



Tecnologias aplicadas à mitigação das mudanças climáticas: captura e do armazenamento de carbono à luz do Acordo de Paris

Guilherme Edson Merege de Mello Cruz Pinto^{*}

Ariê Scherreier Fernanda[†]

Miriam Olivia Knopik Ferraz[‡]

RESUMO Desde a Revolução Industrial, o aquecimento global foi de 1,1 °C, havendo a necessidade de contê-lo abaixo 1,5 °C até 2030, sob o risco de iniciarem uma série de desastres ambientais. Em resposta a esse cenário, o regime climático internacional tem buscado soluções e iniciativas, como o Acordo de Paris e as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC), que tem o objetivo de elencar possíveis políticas públicas e demais meios para conter o agravamento das alterações climáticas e os seus efeitos sobre a humanidade. Justifica-se, nesse sentido, a relevância da temática proposta em razão da extensão dos danos aos quais todo o planeta está exposto. A partir deste contexto, este trabalho tem por objetivo analisar as possíveis respostas do Acordo de Paris à crise climática no que se refere à captura de carbono sob a perspectiva da mitigação. O problema apresentado, portanto, se refere à adoção da tecnologia de captura e armazenamento de carbono como uma ação capaz de mitigar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) nos termos do Acordo de Paris. Para tanto, estipularam-se os seguintes objetivos específicos: (i) compreender tanto o contexto emergencial em que foi idealizado o Acordo de Paris quanto às inovações propostas pelo tratado, especialmente no que se refere à mitigação; e (ii) identificar as práticas e desafios da captura de carbono considerando o cenário tecnológico atual. Para atingir os objetivos propostos, a pesquisa foi realizada partindo de uma lógica dedutiva e amparada por revisão narrativa de literatura. Como resultado, verificou-se que, sob a perspectiva do Acordo de Paris, a tecnologia referente à captura e ao armazenamento de carbono representa uma importante estratégia de mitigação a ser utilizada ou seguir sendo utilizada por meio das NDC.

PALAVRAS-CHAVE mudanças climáticas; Acordo de Paris; gases de efeito estufa; mitigação; captura de carbono

* Doutorando e Mestre em Direito pelo Programa de Pós-Graduação em Direito da Universidade Federal de Santa Catarina. Coordenador do Grupo Permanente de Discussão da OAB/PR sobre Litigância Climática. Advogado. Jornalista. E-mail: guilhermemello91@hotmail.com. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6659437947566641>. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3609-7735>.

† Doutoranda e Mestre em Direito pela Universidade Federal de Santa Catarina. Pós-graduada em Direito Constitucional pela Academia Brasileira de Direito Constitucional. Advogada. E-mail: ariefernedaxx@gmail.com. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3222637526954534>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4559-4186>.

‡ Doutoranda em Direito pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR) com dupla titulação em Dottorato di Ricerca na Universidade de Roma Sapienza - La Sapienza. Membro da Delegação Brasileira da Sociedade Internacional de Direito do Trabalho e Seguridade Social. Membro do Grupo de Estudos de Análise Econômica do Direito da PUCPR. Professora da FAE Centro Universitário. Membro da Comissão de Direito do Trabalho, Direitos Culturais, e de Direito Empresarial da OABPR. Advogada e Sócia Fundadora do Knopik & Bertoncini Sociedade de Advogados. E-mail: Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4312339156293623>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3350-5502>.

Introdução

Os efeitos das mudanças climáticas ocupam, com cada vez mais frequência, as manchetes: “Mudança climática gera calor mortal na Índia e coloca desenvolvimento em risco” (REGAN, 2023); “Cientistas alertam para aumento de infecções bacterianas fatais devido ao aquecimento global” (ROCHA, 2023); “Gelo da Groenlândia e da Antártida derretem rapidamente e levam ao aumento do nível do mar” (GUY, 2023). Todas as informações, relatórios e pesquisas formuladas sobre a abrangência e os reflexos das mudanças climáticas no mundo caminham em uma direção comum: o tempo para evitar uma catástrofe climática está se esgotando.

Referidas mudanças fazem parte da história da humanidade, tendo sido responsáveis por períodos de prosperidade e abundância como também por grandes desastres ecológicos. Ocorre que, atualmente, a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) e a sua concentração na atmosfera atingiu níveis que causam preocupação, sendo que o cenário ambiental e humanitário previsto para as próximas décadas é catastrófico, caso não sejam adotadas medidas eficientes de mitigação e adaptação a essas mudanças. O atual formato pelo qual a sociedade moderna se organiza e se desenvolve se revela insustentável para a promoção do meio ambiente ecologicamente equilibrado.

Praticamente todas as atividades humanas envolvem a emissão de GEE: eletricidade, transporte, alimentação, trabalho e habitação. Tudo isso é viabilizado por meio do uso de combustíveis fósseis, os quais apresentam grandes benefícios, uma vez que a oferta é abundante e o custo é baixo, bem como possuem alta densidade energética e a tecnologia para o seu manejo já é madura. Por outro lado, as energias oriundas de fontes renováveis são opções viáveis para a mitigação das mudanças climáticas, porém, podem apresentar altos custos para a sua implementação e desenvolvimento. Nesse sentido, constata-se a necessidade de se pensar em alternativas.

Por sua vez, os impactos da crise climática atual - e de piora iminente - causados pela alta concentração de GEE na atmosfera recaem sobre os países mais pobres e em desenvolvimento e refletem no agravamento das desigualdades e da pobreza, no aumento da insegurança alimentar e energética, além de um impacto econômico considerável para mitigar os problemas e prejuízos resultantes da crise. Diante do cenário apresentado, destaca-se a necessidade e urgência de novas condutas, ações e desenvolvimento de novas tecnologias voltadas ao enfrentamento das mudanças climáticas.

