao nó i após a redução. Os novos clusters foram atribuídos aos nós do grafo G, substituindo as comunidades detectadas inicialmente. A distribuição dos clusters resultantes foi representada por $f(\hat{c})$, com $\hat{c} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$.

O último passo consistiu em aplicar a métrica de similaridade de Jaccard para avaliar a sobreposição de termos entre os grupos identificados. A matriz de similaridade foi construída comparando os conjuntos de palavras associados a cada cluster, permitindo medir a proporção de interseção em relação à união dos elementos entre pares de clusters. Essa análise forneceu uma visão quantitativa da separação ou sobreposição entre os grupos, garantindo que a segmentação realizada seja robusta.

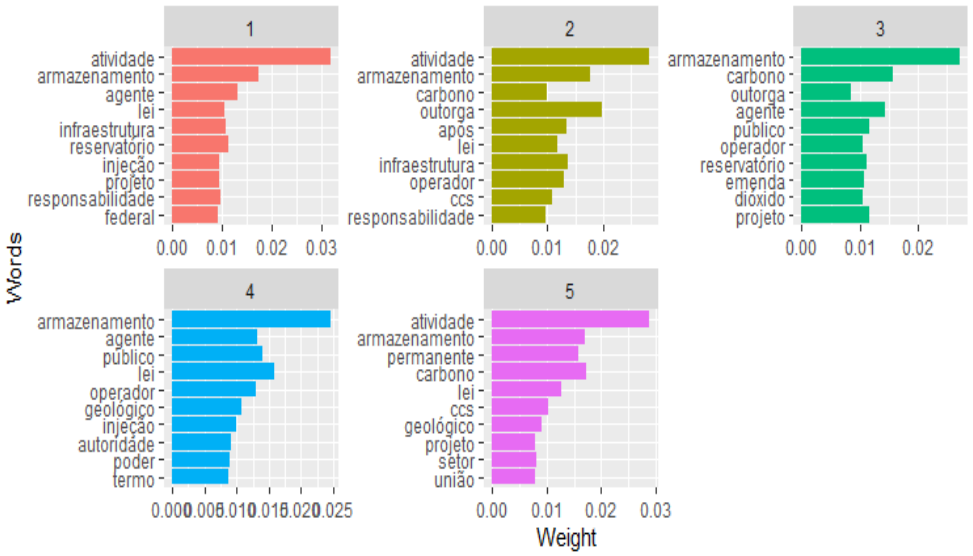
Para avaliar a significância estatística da associação entre os clusters ajustados pelo k-means e as comunidades detectadas pelo algoritmo de Louvain, foi realizado o teste exato de Fisher com simulação de Monte Carlo, utilizando 10.000 replicações. Esse método foi escolhido devido ao tamanho e à complexidade da tabela de contingência, garantindo uma estimativa robusta do valor de p, mesmo com frequências esperadas potencialmente baixas. O teste foi conduzido de forma bilateral, permitindo verificar qualquer tipo de associação entre as variáveis analisadas. O resultado obtido apresentou um valor de p significativo ($p = 9{,}999e-05$), confirmando a validade da análise de agrupamento realizada.

RESULTADOS

Principais tópicos dos textos legislativos envolvendo o Projeto de Lei

O primeiro passo consistiu no uso da LDA para identificar a quantidade de tópicos, conforme descrito pela metodologia. A partir disso, os seguintes tópicos e as respectivas palavras principais foram encontrados:

Gráfico 2 – Principais palavras por tópico



Fonte: elaboração própria.

