

Mudanças climáticas e a contribuição da tecnologia de CCS para os desafios da mitigação do clima

Israel Lacerda de Araujo ^I
Hirdan Katarina de Medeiros Costa ^{II}
Zen Makuch ^{III}

Resumo: O principal desafio recente tem sido o problema das emissões de e gases de efeito estufa (GEE) pós-industrialização, e que se tornou objeto de esforços internacionais no intuito de mitigar os efeitos de mudança climática. Esse trabalho visa discutir o tema principal sob ótica das mudanças geológicas de longo prazo, e como a tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS) pode contribuir para a resolução do desafio climático global. A metodologia baseia-se em revisão literária do CCS e de dados geológicos. O resultado mostra que a atividade humana quanto à GEE tem sido o vetor da definição do Antropoceno como era geológica, e acarretou preocupações políticas e acordos internacionais do clima, que encorajam aperfeiçoamentos legal, institucional e normativo para lidar com desafios da implementação do CCS. Conclui-se pela responsabilidade do poder público como agente que arbitra regras e estabelece recursos disponíveis, interesses envolvidos e ajustes de custo.

^I Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

^{II} Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

^{III} Imperial College London, London, UK

Palavras-chave: Mudança climática, medidas mitigatórias, tecnologia de CCS, fontes antropogênicas de GEE.

São Paulo. Vol. 25, 2022

Artigo Original

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210036r1vu2022L2AO>

Introdução

As mudanças nos padrões climáticos observadas na época geológica recente, o Holoceno, têm sido apontadas como potenciais de impactos negativos na saúde humana, no bem-estar social e na economia. Essas mudanças globais podem ser observadas na aceleração dos processos de deglaciação, nas mudanças em margens costeiras, na temperatura média dos oceanos e nos impactos indiretos derivados, considerando como isso altera as condições de manutenção da biodiversidade (IPCC, 2014).

As interações humanas entre si e com o meio ambiente têm sido responsáveis por mudanças abruptas em escala regional, tais com observadas em ambientes lacustres e fluviais, e as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) após a industrialização global são apontadas como o principal seu vetor, sendo objeto de negociações internacionais nas quais diversos países se comprometeram a enfrentar o desafio da mitigação climática (CHIN, BEACH, et al., 2017, PORINCHU, HASKETT, et al., 2017, SCHMIDT, GONZALEZ, et al., 2018).

A tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS), nesse contexto, se apresenta como uma das componentes nas soluções climáticas, principalmente para o setor industrial indústrias devido a sua característica de se adaptar às condições de infraestrutura atuais rapidamente sem impacto significativo nas atividades econômicas desenvolvidas pelos agentes industriais que nela se apoiam (IEA, 2013, 2019, 2020a). Esta tecnologia pode ser aplicada para realização do processo de captura do dióxido de carbono atualmente lançado na atmosfera em fontes estacionárias de grande porte, por meio de modernização de suas plantas industriais, do consecutivo transporte e injeção do GEE em formações geológicas adequadas para o sequestro permanente (IEA, 2013).

Entretanto, o comprometimento dos diversos países na redução de suas emissões de GEE não avançam devido a uma miríade de fatores e os atores envolvidos no processo decisório, às interações dentro cadeia produtiva e entre diversos agentes, ou entre eles e outros setores adjacentes, o que causa uma distribuição de ganhos, receitas, custos e perdas a longo prazo pouco transparentes para a sociedade.

Essa alocação de responsabilidades, de benefícios e de custos ao longo das cadeias produtivas é demasiadamente complexa, especialmente em países pró políticas de mudanças climáticas. Elas incorporam variáveis exógenas à tomada de decisão dos agentes, que, ao mesmo tempo, são eles emissores relevantes de GEE e provedores bens essenciais para a sociedade, e proporcionam ganhos significativos de bem-estar, apesar silente ênfase nas políticas climáticas.

Este artigo, portanto, apresentará e discutirá uma visão histórica entre o diagnóstico das mudanças climáticas com base em dados geológicos e o processo de tomada de decisão pelos países frente ao aquecimento global, e discutirá as contribuições e os desafios da tecnologia CCS como ferramenta para participante do desafio de combate a mudanças climáticas.