Entre todas as ações mitigadoras que podem ser adotadas, o enfoque deste artigo recai sobre a possibilidade de captura de dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera, tendo em vista o nível de concentração do referido GEE. A relevância e urgência do debate sobre a temática proposta, mormente a partir da perspectiva do Acordo de Paris, é justificada em razão das metas climáticas internacionais que estão longe de serem efetivamente cumpridas, caso não haja o fortalecimento e o aprimoramento dos instrumentos de mitigação e adaptação.

Salienta-se, no entanto, que as ações e os planos formulados para o alcance das metas propostas devem ser discutidos e adotados de modo conjunto por todos os países - ou, pelo menos, pela maioria. Isso porque, considerando a globalização econômica e o caráter difuso do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, não basta que apenas alguns países se comprometam com o equilíbrio ecológico: trata-se de um compromisso para a sobrevivência da humanidade.

Sendo assim, o artigo foi conduzido a partir de uma lógica dedutiva, pautado na técnica de

pesquisa documental e bibliográfica, e foi dividido em dois tópicos principais: em primeiro lugar foi realizada uma análise voltada à compreensão tanto do contexto emergencial em que idealizado o Acordo de Paris (um momento de insuficiência do regime climático internacional e de agudização da crise climática) quanto das inovações propostas pelo tratado, especialmente no que se refere à mitigação; por sua vez, o segundo tópico foi destinado à discussão sobre a captura de carbono da atmosfera, cuja tecnologia foi tratada como uma possível alternativa de mitigação das emissões de dióxido de carbono, sobretudo sob a perspectiva econômica. Propôs-se, por fim, a discussão sobre a adoção de alternativas viáveis social e economicamente para conter o agravamento da crise climática, cuja tecnologia da captura e do armazenamento de CO₂ é uma das opções mais promissoras.).

A perspectiva mitigativa do Acordo de Paris voltada às emissões de dióxido de carbono

A crise climática internacional é um fato público e notório. Como é cediço, o recrudescimento de pesquisas científicas voltadas ao aquecimento global desvelou que os impactos negativos desse fenômeno advêm das interferências antrópicas sobre o ecossistema terrestre, iniciadas a partir de 1750, quando a Revolução Industrial fomentou o uso do carvão como fonte de energia (Artaxo; Rodrigues, 2019).

Desde então, o desenvolvimento tecnológico do homem vem demandando uma emissão cada vez maior de Gases de Efeito Estufa (GEE) – especialmente o dióxido de carbono (CO₂), também conhecido como gás carbônico – e acarretando, com isso, na amplificação de uma característica natural da atmosfera terrestre: o Efeito Estufa¹. Devido a essa amplificação, a temperatura da Terra se elevou gradativamente, o que chamou atenção, num primeiro momento, das ciências naturais e, *a posteriori*, também das humanas e sociais aplicadas – construindo, assim, uma rede de estudos de diferentes naturezas em torno desta temática (Fischlin, 2017; IPCC, 2007; Nobre, 2008).

Nessa linha, o mais recente relatório interdisciplinar publicado pela principal referência científica em matéria de mudanças climáticas, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)², a temperatura média na superfície da Terra aumentou cerca de 1,1°C entre os períodos de 1850-1900 e 2011-2020, o que tornou urgente e impreterível a contenção desse aquecimento abaixo de 1,5°C antes do final da corrente década (IPCC, 2023). Para tanto, as emissões globais de GEE precisam ser reduzidas em, aproximadamente, 7,6% ao ano até 2030 (UNEP, 2019), sob o risco de iniciar uma espécie de “efeito cascata” (ou “efeito dominó”)³ envolvendo diferentes eventos climáticos extremos, como secas, inundações e furacões (Rockström *et al.*, 2019, p. 594-595) – em outras palavras, trata-se de uma verdadeira “corrida contra o tempo”⁴, como bem colocam Arora e Mishra (2019, p. 339).

Em face dessa conjuntura – e sob os auspícios, precipuamente, dos relatórios do IPCC –, o

¹ Segundo Nobre (2008, p. 2), o Efeito Estufa consiste “na transparência atmosférica para a radiação solar de onda curta, na faixa do espectro das radiações visíveis, e a opacidade atmosférica à radiação terrestre de onda longa, ou infravermelho, emitida para o espaço”.

² Painel da Organização das Nações Unidas (ONU) criado em 1988 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) em parceria com a Organização Meteorológica Mundial (OMM) (PADILHA; PINTO, 2022).

³ Traduzido pelos autores de: “*cascading effects [...] Domino effects*”.

⁴ Traduzido pelos autores de: “[...] *race against time*”.

regime climático internacional (ou regime internacional das mudanças climáticas), tem buscado, desde o seu início na década de 1990, soluções concretas no âmbito do Direito Internacional, a começar pelo advento, em 1992, da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), fruto da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, também conhecida como Rio 92, Eco-92 ou Cúpula da Terra (Bodansky, 2016; Depledge, 2017; Juste Ruiz, 2018; Machado, 2013; Milaré, 2009).

Após entrar em vigor, em 1994, a CQNUMC precisava ser implementada por outro tratado internacional sobre mudanças climáticas, que veio a ser o Protocolo de Quioto, adotado em 1997, durante a 3ª Conferência das Partes⁵ (COP 3) da CQNUMC. Todavia, esse Protocolo só passou a vigor quase dez anos depois, quando enfim atendida a pré-condição para vigência, isto é, a ratificação por 55 Partes que, juntas, representavam ao menos 55% das emissões mundiais de CO₂, sob os níveis de 1990. Somando esse atraso ao pouco tempo restante para o cumprimento das metas (o prazo se iniciava já em 2008), as Partes acabaram aprovando a Emenda de Doha, que prorrogou o tratado até 2020 (Bodansky, 2016; Depledge, 2017; Machado, 2013; Milaré, 2009).