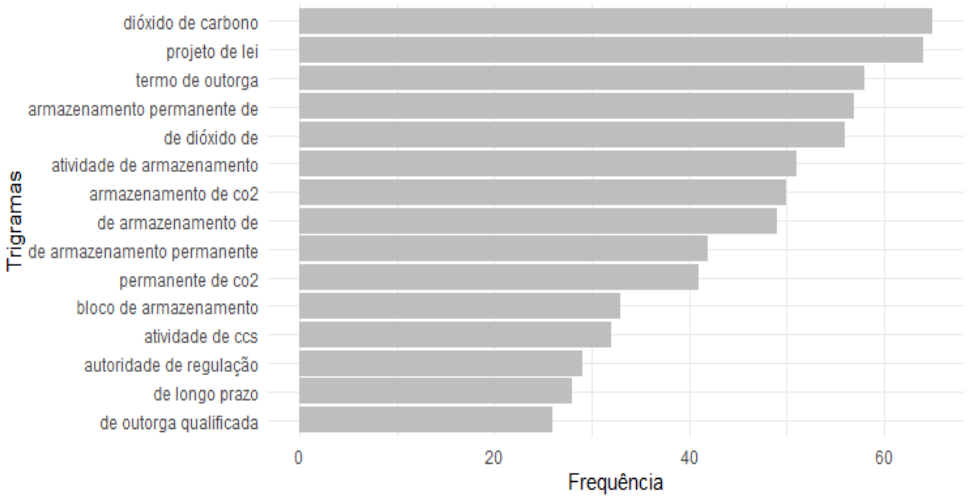
Este gráfico apresenta uma visualização de cinco tópicos extraídos de um modelo de tópicos, com as palavras mais relevantes para cada um e seus respectivos pesos. Cada painel mostra um tópico diferente, com o eixo horizontal indicando a relevância ou peso das palavras, e o eixo vertical listando as palavras mais significativas dentro de cada tópico. O Tópico 1 está relacionado à gestão ou operações legais e de armazenamento, com palavras como "atividade", "armazenamento", "agente" e "lei". O Tópico 2 trata de questões ambientais, especialmente sobre captura e armazenamento de carbono, refletido nas palavras "carbono", "armazenamento", "outorga" e "infraestrutura".

O Tópico 3 também aborda temas relacionados ao armazenamento de carbono, com palavras como "armazenamento", "carbono", "agente" e "projeto", sugerindo projetos de gestão de carbono. O Tópico 4 enfoca aspectos relacionados a regulamentações públicas e geológicos, com termos como "agente", "público", "lei" e "geológico". Por fim, o Tópico 5 está ligado a políticas de longo prazo sobre carbono e setor, com palavras como "carbono", "permanente", "projeto" e "setor". Esses tópicos refletem diferentes áreas de discussão dentro de um conjunto de documentos, e os pesos indicam a importância relativa de cada palavra dentro de seus respectivos tópicos.

Trigramas e matriz de co-ocorrências

Após a análise dos cinco tópicos, o estudo fez uso da análise de trigramas. Para tanto, o primeiro passo foi a definição de uma lista personalizada de stopwords que inclui palavras e expressões comuns que podem ser irrelevantes na análise de trigramas. Ao aplicar essa lista, trigramas que contenham qualquer uma dessas palavras ou expressões serão filtrados e removidos, permitindo uma análise mais limpa e focada em termos e relações de maior relevância contextual para o estudo. Os resultados com estão a seguir:

Gráfico 3 – Principais trigramas envolvendo o PL e seus elementos complementares



Fonte: elaboração própria.

O gráfico apresentado evidencia os principais trigramas encontrados no corpus analisado, organizados de acordo com a frequência de ocorrência. O trigrama mais frequente é "dióxido de carbono", sugerindo que o tema central do texto está relacionado a questões ambientais, especificamente envolvendo emissões de gases. Em seguida, "projeto de lei" aparece como o segundo trigrama mais recorrente, indicando que o corpus trata de legislações ou propostas legislativas, possivelmente no contexto de regulamentações ambientais.

Outros trigramas destacados, como "armazenamento permanente de", "atividade de armazenamento" e "armazenamento de CO2", reforçam que o conteúdo aborda estratégias técnicas de captura e armazenamento de carbono (*CCS – Carbon Capture and Storage*). Termos como "atividade de CCS" e "permanente de CO2" também evidenciam a preocupação com tecnologias de mitigação climática e sustentabilidade.