Abordagem das mudanças climáticas a partir dos ciclos geológicos do carbono

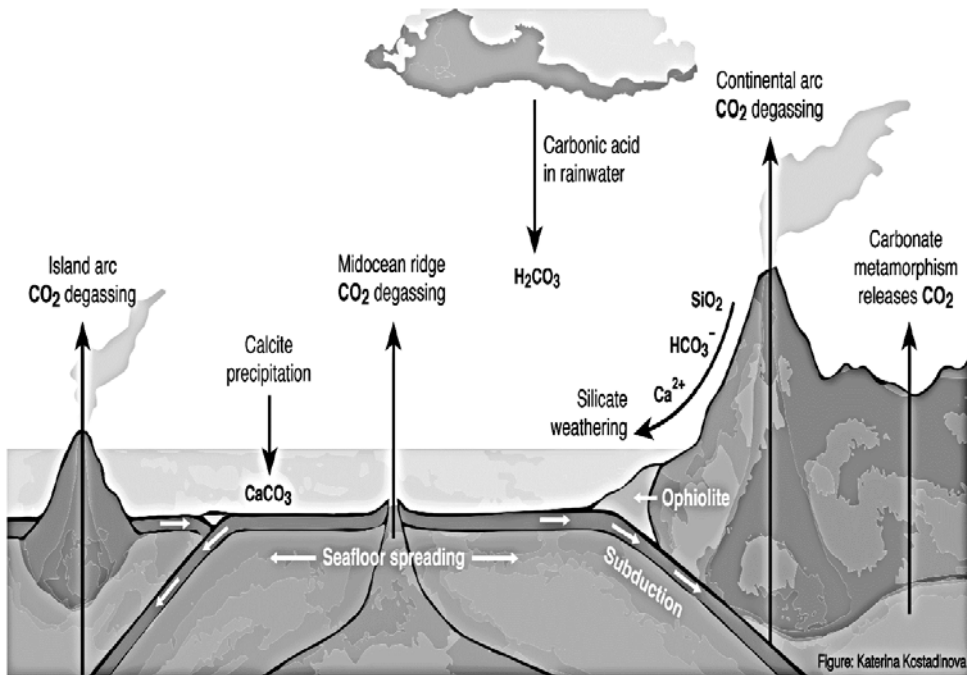
O ponto de partida da presente análise é como o dióxido de carbono entra na atmosfera e o mecanismo para a remoção que o faz retornar à crosta terrestre, aos oceanos ou ao solo.

O fluxo de carbono na crosta superior pode ser representado pelo fluxo de massa via processos metamórficos, que resulta a degaseificação de rochas crustais submetidas ao metamorfismo e na conseqüente migração do carbono na forma gasosa para a atmosfera. Por meio do processo de precipitação, ocorre a migração do carbono da atmosfera para a superfície continental e para os oceanos (forma iônica), e desse para o assoalho oceânico (forma sólida, como as fases minerais silicáticos), e vice-versa (BERNER, LASAGA, et al., 1983, CONDIE, 1997). Há também a contribuição dos processos tectônicos e do sistema biológico, fontes naturais de troca de carbono com demais ambientes portadores de carbono (CONDIE, 1997).

A Figura 1 ilustra o ciclo carbonato-silicato (ciclo do carbono inorgânico) cujos componentes essenciais nele representados são os elementos que controlam o sistema de equilíbrio do dióxido de carbono da zona crustal para a atmosfera.

A primeira consideração a ser destacada é como o dióxido de carbono sai da atmosfera e o mecanismo para removê-lo de volta a crosta, oceano ou solo.

Figura 1. Componentes do ciclo carbonato-silicato na crosta terrestre e as principais fontes para o sistema atmosférico. Os processos geológicos e biológicos representam os contribuintes maior importância para o fluxo de natural carbono



Fonte: KASTING (2019)

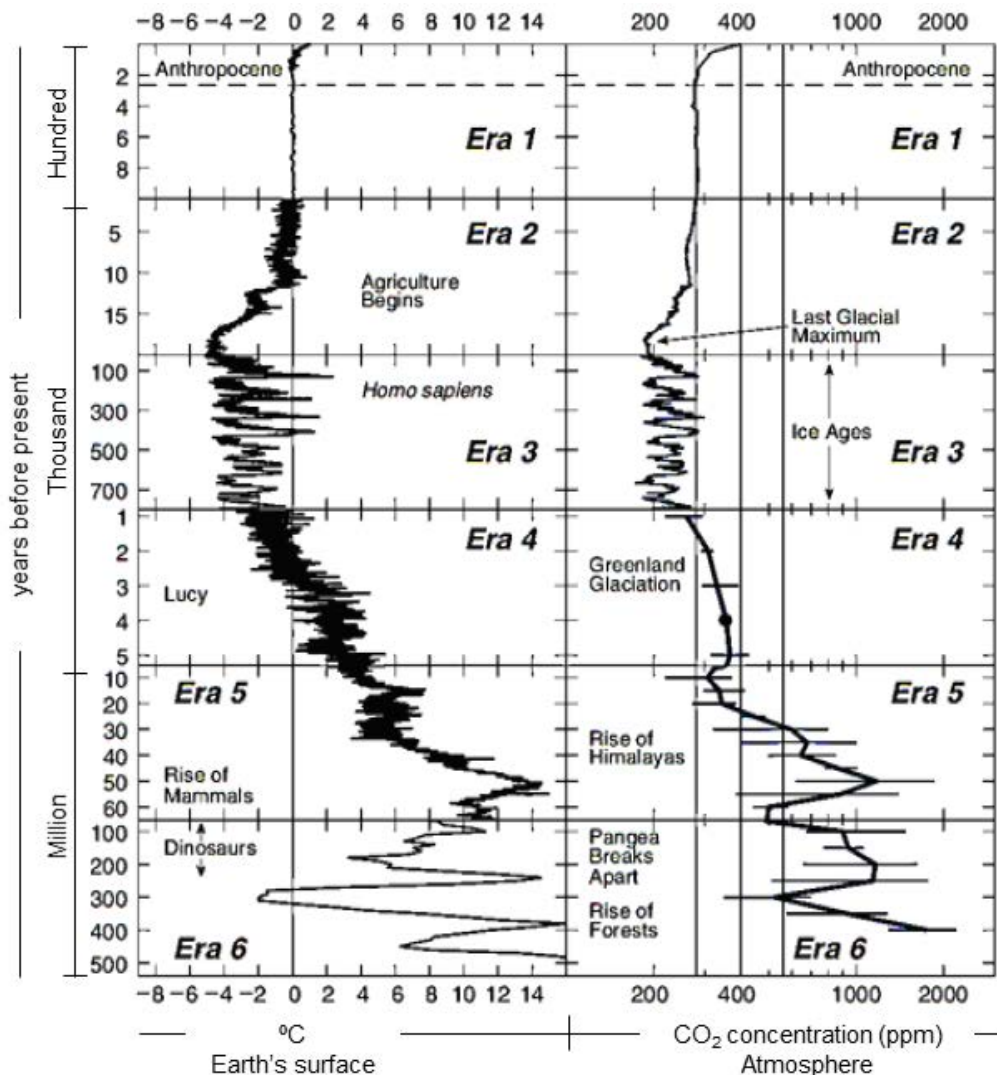
O processo metamórfico também contribui para o ciclo do carbono por meio das reações do tipo carbonato-silicato ou do processo de reciclagem de material. O dióxido de carbono migra na forma de $H_2O.CO_2$ no processo de precipitação, na forma molecular de um ácido que colabora para o processo de intemperismo de rochas superficiais, como os carbonatos, cujo aporte de carbono para atmosfera no longo prazo em é considerado reduzido, e, no curto prazo, colabora para o transporte de carbono ao oceano, além do transporte de outros subprodutos do intemperismo que auxiliam na precipitação de carbonatos pelas atividades biológicas, e, em seguida, completa o processo de retrabalhamento e transporte do carbono para zonas de subducção (KASTING, 2019).