Diante desse fracasso político – provocado, em muito, pela controversa distinção entre países desenvolvidos e em desenvolvimento⁶ (motivo, inclusive, da não-ratificação pelos Estados Unidos) – (Antunes, 2020; Rei; Gonçalves; Souza, 2017), o regime climático internacional precisou se reinventar ainda antes de 2020, dando início à sua fase com estrutura tridimensional⁷, marcada pelo advento do mais recente tratado internacional sobre mudanças climáticas: o Acordo de Paris (JUSTE RUIZ, 2018).

Idealizado com a finalidade de superar problemas históricos do regime climático internacional, o Acordo de Paris apresenta natureza jurídica híbrida, sendo tanto *hard law*⁸ (como o Protocolo de Quioto) quanto *soft law*⁹. Desse modo, espera-se maior engajamento, na medida em que o conclave adotou um viés menos impositivo e mais flexível. Note-se, por exemplo, que a meta maior do tratado é a contenção do aquecimento global, até 2030, o mais distante possível de 2°C, limitando-o, preferencialmente, a 1,5°C (em comparação a níveis pré-industriais), sendo isso de observância obrigatória e estando os Estados-membro legalmente vinculados ao seu cumprimento (BODANSKY, 2016; JUSTE RUIZ, 2018).

Todavia, para que seja viabilizada a satisfação desse objetivo, antes as Partes precisam apresentar à CQNUMC suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, na sigla em inglês), bem como cumprir suas políticas públicas previstas em tais documentos. Nesse sentido, o Acordo de Paris adota uma abordagem dualista: enquanto a meta maior se trata de um exemplo de *top down approach*, as metas das NDC (próprias de cada país, a serem atendidas por meio de suas políticas públicas) representam o oposto, ou seja, um caso de *bottom up approach* (BODANSKY, 2016; DOELLE, 2017;

⁵ O termo “Partes” se refere aos Estados signatários da CQNUMC.

⁶ De acordo com a divisão da CQNUMC, os “Países do Anexo 1” (desenvolvidos e com economia em transição) tinham a obrigação de reduzir suas emissões de GEE, enquanto os “Países do Não Anexo 1” (em desenvolvimento) estavam isentos disso, mesmo em se tratando de grandes emissores de GEE, como o próprio Brasil (MILARÉ, 2009, p. 1223).

⁷ Composta por: (I) CQNUMC; (II) Protocolo de Quioto; e (III) Acordo de Paris (JUSTE RUIZ, 2018).

⁸ Caracteriza-se por ser legalmente vinculante, contemplando tratados internacionais e o direito consuetudinário (KISS, 2006).

⁹ Trata-se de uma fonte material de direito, a exemplo da Agenda 2030 e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (SARLET; FENSTERSEIFER, 2021).

RAJAMANI; GUÉRIN, 2017).

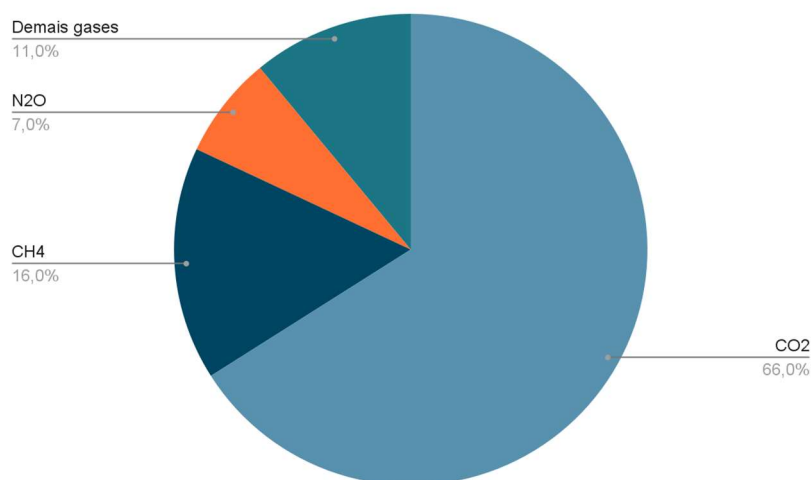
Outro traço distintivo do Acordo de Paris é a ruptura com a divisão estabelecida pela CQNUMC com base no desenvolvimento econômico de seus signatários, o que se deve, em muito, à reformulação do Princípio das Responsabilidades Comuns, porém Diferenciadas e Respectivas Capacidades (CBDR-RC, na sigla em inglês), que passou a estar condicionado às circunstâncias nacionais de cada Partes. Assim, todos têm a mesma meta maior de contenção do aquecimento global, mas cada qual contribui na exata medida de suas capacidades e possibilidades, o que significa uma diferenciação equitativa quanto aos países desenvolvidos e em desenvolvimento (BODANSKY, 2016; RAJAMANI; GUÉRIN, 2017).

Partindo de uma leitura do Acordo de Paris à luz dos documentos que o regulamentam (seu texto base e a *Decision 1/CP.21*¹⁰) e dos elementos que o estruturam, Rajamani e Guérin (2017) explicam que o tratado pode ser estudado a partir dos três pilares conceituais que o sustentam: (I) ambição e progressão dos esforços globais em prol da redução das emissões de GEE; (II) diferenciação equitativa quanto aos países desenvolvidos e em desenvolvimento; e (III) apoio aos esforços em face das mudanças climáticas.

Vale frisar, ainda, que aludidos pilares podem ser enxergados pelo prisma da mitigação das mudanças climáticas (medidas que previnem os impactos negativos do aquecimento global) ou da adaptação (medidas que atenuam esses impactos) (CARVALHO; BARBOSA, 2019).

Nessa linha, a pesquisa ora em tela envereda por um pilar conceitual de jaez eminentemente mitigativo, qual seja o da ambição e progressão dos esforços globais em prol da redução das emissões de GEE. Com efeito, é oportuno se atentar às possíveis estratégias de mitigação das mudanças climáticas que coadunem com o Acordo de Paris no que se refere exclusivamente à redução das emissões CO₂, que representa o GEE com maior percentual de concentração na atmosfera terrestre, conforme abaixo ilustrado:

Figura 1 – Concentração dos principais GEE na atmosfera terrestre.