Além disso, trigramas como "termo de outorga", "de longo prazo" e "autoridade de regulação" sugerem que o texto aborda elementos regulatórios e administrativos, possivelmente relacionados à implementação de políticas públicas ou à concessão de permissões específicas. A expressão "de outorga qualificada" pode estar ligada a requisitos técnicos ou legais que regulam essas atividades. O foco principal dos documentos analisados parece ser o gerenciamento de emissões de carbono, envolvendo termos técnicos e discussões sobre legislações e práticas relacionadas à captura e armazenamento de carbono como estratégias para enfrentar as mudanças climáticas.

O próximo passo consiste em uma análise de uma matriz de co-ocorrências entre as três palavras que mais aparecem conectadas no texto. Diferentemente da análise de trigramas, nesta matriz foram excluídos conectores, nomes, datas e verbos que não apresentavam conexão com os demais elementos. Desta forma, as quinze principais co-ocorrências triplas estão na tabela a seguir:

Tabela 1 – Matriz de Co-ocorrências.

Palavra principal	Complemento 1	Complemento 2	N
Termo	Outorga	Qualificada	44
Armazenamento	Permanente	CO2	38
Acesso	À	Infraestrutura	30
Petróleo	Gás	Natural	27
Gestora	Ativos	Armazenamento	25
Autoridade	Regulação	Competente	23
Ativos	Armazenamento	GAA	22
Comissão	Serviços	Infraestrutura	21
Atividade	Armazenamento	Permanente	20
Permanente	Dióxido	Carbono	20
Após	Cessação	Permanente	18
Comissão	Meio	Ambiente	18
Agente	Emissor	CO2	17
Causadores	Efeito	Estufa	17
Gases	Causadores	Efeito	17

Fonte: elaboração própria.

A lista de co-ocorrências triplas converge com a análise dos trigramas e revela temas centrais e recorrentes no contexto dos textos analisados, com destaque para sustentabilidade, regulamentação e gestão de recursos ambientais. Termos como "armazenamento", "permanente" e "CO2" aparecem frequentemente, evidenciando a relevância do armazenamento permanente de dióxido de carbono em estratégias de mitigação das mudanças climáticas. A ênfase nesse triplo reforça a preocupação com práticas sustentáveis e soluções para a captura e retenção de carbono.

Outro grupo de termos recorrentes, como "termo", "outorga" e "qualificada", sugere um foco em processos legais e administrativos, relacionados à concessão de permissões ou regulamentações específicas. A presença de "autoridade", "regulação" e "competente" reforça essa ideia, apontando para a importância das questões normativas e do papel das instituições competentes nesse cenário.

No campo energético, combinações como "petróleo", "gás" e "natural" destacam o debate sobre combustíveis fósseis, enquanto outras como "gases", "causadores" e "efeito" ou "efeito", "estufa" reforçam a preocupação ambiental com as emissões de gases de efeito estufa. Esses padrões sugerem uma intersecção entre temas industriais e ambientais, que demandam soluções de regulação e inovação tecnológica.

A lista também aponta uma atenção significativa para aspectos normativos e institucionais. Expressões como "código", "conduta" e "prática" ou "plano", "monitoramento" e "contingência" indicam esforços para estabelecer normas de conduta e mecanismos de gestão preventiva, seja no âmbito ambiental ou operacional. Essa abordagem preventiva é crucial para mitigar riscos em atividades potencialmente perigosas, como o armazenamento geológico de carbono.

Outro tema emergente é a participação de diferentes atores no contexto analisado. Termos como "interesse", "público" e "reservatórios" destacam a relevância das questões ambientais para o público, enquanto expressões como "gaa", "entidade" e "privada" apontam para o envolvimento de organizações privadas no desenvolvimento ou na regulação dessas práticas. Essa interação

público-privada merece atenção, dado o impacto coletivo das decisões sobre questões ambientais e energéticas.