O processo de degaseificação oriunda de vulcanismo permanece sendo importante fonte natural de dióxido de carbono e de outros gases para atmosfera e oceanos. Este mecanismo contribui para o aporte de material gasoso na atmosfera por meio de eventos tectônicos ao longo do tempo e diretamente no oceano por hidrotermalismo em vulcões submarinos (SANTANA-CASIANO, FRAILE-NUEZ, et al., 2016)

Entre os processos naturais, pode-se destacar aqueles vinculados ao vulcanismo como o responsável pelas súbitas elevações da concentração de dióxido de carbono na atmosfera durante o Ypresiano, no Eoceno (PEARSON, PALMER, 2000, STOREY,

DUNCAN, et al., 2007), e aqueles ligados a processos biológicos, como a transição para o ressurgimento da formação glacial polar e sua expansão na transição para o Oligoceno (PEARSON, FOSTER, et al., 2009, SPEELMAN, VAN KEMPEN, et al., 2009). As mudanças climáticas terrestres que ocorreram ao longo dos últimos 500 milhões de anos são ilustradas na Figura 2.

Figura 2. Evolução climática terrestre. Do lado esquerdo, a temperatura anômala da superfície da Terra considerando 0 °C equivalente à linha de base do período pré-industrial. O gráfico (direita) ilustra a concentração de dióxido de carbono na atmosfera ao longo da era geológica, os eventos críticos que a moldaram. A era cinco representa o Eoceno, no qual a concentração de dióxido de carbono atmosférico decresce de forma significativa



Fonte: Salawitch et al. (2017).

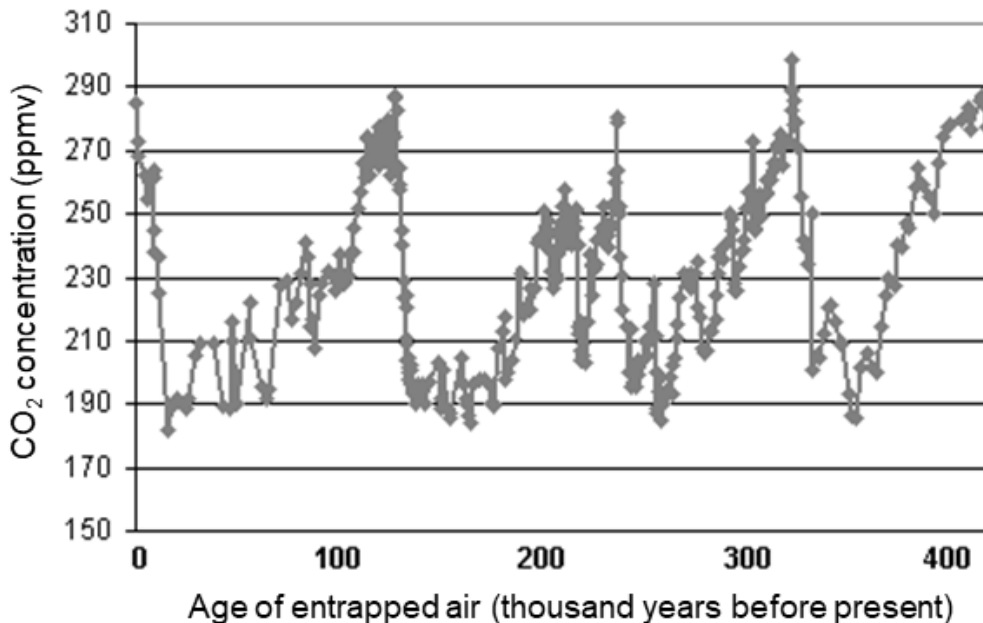
Como um sistema de equilíbrio no longo prazo, o ciclo do carbono tenderia a capturar CO₂ da atmosfera no oceano e nos depósitos inertes marinhos na forma mineral, por processo de dissolução, o que mitigaria o efeito da concentração de dióxido de carbono na atmosfera. No Antropoceno, no entanto, os combustíveis fósseis desempenharam um papel significativo na determinação da concentração de dióxido de carbono na atmosfera em um curto espaço de tempo, de modo que os sistemas preteritamente capazes de equilibrar o sistema de trocas não puderam absorver o novo estoque acumulado na atmosfera (CRUTZEN, 2002, PAUL J. CRUTZEN AND EUGENE F. STOERMER, 2000).