Fonte: Adaptado de WMO (2021).

¹⁰ Documento regulamentador derivado da COP21, ocasião em que foi adotado o Acordo de Paris.

Segundo Derani e Oliveira (2021), o texto-base do Acordo de Paris e a *Decision 1/CP.21* são pouco prescritivos, havendo a necessidade de maior regulamentação, assim como feito pelo Paris Rulebook, outro documento do gênero, porém composto por uma série de decisões oriundas de diferentes COPs, tendo sido a última delas proferida após a COP 26, realizada em 2021. Contudo, isso não significa que o tratado seja estanque, muito pelo contrário: ainda existem importantes questões a serem pormenorizadas, como as próprias estratégias de mitigação.

Na visão de Winkler (2017), a perspectiva mitigativa do Acordo de Paris se resume às NDC, cuja instrumentalização deve obedecer a regras específicas, por força da vertente *hard law* do tratado. Um exemplo dessas regras é a obrigatoriedade de submeter novas versões a cada cinco anos (para NDC com metas internas para 2025) ou de atualizar a primeira versão (para NDC com metas internas para 2025) (BODANSKY, 2016; RAJAMANI; GUÉRIN, 2017).

No mais, inexistem disposições legalmente vinculantes no sentido de quais medidas devem ser adotadas nas NDC, mas, sim, recomendações, como o faz a Declaração dos Líderes de Glasgow sobre Florestas e Uso da Terra, emitida no bojo da COP 26 e que destaca a importância de se zerar o desmatamento visando a contenção de emissões de CO₂, independentemente se de origem legal ou ilegal (UKCOP26, 2021).

Muito por isso, as NDC não se mostram condizentes com a realidade, pois as Partes têm submetido documentos meramente protocolares, conforme denunciou o PNUMA na mais recente edição do *Emissions Gap Report 2022*:

A implementação de todas as NDC somada aos compromissos de emissões líquidas zero, assumidos por um número cada vez maior de países, indicam um aumento de 1,8°C. Porém, este cenário não se mostra confiável, dada a discrepância entre as emissões atuais, as metas de curto prazo das NDC e as metas de longo prazo de emissões líquidas zero. Para que sejam atingidos os objetivos do Acordo de Paris, o mundo precisa de uma redução sem precedentes nos níveis de GEE ao longo dos próximos oito anos (UNEP, 2022, p. 1).¹¹

Com efeito, uma das alternativas a serem devidamente previstas e cumpridas nas NDC em matéria de mitigação das emissões de CO₂ advém do uso de novas tecnologias, como aquelas que estão relacionadas à própria captura e armazenamento de carbono.

Captura de carbono: uma opção viável para a mitigação das mudanças climáticas?

As crises climáticas oriundas das emissões antrópicas de GEE são um tópico de grande interesse e preocupação, sobretudo na agenda internacional, dado os seus reflexos socioeconômicos para todo o globo. Os principais GEE são: metano (CH₄) dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbono (HFC), clorofluorcarbono (CFC) e perfluorcarbono (PFC) (MAIA, 2007, p. 44). Esses gases absorvem calor e o retêm na atmosfera. Isso porque, parte da energia recebida do Sol é irradiada de volta para o espaço na faixa do comprimento de onda que é absorvida pelos gases.

¹¹ Traduzido pelos autores de: Implementation of all NDCs plus net-zero commitments made by an increasing number of countries point to a 1.8°C increase. However, this scenario is not credible, based on the discrepancy between current emissions, near-term NDC targets and long-term net-zero targets. To get on track to meet the Paris Agreement goal, the world needs to reduce greenhouse gases by unprecedented levels over the next eight years.

Assim, o aquecimento da atmosfera é causado quando a energia emitida atinge as moléculas (sobretudo aquelas que apresentam átomos diferentes, como o CO₂) e as faz vibrar mais rápido (GATES, 2021, p. 33).

O agravamento da emissão dos referidos gases possui relação direta com os padrões de consumo e produção ao redor do mundo. Por exemplo, o alimento é uma mercadoria global, sendo assim, “o que é consumido em um país pode levar a mudanças no uso da terra em outro” (GATES, 2021, p. 151). Em outras palavras: mais hambúrgueres em um lugar significa maior desmatamento em outro para a exploração pecuária. Além do cultivo de alimentos, outras atividades são desempenhadas com a emissão inerente de GEE: fabricar as coisas (corresponde a 31% das emissões anuais de GEE), ligar as coisas na tomada (27%), cultivar e criar as coisas (19%), transportar as coisas (16%) e manter as coisas quentes e frias (7%) (GATES, 2021, p. 68). Isto é, toda atividade da vida moderna repercute nas mudanças climáticas, envolvendo a emissão de GEE, que somam, anualmente, 51 bilhões de toneladas.

A meta a longo prazo do Acordo de Paris, por sua vez, é alcançar a neutralidade climática, quer dizer, as emissões líquidas zero (*net-zero*) até, no mínimo, 2050 (MOREIRA *et al.*, 2022). Para tanto, mudanças de hábitos e comportamentos são imprescindíveis, sem olvidar, no entanto, do desenvolvimento de países com economia emergente: busca-se manter a escada pela qual países desenvolvidos subiram ao topo no lugar.¹² A questão que se impõe é: como garantir mais energia para que a população possa prosperar, mas sem liberar mais GEE. O desenvolvimento socioeconômico não deve concorrer com assuntos ecológicos, uma vez que “a prosperidade humana depende da prosperidade do planeta” (RAWORTH, 2019, p. 61).