Por fim, a combinação "descarbonização", "setor" e "energia" reflete a prioridade dada à transição energética, enquanto "captura", "transporte" e "armazenamento" reforça a importância da cadeia de processos relacionados à redução de emissões. Esses temas indicam um alinhamento com práticas inovadoras e metas climáticas globais.

Clusters e Similaridade de Jaccard

Após o estabelecimento da matriz de co-ocorrências, o passo seguinte foi o uso da criação de comunidades a partir do algoritmo de Louvain e da minimização a partir do k-means para criação dos clusters na mesma quantidade dos tópicos encontrados na LDA. Desta maneira, os resultados. Nesse caso, a nova distribuição dos clusters com sua respectiva quantidade de elementos está a seguir:

Tabela 2 – Clusters e quantidade de elementos

Cluster	Elementos
1	288
2	422
3	373
4	580
5	294

Fonte: elaboração própria.

Essa abordagem combinou a detecção de comunidades com a redução baseada em tópicos latentes, promovendo uma análise que equilibra a granularidade estrutural do grafo e a coerência temática identificada pelos tópicos extraídos.

O Cluster 1 reúne termos relacionados à regulação ambiental, destacando a redução de emissões e o impacto ambiental. Palavras como "gases", "emissões", "impacto" e "sustentabilidade" refletem o foco no controle ambiental e na mitigação de danos. Um nome apropriado para esse cluster seria "Regulação e Impacto da Captura de CO2".

O Cluster 2 se concentra no processo legislativo, na gestão e na infraestrutura do armazenamento de CO2. Termos como "armazenamento", "gestora", "descarbonização" e "energia renovável" sugerem um foco nas políticas públicas e questões econômicas. O nome sugerido seria "Gestão e Infraestrutura do Armazenamento de CO2".

O Cluster 3 abrange a gestão de recursos e riscos, destacando a exploração e a responsabilidade no contexto de concessões e contratos. Com palavras como "responsabilidade", "risco", "segurança" e "legislação", o cluster reflete aspectos da governança ambiental e dos interesses financeiros. O nome adequado seria "Gestão de Riscos e Responsabilidade na Captura de CO2".

O Cluster 4 se dedica ao interesse público, monitoramento e gestão de atividades ambientais. Termos como "direitos", "sanções", "regulamentação" e "fiscalização" indicam a importância de políticas públicas para controle e prevenção de danos ambientais. O nome sugerido seria "Gestão Pública e Monitoramento Ambiental".

Já o Cluster 5 contém palavras que se relacionam à regulamentação, governança e indústrias de energia. Termos como "lei", "autoridade", "projeto" e

"regulamentação" indicam a formalização e implementação de práticas jurídicas nas indústrias de energia. O nome adequado seria "Regulação e Governança das Indústrias de Energia".

Como complemento, a tabela a seguir avalia a similaridade entre cada par de clusters por meio da metodologia de Jaccard. Um coeficiente de similaridade próximo de 1 indica uma alta similaridade (sobreposição) entre os conjuntos comparados enquanto coeficientes menores demonstram que os conjuntos são independentes entre si.

Tabela 3 – Simillaridade de Jaccard para os clusters da pesquisa

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5
Cluster 1	1.000	0.123	0.045	0.067	0.034
Cluster 2	0.123	1.000	0.089	0.056	0.078
Cluster 3	0.045	0.089	1.000	0.023	0.012
Cluster 4	0.067	0.056	0.023	1.000	0.034
Cluster 5	0.034	0.078	0.012	0.034	1.000

Fonte: elaboração própria.

A análise de clusters demonstrou ser eficiente, com uma clara separação entre os diferentes grupos identificados, sem sobreposições significativas. A matriz de similaridade de Jaccard revelou um valor de 1 para os pares dentro de cada cluster, indicando que as palavras associadas a cada grupo são distintas das dos outros clusters.