Os primeiros estudos que buscaram entender a mudança climática recente proporcionaram compreensão sobre a composição antiga da atmosfera com base em registros geológicos, e trouxeram resultados significativos (BARNOLA et al., 1987).

Por meio da análise de furo de sondagem de 2.077 metros de profundidade, na Geleira Vostok na Antártica, foi possível identificar que a concentração de dióxido de carbono ao longo do perfil amostrado estava correlacionada aos registros históricos de temperatura. A precisão da informação obtida permitiu correlacionar tal amostra de sondagem, em profundidade, com a composição atmosférica no tempo e com um ciclo glacial completo (BARNOLA et al., 1987, WUNSCH, 2004).

A pesquisa foi expandida por meio de nova amostragem de perfuração, com profundidade máxima alcançando 3.300 metros e correspondendo as idades máximas para moléculas de gelo e ar de 420.000 anos e 417.000 anos respectivamente, (ROTHMAN, 2002), similar a outros dados semelhantes encontrados em outros pontos de amostragem além do continente antártico (DEJI, YAO, et al., 2017, KLEIN, NOLAN, et al., 2016, PETIT, JOUZEL, et al., 1999, THOMPSON, 2000), todos corroborando a tese do aquecimento global (IPCC, 2006, SEIP, GRØN, et al., 2018, YAMAMOTO, KITAHARA, et al., 2012). Concisamente, observou-se bem definidos os ciclos glacial-interglaciais de periodicidade de 100.000 anos, em que a concentração de dióxido de carbono na atmosfera apresentava como teto até 300 partes por milhão (ppm) dentro de um ciclo glacial natural (Figura 3).

Figura 3. Concentração de dióxido de carbono do furo de perfuração Vostok, em partes por milhão em volume (ppmv). Os dados permitem ilustrar os últimos quatro ciclos glacial-interglaciais, em que a concentração variou entre 190 e 280 ppm de CO₂



Fonte: <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/graphics/vostok.co2.gif>. Acesso: 26 nov. 2020.

A compreensão das fontes antropogênicas de GEE nas era geológicas

A interação homem-Terra embutiu relevantes mudanças no meio ambiente ao ponto de trazer a proposta de discussão de uma nova divisão na carta estratigráfica geocronológica. Na carta atual, a época em corrente se enquadra no Holoceno, uma época iniciada na última glaciação, com aproximadamente dez mil anos, já contando com os efeitos da interação humana e do meio ambiente, porém, com proporção passível de serem negligenciáveis. Os processos agrícolas, o aumento da população global e a conseqüente urbanização, per se, poderiam motivar uma proposta de aperfeiçoamento da escala global, dentro do período ou para além do Holoceno. (ZALASIEWICZ, WATERS, et al., 2017).

As pesquisas científicas pretéritas permitem inferir a necessidade de uma melhor compreensão dos efeitos dessas intervenções da atividade humana sobre o meio ambiente no tempo e no espaço. Dentro dessa necessidade é que foi proposta uma subdivisão em na escala de tempo geológico, tendo como base uma descontinuidade marcada por isótopos de oxigênio em estalagmites da caverna Meghalaya na Índia,

e cuja causa encontrada foi um evento relacionado à mudanças abruptas das condições climáticas no início do Holoceno, marcados nos estágios/idades Granelândia, Northgrippian e Meghalayan – 11,7, 8,2 e 4,2 mil anos, respectivamente (MARSH, 1864, WALKER, HEAD, et al., 2018). Concomitantemente, a sugestão de incluir uma classificação geocronológica adequada às mudanças globais atuais, que acontecem mais rapidamente do que o usual observado no ciclo geológico global, foi discutida por pesquisas acadêmicas, mantendo critérios científicos semelhantes em termos de razoabilidade que cercaram as demais propostas de alteração na escala de tempo.

Um determinado *Global Boundary Stratotype Section and Point* (GSSP) representa o registro de um determinado estrato geológico passível de ser correlacionado globalmente, portanto, sem representar apenas uma mudança local ou regional nas condições de sua formação e deposição de sedimentos, assim, podendo tal marcador definir um ponto de referência em uma seção geológica e localidade específica, ou seja, um *Golden spike* (ZALASIEWICZ, WATERS, et al., 2017).