Na visão de Beck (2018), essas mudanças de hábitos e comportamentos são, inclusive, inexoráveis, afinal: (I) a crise climática é um produto da ação humana; (II) nesse sentido, não há que se cogitar a sua contenção sem que antes sejam repensados os meios que colocaram a sociedade moderna à beira de um colapso; e (III) por estar à mercê deste colapso, em algum momento a humanidade precisará promover aquilo que necessário, por força da natureza.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, nesse sentido, apontou que os cortes nas emissões dos GEE são urgentes e devem ser acentuados, o que requer “uma transformação em grande escala, rápida e sistêmica no mundo inteiro” (UNEP, 2022). É imprescindível, portanto, a efetivação de mudanças e o fortalecimento e aumento da ambição dos países em suas NDC, considerando que a maioria destas, desde a realização da COP26, foram consideradas inadequadas ou insuficientes.

Sendo assim, impõem-se novas formas de se pensar o desenvolvimento, tal como proposto pela economista Raworth (2019): o espaço seguro e justo para a humanidade deve respeitar o teto ecológico da pressão planetária – que abrange as mudanças climáticas, destruição da camada de ozônio e a poluição do ar – e o alicerce social daquilo que foi denominado como Donut¹³, enquanto bússola para o século XXI:

Figura 2 – Donut: uma bússola para o século XXI.

¹² Em referência ao livro: (CHANG, 2004).

¹³ Para aprofundamento da temática a respeito do desenvolvimento sustentável na economia Donut, consulte Ferneda, Mafra e Santos (2021).



Fonte: (Raworth, 2019, p. 55).

Diante desse cenário, alternativas para reduzir – ou mesmo eliminar por completo – as emissões de GEE são urgentes e necessárias para a concretização de um desenvolvimento econômico sustentável e inclusivo, além da efetivação de direitos fundamentais, como o direito à vida, à saúde, à alimentação e ao meio ambiente ecologicamente equilibrado (art. 6º, *caput*, e art. 225 da Constituição da República). Com isso, para além da utilização de fontes renováveis de energia, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para reduzir a emissão dos GEE.

Como dito, as respostas da sociedade frente às mudanças do clima se agrupam em duas categorias, sendo elas a adaptação e a mitigação.¹⁴ Para fins desta pesquisa, enfatizam-se as ações de mitigação, sobretudo em uma possível alternativa: a captura de CO₂ – ação também denominada de captura de carbono. Ressalta-se que há outros gases que agravam ainda mais o aquecimento global, como é o caso do N₂O, que, em 100 anos, apresenta um potencial de aquecimento 296 vezes maior do que o CO₂ (GATES, 2021). Todavia, a pesquisa se volta ao desenvolvimento de tecnologias capazes de reduzir as emissões de GEE e aumentar os sumidouros, considerando, ainda, que no ano 2021 foram lançadas 37124 MtCO₂¹⁵ na atmosfera, representando a maior parte dos gases que provocam o aquecimento do planeta (GLOBAL CARBON PROJECT, 2021).

Os sumidouros, por sua vez, consistem em processos, atividades ou mecanismos que removem da atmosfera gás de efeito estufa, aerossol ou precursor dos referidos gases, nos termos do art. 2º, IX, da Lei n. 12.187/2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e conceitua importantes questões. Exemplo de sumidouros naturais são os oceanos, os solos e as florestas. Por outro lado, há os sumidouros artificiais, que incluem medidas como o sequestro do CO₂, cuja tecnologia consiste na captura e no armazenamento do referido gás antes da sua liberação

¹⁴ Nos termos da Política Nacional sobre Mudança no Clima, a adaptação consiste em iniciativas e medidas para reduzir a vulnerabilidade dos sistemas naturais e humanos frente aos efeitos atuais e esperados da mudança do clima; já a mitigação diz respeito às mudanças e substituições tecnológicas que reduzam o uso de recursos e as emissões por unidade de produção, bem como a implementação de medidas que reduzam as emissões de gases de efeito estufa e aumentem os sumidouros (art. 2º, I e VII, da Lei n. 12.187/2009).

¹⁵ Cada Mt equivale a 1 milhão de toneladas.

para a atmosfera.

O processo de captura e de armazenamento de carbono¹⁶ é uma tecnologia que pode contribuir para a redução de 19% das emissões desse gás até 2050 (HUSSIN; AROUA, 2020). Até o ano de 2020, no mundo, havia 37 projetos para viabilizar tal tecnologia em grande escala, sendo que 17 deles estão em funcionamento, 4 projetos em construção efetiva, 11 em estágio inicial de desenvolvimento e 5 projetos em estágio avançado. O maior programa em operação de captura e armazenamento de carbono - em volume reinjetado anualmente - está situado no Brasil e foi desenvolvido pela Petrobrás nos campos do pré-sal e é, também, o pioneiro em águas ultraprofundas:

A tecnologia de CCUS [*Carbon Capture, Utilization and Storage*] engloba a separação do CO₂ e do gás natural e a posterior reinjeção do CO₂ de volta ao reservatório de onde saiu, onde fica armazenado. A reinjeção foi uma solução encontrada pela companhia para atender ao compromisso de não ventilar para a atmosfera o CO₂ que está presente no gás natural. Trata-se de uma das iniciativas que permitem à empresa produzir petróleo com baixa emissão de carbono nos campos do pré-sal (PETROBRAS, 2022).