Os itens da análise de clusters e da análise de similaridade proporcionam um entendimento sobre o projeto de lei e sua amplitude. O PL possui bastante amplitude e discute sobre vários temas relacionados a captura e armazenagem de CO2. Essa amplitude também se evidencia ao ler o parecer do relator na Comissão de Minas e Energia. O parecer aponta que o PL é um projeto importante para a mitigação das mudanças climáticas, especialmente em setores industriais difíceis de descarbonizar. Ressalta também que a CCS é essencial para a transição energética e oferece oportunidades econômicas significativas para o Brasil, como a exportação de créditos de carbono e combustíveis limpos. Assim, o projeto visa suprir a lacuna de legislações específicas sobre CCS no Brasil, o que impede o levantamento completo do potencial de armazenamento do país.

Essa amplitude normativa também reflete a necessidade de articular o desenvolvimento tecnológico à construção de marcos institucionais legítimos e socialmente orientados. Como demonstram Gomes et al. (2023), a aceitação pública de tecnologias sustentáveis requer discurso legítimo e transparência. Christ et al. (2024) ressaltam que a ausência de padronização pode enfraquecer os esforços regulatórios. Já Santos et al. (2024) destacam que políticas eficazes dependem do engajamento social e da mobilização local.

Pode-se compreender, portanto, que os elementos com maiores índices de similaridade também foram abordados pelo relator da Comissão de Minas e Energia, ou seja, os elementos envolvendo monitoramento de atividades, responsabilidades dos agentes e infraestrutura foram apontados no parecer submetido a Comissão de Minas e Energia para discussão dos demais membros da comissão. Em linha com o parecer e os clusters, o PL possui características voltadas para a busca da eficiência de escala a partir da regulamentação e melhoria do ambiente de negócios, o que está em linha com itens explicitados por North (1991), Djankov (2009) e Djankov et al. (2002). Além disso, o texto do PL e o parecer do relator evidenciam a necessidade de clareza nas atividades econômicas

envolvendo CCS, sobretudo objetivando a entrada de mais agentes no mercado e a estratégia voltada para mais investimentos em P&D. Estes elementos também denotam relação com trabalhos apresentados por Calel (2020) e Waxman et al. (2021) sobre o papel da regulamentação no desenho do ambiente de negócios e do nível de investimentos realizados pelos agentes.

Deve-se ressaltar, por fim, que o texto do PL e o parecer do relator da Comissão de Minas e Energia situam o contexto da redução de emissões e o investimento em tecnologia na área de CCS como itens preponderantes na necessidade de regulamentações. Em parte, o argumento central do PL e do Parecer do Relator do Projeto de Lei podem ser interpretados como regulações relacionadas ao avanço tecnológico e a mitigação dos problemas climáticos, elementos mostrados em trabalhos de Acemoglu et al. (2023).

Os apontamentos dos clusters, da similaridade e as ponderações a partir do parecer apreciado e aprovado pela Comissão de Minas e Energia (https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme) demonstram que o texto do PL é bastante abrangente, como se espera de um ambiente totalmente desregulamentado, abordando temas relacionados entre si com alguma sobreposição, embora pequena, enquanto também garante uma cobertura ampla de diferentes aspectos da operação relacionada ao armazenamento de CO2, evitando redundâncias ou concentração excessiva em um único tema.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do Projeto de Lei nº 1425 de 2022 utilizou técnicas avançadas de processamento de linguagem natural para decompor e organizar as informações contidas no texto legislativo, facilitando sua compreensão e revelando padrões temáticos que articulam ciência regulatória, desenvolvimento tecnológico e seus impactos sociais. O processo incluiu a limpeza dos dados, tokenização, remoção de palavras comuns, lematização e a aplicação de modelagem de tópicos para identificar e agrupar temas discutidos no texto. A análise resultou na identificação de clusters temáticos que abordam objetivos e princípios, outorga de exploração, obrigações do operador, monitoramento de atividades, responsabilidades e infraestrutura e transporte.