As discussões sobre a proposta de uma nova época geológica recente, o Antropoceno, surgiram como o período em que a exploração dos recursos naturais em número e per capita se expande de tal forma que modifica os registros geológicos futuros na forma de GSSP e, por exemplo, indica um grupo de mudanças climáticas incompatíveis com o comportamento natural que perdurará pelos próximos cinquenta mil anos (CRUTZEN, 2002, PAUL J. CRUTZEN AND EUGENE F. STOERMER, 2000).

A complexidade do tema levou à criação do *Anthropocene Working Group* (AWG) para fazer frente às questões de hierarquia e de marcadores de idade. De acordo com o AWG, essas discussões¹ abarcaram, também, alterações de concentrações de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso ao longo do tempo na atmosfera, bem como mudanças na razão isotópica entre carbono de origem continental e marinho, nos padrões físicos e como se conectam à atmosfera (ZALASIEWICZ, WATERS, et al., 2017).

Mesmo havendo efeitos da ação humana que antecederam os marcos do Antropoceno, para o AWG, somente em meados do século XX foi possível encontrar um marcador sincrônico e claro para ser utilizado como referência cronológica da transformadora influência do ser humano sobre os principais processos, físicos, biológicos e químicos, em uma escala global. Os resultados preliminares do Antropoceno sugerem se tratar de uma época hierarquicamente posicionada após o Holoceno, tendo como marcador temporal a metade do século XX, e como marcador geológico a precipitação de plutônio causada pela atividade humana e que afetou o albedo nas regiões polares (ZALASIEWICZ, WATERS, et al., 2017).

1 - Com base na recomendação preliminar do AWC, a proposta de uma nova época que virá após o Holoceno está em análise por cientistas da *International Union of Geological Sciences*. Até que não seja amplamente aceito, o Holoceno continua a ser oficialmente a época geológica atual. Informalmente, o Antropoceno tem sido usado para destacar o impacto diacrônico da atividade humana no globo terrestre. Este trabalho terá a liberdade de adotar o termo muito mais neste caminho informal.

Apesar desses propostas do AWG, as sugestões para um novo marcador no Antropoceno tendo como referência o final do século XVIII permanecem latentes, uma vez que representa o período de aumento da concentração global de dióxido de carbono e metano na atmosfera. (CRUTZEN, 2002). Apesar de a definição de uma nova época geológica permanecer aberta pelos geocientistas, ressalta-se que o crescimento das emissões de GEE após a era industrial é incontestemente relacionada com a atividade humana, passível de figurar como balizador de uma nova época geológica.

Desde 1950, se observa um aumento praticamente exponencial dos principais parâmetros socioeconômicos. Além dos níveis de urbanização e produção necessários para o novo perfil demográfico, o crescimento populacional atingiu níveis sem precedentes, e ocasionou o aumento significativo do consumo de fertilizantes, de energia, do turismo internacional, nos transportes, nas telecomunicações ou mesmo no uso de grandes barragens (STEFFEN, BROADGATE, et al., 2015).

Como derivação, se encontram mudanças ambientais em nível regional também ligadas à interação humana com o meio ambiente.

A influência das mudanças climáticas sobre o ecossistema aquático na região oeste dos Estados Unidos da América tem sido interpretada através da análise dos microfósseis Linkins e Grizzly Lakes, nos quais a taxa e a magnitude da renovação da fauna observada no início do século XX superou as das amostras mais antigas, resultando o aumento da produção orgânica devido ao processo de aquecimento (PORINCHU, HASKETT, et al., 2017). Outro exemplo são as mudanças no uso e ocupação do solo que podem levar a modificações relevantes em cursos fluviais. Estudando a carga sedimentar contida em vinte rios no oeste da China, observou-se que a proporção de terras cultivadas era diretamente proporcional ao aumento da carga sedimentar contemporânea em comparação com a carga sedimentar gerada (SCHMIDT, GONZALEZ, et al., 2018). Da mesma forma, existe uma ampla possibilidade de diagnóstico quanto às mudanças ambientais induzidas pelo homem, que permitem mudanças na tendência de aceleração dos efeitos da ação humana sobre o meio ambiente. (CHIN, BEACH, et al., 2017, STEFFEN, BROADGATE, et al., 2015).

Diante desse diagnóstico, os problemas climáticos passaram a ocupar espaço relevante na agenda governamental. Retomando o foco no aquecimento global, é possível compreender o surgimento do apelo por medidas de mitigação. Após o período industrial, a concentração de dióxido de carbono na atmosfera aumentou aproximadamente 50%, chegando a 420 ppm, especialmente devido ao incremento das últimas duas décadas. A atividade humana permanece entre os desafios contemporâneos alvo de medidas de enfrentamento e de engajamento pelos diversos agentes na busca de tecnologias que permitam a redução dos níveis de emissão de GEE e as mudanças nos padrões de produção e consumo para alcançar uma economia global de baixo carbono (IPCC, 2014).

Para tanto, a tecnologia de sequestro geológico de carbono, o CCS, está entre os mecanismos elegíveis para solucionar o efeito GEE de origem antropogênica, e como parte da solução para o enfrentamento das mudanças climáticas, essa tecnologia

posiciona-se dentro de um portfólio para reduzir as emissões de dióxido de carbono advinda de fontes estacionárias que utilizam combustíveis fósseis e de setores industriais elegíveis como *hard-to-abate emitters* (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2011, IEA, 2011, 2013, 2019).