No mesmo sentido, a companhia investe no aprimoramento de novas soluções de grande porte e impacto para a redução das emissões dos GEE. Igualmente, a *Energy Information Administration* (EIA) compreende a tecnologia como fundamental e recomenda a sua adoção para um desenvolvimento sustentável (HUSSIN; AROUA, 2020). O processo de captura e de armazenamento do CO₂ é considerado como uma das “tecnologias mais promissoras para a mitigação das mudanças climáticas” (TAM, 2009). Nada obstante, a captura de carbono pode ser realizada por meio de três métodos que se distinguem com base no momento do sequestro e com relação à forma como é realizada a remoção, entre outras distinções, sendo eles: pré-combustão, pós-combustão e oxi-combustão.¹⁷

Por sua vez, ainda que seja uma tecnologia promissora, a captura e armazenamento do carbono apresenta algumas controvérsias e dúvidas. Há, nesse sentido, dois fatores que devem ser levados em conta antes da utilização dessa tecnologia em larga escala:

Em primeiro lugar, são necessárias instalações de baixo custo para a tecnologia CCS avançada e, em segundo lugar, é necessário definir um quadro regulamentar e político para proporcionar estabilidade financeira, o que deverá inspirar confiança aos investidores para realizar projetos de CCS (HUSSIN; AROUA, 2020).¹⁸

Além do problema relacionado ao custo econômico da aplicação da tecnologia, outra crítica pertinente se refere ao fato de que a captura e o armazenamento de carbono não contribuem para a diminuição da geração de GEE ou mesmo para a substituição de combustíveis fósseis pela produção de energia oriunda de fontes renováveis (FARIA, 2018, p. 37), mas para a não liberação dos gases para a atmosfera por meio do armazenamento geológico subterrâneo (BRUHN; NAIMS; OLFE-KRÄUTLEIN, 2016). Todavia, em que pese o objetivo seja promover a redução efetiva dos GEE, o

¹⁶ Para aprofundamento da temática, quanto à avaliação de materiais adsorventes com diferentes propriedades para a captura de carbono, consulte (GOUVEIA, 2020).

¹⁷ Para aprofundamento na temática relativa aos meios de captura de carbono, consulte (FARIA, 2018).

¹⁸ Tradução livre: First, low-cost facilities are required for advanced CCS technology and second, regulatory and policy framework needs to be set in place in order to provide financial stability, which will instil confidence in investors to undertake CCS projects (HUSSIN; AROUA, 2020).

relatório sobre a lacuna das emissões publicado pela ONU aponta que “as políticas atualmente em vigor, se não forem fortalecidas, sugerem uma elevação de 2,8°C” (UNEP, 2022), sendo que o limite é 1,5°C de aquecimento do planeta. Tal fato demonstra que quaisquer ações destinadas a conter a emissão de gases que agravam a crise climática devem ser objeto de discussão e consideração. A meta, nesse sentido, é reduzir progressivamente as emissões até atingir o *net-zero*.

Considerações finais

O tema relativo às mudanças climáticas e seus efeitos para a humanidade é de extrema relevância e urgência, dadas as condições atuais de liberação de GEE na atmosfera e das constatações das principais referências científicas. Os efeitos da crise climática se estendem a todos os níveis das atividades humanas e a principal forma de experimentá-los será por meio do preço da comida e demais insumos essenciais para a vida, bem como pela migração em razão das condições do clima em determinadas regiões do planeta.

Considerando o cenário catastrófico - e iminente - ao qual a humanidade está exposta em razão do modo de construção socioeconômico iniciado, sobretudo, com a Revolução Industrial, torna-se vital o debate e o desenvolvimento de novas tecnologias e estratégias voltadas à mitigação e adaptação às mudanças climáticas em curso e as por vir. Para tanto, requer-se a atuação conjunta - dada a responsabilidade comum - dos Estados, das empresas e da própria sociedade na adoção de novos hábitos, ações e condutas, bem como no financiamento de pesquisas e estudos que possam contribuir progressivamente para o alcance das metas propostas para a contenção de danos irreversíveis. Ignorar as previsões e as pesquisas realizadas, bem como deixar de fortalecer os mecanismos de mitigação e adaptação beira a ingenuidade e a negligência.

Nesse sentido, o artigo teve como objetivo analisar as possíveis respostas do Acordo de Paris à crise climática sob a perspectiva da mitigação. Para tanto, adotou-se como possível opção a captura - ou sequestro - e armazenamento de carbono, tendo em vista que o referido GEE é o que possui maior concentração na atmosfera. Para o desenvolvimento da pesquisa, optou-se pela lógica dedutiva, a partir da qual o Acordo de Paris foi abordado no sentido de apresentar as principais inovações no tocante às iniciativas de mitigação.

Em seguida, adentrou-se no debate da tecnologia relativa à captura e armazenamento de carbono como opção viável à mitigação da crise climática, oportunidade em que foram apresentados os principais debates e críticas a respeito da iniciativa. Como resultado, verificou-se que, sob a perspectiva do Acordo de Paris, a tecnologia referente à captura e ao armazenamento de carbono representa uma importante estratégia de mitigação a ser utilizada ou seguir sendo utilizada por meio das NDC.

Referências

ANTUNES, Paulo de Bessa. Direito internacional do meio ambiente: particularidades. **Veredas do Direito**, Belo Horizonte, v. 17, n. 37, p. 263-294, jan./abr. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18623/rvd.v17i37.1591>. Acesso em: 21 abr. 2023.

ARORA, Naveen Kumar; MISHRA, Isha. United Nations Sustainable Development Goals 2030 and environmental sustainability: race against time. **Environmental Sustainability**, v. 2, n. 4, p. 339-342, dez. 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s42398-019-00092-y>. Acesso em: 21 abr. 2023.

ARTAXO, Paulo; RODRIGUES, Délcio. As bases científicas das mudanças climáticas. In: SETZER, Joana; CUNHA, Kamyla; FABBRI, Amália S. Botter (coord.). **Litigância climática**: novas fronteiras para o direito ambiental no Brasil. 1. ed. São Paulo: Thomson Reuters Brasil, 2019. p. 43-55.

BECK, Ulrich. **A metamorfose do mundo**: novos conceitos para uma nova realidade. 1. ed. Rio de Janeiro: Zahar, 2018.

BODANSKY, Daniel. The Paris Climate Change Agreement: a new hope? **The American Journal of International Law**, v. 110, n. 2, p. 288-319, abr. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5305/amerjintelaw.110.2.0288>. Acesso em: 21 abr. 2023.

BRASIL. **Lei n. 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 13 abr. 2023.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. 1988.