Os resultados mostraram que os clusters versam majoritariamente sobre monitoramento de atividades, responsabilidades e infraestrutura e transporte, evidenciando a abrangência normativa e o esforço de estruturação institucional em torno da governança climática e da inovação tecnológica. A análise de similaridade indicou que os clusters não apresentaram sobreposição e denotam que vários temas diferentes foram analisados, sobretudo por ser o primeiro marco regulatório do país dedicado exclusivamente ao tema.

Os temas abordados são amplamente conectados e cobrem diferentes aspectos da operação e regulamentação do armazenamento de CO2. Isso evidencia a abrangência do projeto de lei, que visa estabelecer um ambiente regulatório robusto para a CCS, promovendo segurança jurídica e incentivando investimentos em tecnologia e infraestrutura. Portanto, deve-se dizer que esta pesquisa encontrou que a amplitude do Projeto de Lei nº 1425 de 2022 é importante tanto para a mitigação das mudanças climáticas quanto para políticas de transição energética do Brasil. O projeto busca preencher a lacuna de regulamentações específicas para CCS no país, oferecendo apontamentos para a

exploração de reservatórios geológicos, definição de responsabilidades, procedimentos competitivos e diretrizes que impactam diretamente a formulação de políticas públicas de ciência e tecnologia voltadas à transição energética. Por fim, cabe dizer que a análise detalhada do texto legislativo, com base nos métodos utilizados, consegue trazer evidências sobre quais caminhos o texto legislativo (e seus elementos complementares) visam atingir e torna-se necessário que esse estudo seja replicado quando o texto legal entrar em vigor e as medidas infralegais forem adotadas, especialmente para avaliar seus efeitos sobre os arranjos produtivos, os sistemas de inovação e a confiança institucional dos diversos atores sociais envolvidos.

REFERÊNCIAS

ACEMOGLU, D. AGHION, P.; BARRAGE, L.; HEMOUS, D. Green innovation and the transition toward a clean economy. **Peterson Institute for International Economics Working Paper**, n. 23-14, 2023. Disponível em: https://ssrn.com/abstract=4816734. Acesso em: 30/12/2024.

BESANKO, D.; DRANOVE, D.; SHANLEY, M.; SCHAEFER, S. **Economics of strategy.** 7th ed. Wiley Custom, 2017.

BLONDEL, V. D.; GUILLAUME, J.; LAMBIOTTE, R.; LEFEBVRE, E. Fast unfolding of communities in large networks. **Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment**, v. 2008, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1742-5468/2008/10/P10008.

BUSCHNELL, J. B.; CHONG, H.; MANSUR, E. Profiting from regulation: evidence from the European carbon market. **American Economic Journal: Economic Policy**, v. 5, n. 4, p. 78-106, 2013.

BRASIL. **Projeto de Lei n.º 1425, de 2022.** Disponível em: https://www.camara.leg.br/propostas-legislativas/PL-1425-2022.

BRETSCHGER, L. Energy transition and climate change abatement: A macroeconomic analysis. Resource and Energy Economics, v. 76, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928765523000787.

CALEL, R. Adopt or innovate: understanding technological responses to cap-and-trade. **American Economic Journal: Economic Policy**, v. 12, n. 3, 2020.

CALEL, R.; COLMER, J.; DECHEZLEPRETRE, A.; GLACHANT, M. Do carbon offsets offset carbon? **Working Paper**. Centre for Climate Change Economics and Policy, 2021.

BLIND, K.; MUNCH, F. The interplay between innovation, standards and regulation in a globalizing economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 445, p. 141202, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141202.

BRAZOLLA, N.; MORETTI, C.; SIEVERT, K.; PATT, A.; LILLIESTAM, J. Utilizing CO_2 as a strategy to scale up direct air capture may face fewer short-term barriers than

directly storing CO_2. Environ. Res. Lett., v. 19, 2024. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ad3b1f.

CRANGA, S. Scale economies in the CO2 capture: a key factor for a successful energy transition. In: **16th INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREENHOUSE GAS CONTROL TECHNOLOGIES GHGT-16**, 23-27 out. 2022, Lyon, France. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4286227.