No entanto, a complexa rota entre a aplicação conceitual do CCS e a efetiva implementação da tecnologia nas diversas cadeias produtivas, com efeitos econômicas globais e intersetoriais, observando como pode impactar as demais cadeias produtivas adjacentes, permanece como uma barreira decisiva e de difícil solução.

A contribuição da tecnologia de CCS para mitigação das mudanças climáticas

As emissões de GEE podem ser delimitadas, para fins desse artigo, em dois segmentos: emissões naturais e de origem antropogênica. As emissões naturais incluem todos os processos relacionados à atividade biológica, à vegetação nativa e aos processos naturais de queima, de reflorestamento e de decomposição de biomassa, incluso os processos diagenéticos e metamórficos geológicas (CONDIE, 1997, IPCC, 2014). As emissões antrópicas, por sua vez, abrangem aquelas resultantes da atividade humana, especialmente a queima de hidrocarbonetos, vinculadas à agricultura, desmatamento, a mudanças no uso da terra e aos processos industriais.

Dentro das fontes antrópicas, as emissões de GEE podem ocorrer concentradas em fontes estacionárias, como usinas termelétricas, grandes clusters industriais dos setores químicos, petroquímicos, de refino e fertilizantes, indústria do cimento e da siderurgia, representando elevados níveis de emissão em determinada localização geográfica, por isso, estacionárias (MCQUEEN, WOODALL, et al., 2020, MILLAR, ALLEN, 2020).

Nos setores supracitados, pode haver configuração técnica e econômica que se caracterizam pela complexidade de se promover a redução de suas emissões de forma econômica, sem que haja efeitos deletérios ao negócio, per se, como a perda de resiliência significativas alterações em seus arcabouços legais, regulatórios e normativos, pois o capital afundado já não lhes permite pivotar suas atividades para uma economia de baixo carbono tão facilmente, e são qualificados como setores de difícil descarbonização, ou apenas *hard-to-abate*.

Alguns segmentos da indústria e o setor de energia podem ser qualificados diretamente em ambos os critérios, como fontes estacionários e de *hard-to-abate*. Eles encontram dificuldades para implementarem processos de descarbonização de suas cadeias produtivas, uma vez que a competitividade regional ou global depende da adoção dos mesmos padrões pelos concorrentes internacionais, ou seja, uma resolução complexa e dependente de acordos climáticos internacionais efetivos, com poder de alterar o comportamento dos agentes.

A partir da 21^a Conferência das Partes (COP) – o Acordo de Paris –, os signatários retomaram a necessidade de promover mecanismos de incentivo aos segmentos econômico considerando suas peculiaridades, especialmente para projetos de grande

porte que, sozinhos, são incapacidade de alterar comportamentos de forma a adequá-los adequados aos padrões institucionais compatíveis com o combate às mudanças climáticas, a menos que haja novos fatores externos que lhes permita lidar com custos e riscos no longo prazo.

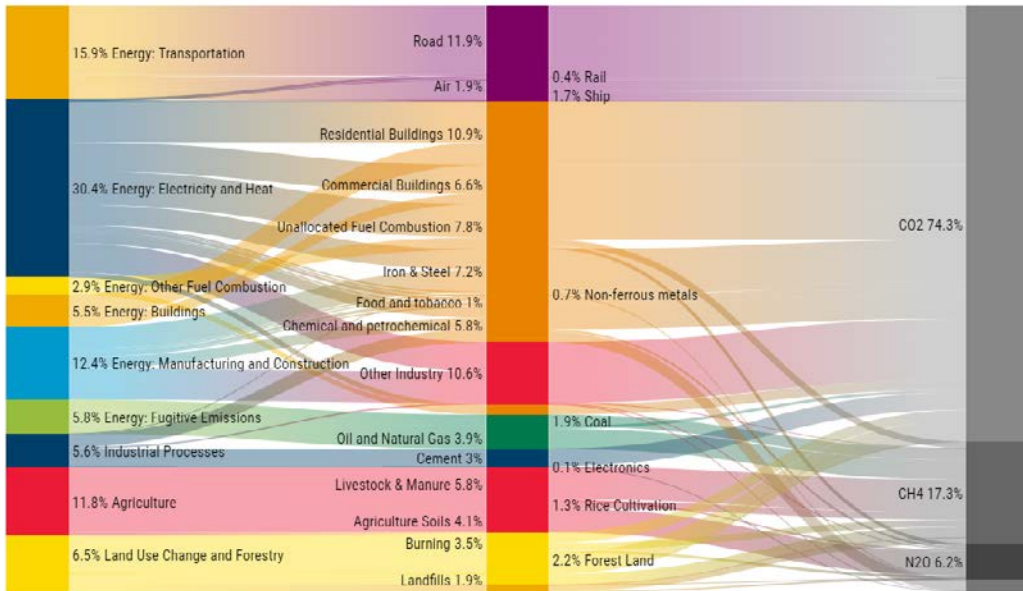
Em 2016, o total de emissões anuais foi de aproximadamente 49,04 GtCO₂eq, sendo 33,1 GtCO₂eq dos setores de energia e industrial distribuídos em diversos setores (UNCC, 2019), e esse montante traz à baila a dimensão do desafio sob ótica visão global a ser enfrentado, conforme ilustrado na Figura 4. Nela, há o acoplamento das emissões por fonte e setor no lado esquerdo, permitindo se inferir ser parte do elo à montante das cadeias produtivas, entrelaçando, por exemplo, setores de energia e transporte. À direita, o gráfico ilustra as emissões por atividade produtiva em seu uso final, no lado do consumo, à jusante do elo de produção.