BRUHN, Thomas; NAIMS, Henriette; OLFE-KRÄUTLEIN, Barbara. Separating the debate on CO2 utilisation from carbon capture and storage. **Environmental Science and Policy**, n. 60, p. 38-43, 2016. Disponível em: https://publications.iass-potsdam.de/rest/items/item_1480983_4/component/file_1480984/content. Acesso em: 28 abr. 2023.

CARVALHO, Délton Winter de; BARBOSA, Kelly de Souza. Litigância climática como estratégia jurisdicional ao aquecimento global antropogênico e mudanças climáticas. **Revista de Direito Internacional**, Brasília, v. 16, n. 2, p. 55-72, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5102/rdi.v16i2.5949>. Acesso em: 21 abr. 2023.

CHANG, Há-Joon. **Chutando a escada**: a estratégia do desenvolvimento em perspectiva histórica. São Paulo: Editora UNESP, 2004.

DEPLEDGE, Joanna. The legal and policy framework of the United Nations Climate Change regime. In: KLEIN, Daniel et al. (org.). **The Paris Agreement on climate change**: analysis and commentary. 1. ed. Nova Iorque: Oxford University Press, 2017. p. 27-42.

DERANI, Cristiane; OLIVEIRA, Adrielle Betina Inácio. Instrumentalização do paradigma normativo ascendente do Acordo de Paris pelo Livro de Regras. **Veredas do Direito**, Belo Horizonte, v. 18, n. 40, p. 333-360, jan./abr. 2021. Disponível em: <http://revista.domhelder.edu.br/index.php/veredas/article/view/1943>. Acesso em: 21 dez. 2022.

DOELLE, Meinhard. Assessment of strengths and weaknesses. In: KLEIN, Daniel et al. (org.). **The Paris Agreement on climate change**: analysis and commentary. 1. ed. Nova Iorque: Oxford University Press, 2017, p. 375-388.

FARIA, Débora Goulart. **Captura, armazenamento e utilização de dióxido de carbono na indústria de cimento**. 156fls. 2018. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/32406/1/Disserta%3a7%3a3o%20de%20mestrado%20-%20D%3a9bora%20Faria%20-%20Vers%3a3o%20Final.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2023.

FERNEDA, Ariê Scherreier; MAFRA, Marcos Guilherme Rodrigues; SANTOS, Poliana Ribeiro dos. Conservação e proteção dos oceanos, mares e recursos marinhos (ODS 14): em busca do desenvolvimento sustentável com atenção aos limites planetários. In: VALENÇA, Anita Rademaker; SANTOS, Poliana Ribeiro dos; GUZELLA, Luciana. (Org.). **Aquicultura na contemporaneidade**: inovação e legislação aplicada. 1ed. Florianópolis: UFSC, 2021, v. 1, pp. 64-75.

FISCHLIN, Andreas. Background and role of science. In: KLEIN, Daniel et al. (org.). **The Paris Agreement on climate change**: analysis and commentary. 1. ed. Nova Iorque: Oxford University Press, 2017. p. 3-16.

GATES, Bill. **Como evitar um desastre climático**: as soluções que temos e as inovações necessárias. Trad. Cássio Arantes Leite. 1. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2021.

GLOBAL CARBON PROJECT. **Global Carbon Atlas**. 2021. Disponível em: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>. Acesso em: 13 abr. 2023.

- GOUVEIA, Lucas Gabriel Teixeira. **Avaliação de materiais adsorventes com diferentes propriedades para a captura de CO₂**. 91fls. 2020. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/213008>. Acesso em: 28 abr. 2023.
- GUY, Jack. Gelo da Groenlândia e da Antártida derretem rapidamente e levam ao aumento do nível do mar. **CNN**. 20/04/2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/gelo-da-groenlandia-e-antartida-derretem-rapidamente-e-levam-ao-aumento-do-nivel-do-mar/>. Acesso em: 28 abr. 2023.
- HUSSIN, Farihasnah; AROUA, Mohamed Kheireddine. Recent trends in the development of adsorption technologies for carbon dioxide capture: A brief literature and patent reviews (2014–2018). **Journal of Cleaner Production**, v. 253, Apr. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619345779?via%3Dihub>. Acesso em: 28 abr. 2023.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Carbon Dioxide Capture and Storage**. Cambridge: 2005. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf. Acesso em: 13 abr. 2023.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2007: synthesis report**. Genebra: IPCC, 2007. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf. Acesso em: 21 abr. 2023.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2014: synthesis report**. Genebra: IPCC, 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf. Acesso em: 21 abr. 2023.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2023: synthesis report**. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf. Acesso em: 21 abr. 2023.
- JUSTE RUIZ, José. El tercer pilar del régimen internacional para responder al cambio climático: el Acuerdo de París de 2015. In: BORRÀS PENTINAT, Susana; VILLAVICENCIO CALZADILLA, Paola Milenka (org.). **El Acuerdo de París sobre el cambio climático: ¿un acuerdo histórico o una oportunidad perdida? análisis jurídico y perspectivas futuras**. 1. ed. Pamplona: Aranzadi, 2018. p. 29-52.
- KISS, Alexandre. **Introduction au droit international de l'environnement**. 2. ed. Genebra: UNITAR, 2006.
- MACHADO, Paulo Affonso Leme. **Direito ambiental brasileiro**. 21. ed. São Paulo: Malheiros Editores, 2013.
- MAIA, João Luiz Ponce. **Separação e captura do dióxido de carbono em instalações marítimas de produção de petróleo**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica). São Paulo, 2007, p. 44. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-14012008-163057/pt-br.php>. Acesso em: 13 abr. 2023.
- MILARÉ, Édis. **Direito do ambiente: a gestão ambiental em foco**. 6. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2009.
- MOREIRA, Danielle de Andrade *et al.* **Litigando a crise climática no Brasil: argumentos jurídicos para se exigir do Estado a implementação doméstica do Acordo de Paris**. 1. ed. São Paulo: Pimenta Cultural, 2022.
- NOBRE, Paulo. Aquecimento global, oceanos e sociedade. **Revista InterfacEHS**, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 1-14, jan./abr. 2008. Disponível em: <http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/wp-content/uploads/2013/07/art-1-2008-6.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2023.
- PETROBRAS. Fatos e Dados. **Programa de CCUS da Petrobras no pré-sal é o maior do mundo em volume de gás carbônico (CO₂) reinjetado**. 14/01/2022. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/programa-de-ccus-da-petrobras-no-pre-sal-e-o-maior-do-mundo-em-volume-de-gas-carbonico-co2-reinjetado.htm>. Acesso em: 28 abr. 2023.
- PADILHA, Norma Sueli; PINTO, Guilherme Edson Merege de Mello Cruz. Diálogos entre Ulrich Beck e o IPCC: breves correlações à luz da teoria da sociedade de risco. In: LEITE, José Rubens Morato; CAVEDON-CAPDEVILLE, Fernanda de Salles; DUTRA, Tônia Andrea Horbatiuk (org.). **Geodireito, justiça climática e ecológica: perspectivas para a América Latina**. 1. ed. São Paulo: Inst. O direito por um Planeta Verde, 2022. p. 126-145.
- RAJAMANI, Lavanya; GUÉRIN, Emmanuel. Central concepts in the Paris Agreement and how they evolved. In: KLEIN, Daniel *et al.* (org.). **The Paris Agreement on climate change: analysis and commentary**. 1. ed. Nova Iorque:

Oxford University Press, 2017. p. 74-90.

RAWORTH, Kate. **Economia Donut**: uma alternativa ao crescimento a qualquer custo. Trad. SCHLESSINGER, George. 1. ed. Rio de Janeiro: Zahar, 2019.

REI, Fernando Cardozo Fernandes; GONÇALVES, Alcindo Fernandes; SOUZA, Luciano Pereira de. Acordo de Paris: reflexões e desafios para o regime internacional de mudanças climáticas. **Veredas do Direito**, Belo Horizonte, v. 14, n. 29, p. 81-99, maio/ago. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18623/rvd.v14i29.996>. Acesso em: 21 abr. 2023.

REGAN, Helen. Mudança climática gera calor mortal na Índia e coloca desenvolvimento em risco. **CNN**. 23/04/2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/mudanca-climatica-gera-calor-mortal-na-india-e-coloca-desenvolvimento-em-risco/>. Acesso em: 28 abr. 2023.

ROCHA, Lucas. Cientistas alertam para aumento de infecções bacterianas fatais devido ao aquecimento global. **CNN**. 16/04/2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/saude/cientistas-alertam-para-aumento-de-infeccoes-bacterianas-fatais-devido-ao-aquecimento-global/>. Acesso em: 28 abr. 2023.

ROCKSTRÖM, Johan *et al.* Climate tipping points: too risky to bet against. **Nature**, v. 575, p. 592-595, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03595-0>. Acesso em: 21 abr. 2023.

SARLET, Ingo Wolfgang; FENSTERSEIFER, Tiago. **Curso de direito ambiental**. 2. ed. Rio de Janeiro: Forense, 2021.

TAM, Cecília. **Energy Technology Transitions for Industry**. Strategies for the Next Industrial Revolution. International Energy Agency. OECD/IEA, 2009. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21217938>. Acesso em: 28 abr. 2023.

UKCOP26. **Glasgow Leaders' Declaration on Forests and Land Use**. Glasgow: UNFCCC, 2021. Disponível em: <https://ukcop26.org/glasgow-leaders-declaration-on-forests-and-land-use/>. Acesso em: 21 abr. 2023.

UNEP. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Emissions gap report 2019**. Nairóbi: UNEP, 2019. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2019>. Acesso em: 21 abr. 2023.

UNEP. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Relatório sobre a lacuna de emissões 2022, mensagens chave**. A janela que se fecha - Crise climática pede rápida transformação da sociedade. 2022. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/40875/EGR2022_KMPT.pdf?sequence=7&isAllowed=y. Acesso em: 28 abr. 2023.

WINKLER, Harald. Mitigation (article 4). In: KLEIN, Daniel *et al.* (org.). **The Paris Agreement on climate change**: analysis and commentary. 1. ed. Nova Iorque: Oxford University Press, 2017. p. 141-165.

WMO. World Meteorological Organization. **Greenhouse Gas Bulletin n. 17**. Genebra: WMO, 2021. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10904. Acesso em: 21 abr. 2023.

Technologies applied to climate change mitigation: carbon capture and storage in light of the Paris Agreement

ABSTRACT Since the Industrial Revolution, global warming has been 1.1°C, with the need to contain it below 1.5°C by 2030, under the risk of starting a series of environmental disasters. In response to this scenario, the international climate regime has sought solutions and initiatives, such as the Paris Agreement and Nationally Determined Contributions (NDC), which aim to list possible public policies and other means to contain the worsening of climate change and its effects on humanity. In this sense, the relevance of the proposed theme is justified due to the extent of damage to which the entire planet is exposed. From this context, this work aims to analyze the possible responses of the Paris Agreement to the climate crisis with regard to carbon capture from the perspective of mitigation. The problem presented, therefore, refers to the adoption of carbon capture and storage technology as an action capable of mitigating greenhouse gas emissions under the terms of the Paris Agreement. To this end, the following specific objectives were stipulated: (i)

understand both the emergency context in which the Paris Agreement was conceived and the innovations proposed by the treaty, especially with regard to mitigation; and (ii) identify carbon capture practices and challenges considering the current technological scenario. To achieve the proposed objectives, the research was carried out based on a deductive logic and supported by a narrative literature review. As a result, it was verified that, from the perspective of the Paris Agreement, the technology related to the capture and storage of carbon represents an important mitigation strategy to be used or continue to be used through the NDC. **KEYWORDS** *Climate change; Paris Agreement; greenhouse gases; mitigation; carbon capture.*