DJANKOV, S. The regulation of entry: a survey. **The World Bank Research Observer**, v. 24, n. 2, p. 183–203, 2009. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/40649281.

EL-KADY, A. H.; AMIN, M. T.; KHAN, F.; EL-HALWAGI, M. M. Analysis of CO2 pipeline regulations from a safety perspective for offshore carbon capture, utilization, and storage (CCUS). **Journal of Cleaner Production**, v. 439, p. 140734, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140734.

FAIRCHILD, A. O. Return on carbon: profit and social costs of greenhouse gas emissions. **Proceedings**, v. 2020, n. 1, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.5465/AMBPP.2020.170.

FISHER, R. A. On the interpretation of chi-squared from contingency tables, and the calculation of P. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 85, n. 1, p. 87-94, 1922. Disponível em: https://doi.org/10.2307/2340521.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados.** 6ª Edição. Porto Alegre Bookman, 2009.

HU, J.; PAN, X.; HUANG, Q. Quantity or quality? The impacts of environmental regulation on firms' innovation–quasi-natural experiment based on China's carbon emissions trading pilot. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 158, p. 120122, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120122.

JACCARD, P. The distribution of the flora in the alpine zone. **New Phytologist**, v. 11, n. 2, p. 37-50, 1912. Disponível em: https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.1912.tb05611.x.

NIKITA, M. _ldatuning: Tuning of the Latent Dirichlet Allocation Models Parameters_. R package version 1.0.2, 2020. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=ldatuning.

NORTH, D. C. Institutions. **The Journal of Economic Perspectives**, v. 5, p. 97-112, 1991. Disponível em: https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.5.1.97.

NORDHAUS, W. D. Rolling the "DICE": an optimal transition path for controlling greenhouse gases. **Resource and Energy Economics**, v. 15, p. 27-50, 1993. Disponível em: https://econpapers.repec.org/article/eeeresene/v_3a15_3ay_3a1993_3ai_3a1_3ap_3a27-50.htm.

PINDYCK, R.; RUBINFELD, D. **Microeconomics**. 9th ed. Peason, 2017.

RAI, V.; VICTOR, D. G.; THURBER, M. C. Carbon capture and storage at scale: lessons from the growth of analogous energy technologies. **Energy Policy**, v. 38, p. 4089-4098, 2010.

SCHMALENSEE, R. Economies of scale and barriers to entry. **Journal of Political Economy**, v. 89, n. 6, p. 1228-1238, 1981.

SILGE, J.; ROBINSON, D. tidytext: Text Mining and Analysis Using Tidy Data Principles in R. *Journal of Open Source Software*, v. 1, n. 3, 2016. DOI: 10.21105/joss.00037. Disponível em: https://doi.org/10.21105/joss.00037.

SPENCE, M. A. Notes on advertising, economies of scale, and entry barriers. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 95, n. 3, p. 493-507, 1980. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/1885090.

WAXMAN, A. R.; CORCORAN, S.; ROBINSON, A.; LEIBOWICZ, B; OLMSTEAD, S. Leveraging scale economies and policy incentives: carbon capture, utilization & storage in Gulf clusters. **Energy Policy**, v. 156, 2021.

ZHANG, Y.; PENG, Y.; MA, C.; SHEN, B. Can environmental innovation facilitate carbon emissions reduction? Evidence from China. **Energy Policy**, v. 100, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.10.005.

ZHOU, K.; LI, Y. Carbon finance and carbon market in China: progress and challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 536-549, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.298.

Recebido **16/01/2025**
Aprovado: 16/**07/2025**
DOI: 10.3895/rts.v21n65.19775

Como citar:

TONISSI, Felipe Gobi; BERKENBROCK, Felipe; CULPI, Robert Marcelo Soster et.al. Captura e armazenamento de carbono: análise do marco regulatório brasileiro.

Rev. Tecnol. Soc., Curitiba, v. 21, n. 65, p.214-229, jul./set., 2025. Disponível em:

https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/19775

Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.