Como corolário, os diversos acordos que buscam aperfeiçoar o setor de energia em seu elo à montante pode resultar um efeito disseminador positivo nos demais setores de uso final. Além disso, as intervenções nos segmentos de uso final podem afetar a pegada de carbono nos consumidores, que seriam, em interpretação elástica, ao mesmo tempo os principais impactados e responsabilizados pelas emissões de toda a cadeia a montante, mesmo quando não possuem poder decisório.

Os setores do tipo *hard-to-abate*, como a siderurgia, a indústria cimenteira, usinas termoelétricas, e os diversos modais de transporte correspondem juntos por aproximadamente 27% das emissões AFOLU², se encaixando como indústrias de elevado custo para realização da descarbonização no processo produtivo, como ilustrado na Figura 5 (DAVIS, LEWIS, et al., 2018).

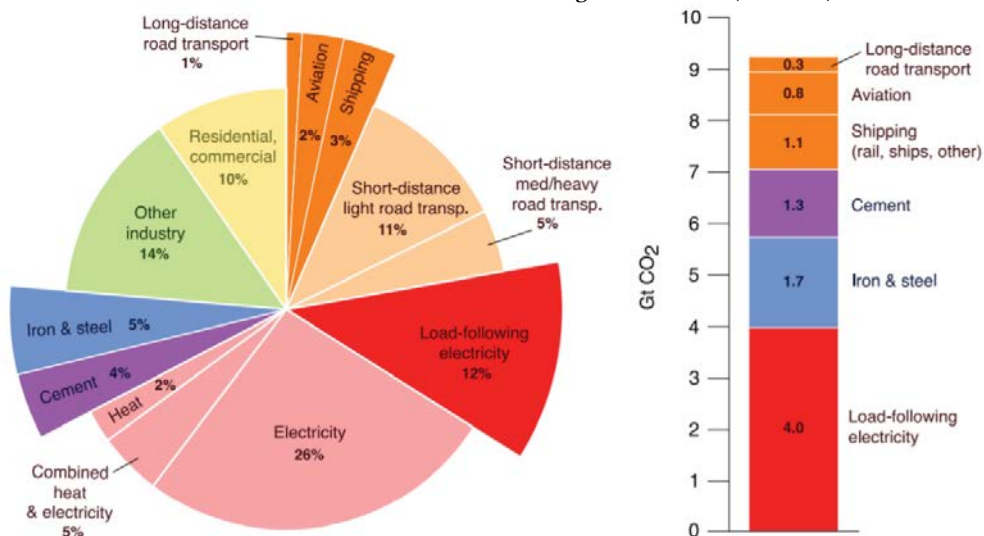
2 - AFOLU: setor de Agricultura, Florestas e Uso do solo

Figura 4. Gráfico de correlação entre as emissões por setor de origem, a esquerda (montante), e usos finais, a direita (jusante)



Fonte:HERZOG (2009)

Figura 5. Distribuição das emissões de GEE (%) com base nos usos finais. As partes destacadas em vermelho, laranja, azul e roxo se referem aos setores cujo processo de descarbonização pode ser complexo e custoso. A solução de mitigação no contexto atual, considerando parâmetros técnicos e econômicos, abarca a adoção da tecnologia de CCS nas plantas industriais e a compensação via sumidouros naturais ou via bioenergia com CCS (BECCS)³



Fonte: DAVIS, LEWIS, et al. (2018).

Em termos de custo, as diversas soluções são aplicadas como forma de utilizar mecanismos de eficiência energética, de aumentar a produtividade no segmento de geração de energia e nos processos industriais, e de substituir os combustíveis fósseis por opções limpas (renováveis ou não), ou menos poluentes, como a troca de carvão mineral por gás natural. (IEA, 2017, PEE, PINNER, et al., 2018).

Para metas ambiciosas estabelecidas por países desenvolvidos, por exemplo, metas de emissões líquidas zero estabelecidas pela União Europeia e pelo Reino Unido, é necessária uma intervenção efetiva para antes que seja ventilado o gás para atmosfera, e seu consecutivo sequestro geológico. Para tanto, a tecnologia de CCS se apresenta como fator crítico potencialmente contribuindo com até 14% da redução total das emissões GEE no cenário de referência de 2060', majoritariamente em fontes estacionárias economicamente viáveis (IEA, 2019, 2020b, a).

Todavia, é fundamental que esses países aperfeiçoem e adequem suas normas legais e institucionais para estimular o desenvolvimento do CCS nestes segmentos para, uma vez que a ausência de incentivos provavelmente pode desencorajar o comportamento da adoção de padrões compatíveis com uma economia com baixos carbono nas cadeias

3 - BECCS: Bioenergia com CCS.

à montante.

Além da definição de um normativos específicos, é necessário também adequar redes de governança, de coordenação e de cooperação entre os países para compreender e parametrizar as práticas aceitáveis na condução das operações e dos negócios necessárias ao alcance da escala necessária para maturação do segmento de CCS como negócio (ALLINSON, BURT, et al., 2017, IEA, 2017).

Portanto, acordos internacionais no âmbito da pauta climática podem levar, a priori, a mudanças no comportamento dos tomadores de decisão por meio de soft power (FALKNER, 2016). Posteriormente, esses agentes podem ser impelidos a realizar novas mudanças nos marcos legais, institucionais e normativos sob suas jurisdições com vistas a implementar diretrizes de longo prazo que almejem a meta de uma economia de baixo carbono.

Por meio da mudança de comportamento dos diversos agentes junto às cadeias de produção e consumo, lastreada em tais incentivos supracitados e em punições para redução dos custos em geral gerais para a sociedade, pode se almejar a divisão equitativa de deveres, dentro da capacidade tributária e creditícia das partes envolvidas (países) nos tratados internacional, de forma harmoniosa entre as gerações presentes e futuras (FALKNER, 2016).

Conclusões

Estudos pioneiros dos efeitos da atividade humana sobre o clima da global, principalmente quando comparados ao rápido crescimento após o período industrial, fez emergir preocupações no âmbito político sobre as mudanças climáticas causadas pelo aumento de GEE no Antropoceno e cuja trajetória cumulativa pode se tornar irreversível devido à importância das atividades econômicas dependentes dos setores energético e industriais (BARNOLA et al., 1987, IDSO, 1988, SEIP, GRØN, et al., 2018).

A partir dessas discussões na sociedade, diversos países se engajaram e adotaram decisões coerentes com o caminho de redução tais emissões.

A forma de incorporação dessas decisões se materializou por meio dos acordos internacionais, sendo o mais relevante o Acordo de Paris. No entanto, eles não foram eficazes em limitar as emissões até a presente data. A complexidade ocorre porque as fontes de emissão não podem ser comparáveis diretamente, sem ajustes, haja vista que haver diferentes custos em cada um desses elos, assim como a maturidade dos projetos de CCS, e o acesso a recursos financeiros para mudar as instituições estabelecidas segundo o *business-as-usual*, para além dos arcabouços contratuais, jurídicos e institucionais envolvidos.

A complexidade pode aumentar naqueles setores cujos mecanismos de redução de emissões de GEE eficiente economicamente tende a ser uma escolha incompleta ou mesmo inatingível globalmente. Tais grupos, uma vez que os governos tentem solucionar os setores *hard-to-abate* como cadeias produtivas maduras e complexas, tentam barganhar ante os agentes públicos envolvidos como forma postergar adoção as soluções disponíveis.

Para tanto, grupos organizados com interesses bem definidos têm se caracterizado pela concentração de benefícios nos elo dos produtores e a consequente repartição de custos com o restante da sociedade, mesmo quando os interesses conflitam com o corpo político no curto prazo, e as incertezas secundárias sobre as questões climáticas lhes possibilitam apenas consensos políticos sob forma de solução incompleta. Desse, surgiu uma necessidade urgente de estabelecer regulamentação de incentivos econômicos que disponibilizem recursos adequados às realidades territoriais e às limitações das instituições nacionais e internacionais de mudanças climáticas vigentes. Para eles, a solução que se mostra viável passa pela adoção do sequestro de carbono via CCS, diretamente em suas plantas emissoras de GEE ou por compensação indireta via BECCS técnica ou econômica inviável.

Aos governos, portanto, cabe a responsabilidade de estabelecer regras institucionais e de arbitrar a distribuição de recursos disponíveis, os interesses entre os grupos, os ajustes de alocação de custos temporalmente e, assim, lidar com a circunstância da lacuna temporal que ocorre entre a causa do problema (emissões) e as consequência (aquecimento global).

Agradecimentos

Agradecemos o apoio do RCGI - Research Centre for Greenhouse Gas Innovation, localizado na Universidade de São Paulo (USP) e financiado pela FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (2014/50279-4 e 2020/15230-5) e Shell Brasil, e a importância estratégica do apoio dado pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) através do incentivo regulatório associado ao investimento de recursos oriundos das Cláusulas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, pelos recursos que viabilizaram este estudo; e à Universidade de São Paulo, especificamente à Faculdade de Economia e ao Instituto de Energia e Meio Ambiente, pelas oportunidades de troca de conhecimentos que possibilitaram a coleta de dados e informações para sua elaboração. Agradecemos o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas na Cláusula de P&D&I da Resolução ANP nº 50/2015 (PRH 33.1 - Referente ao EDITAL Nº1/2018/PRH-ANP; Convênio FINEP/FUSP/USP Ref. 0443/19).

Referências

- Allinson, Ken et al. 2017. “Best Practice for Transitioning from Carbon Dioxide (CO₂) Enhanced Oil Recovery EOR to CO₂ Storage.” In *Energy Procedia*,
- Barnola, J.M., Y.S. Korotrevitch, and C. Lorius. 1987. “Vostok Ice Core: A 160, 000 Years Record of Atmospheric CO₂.” *Nature*, 329, p. 408-414.
- Berner, R. A., A. C. Lasaga, and R. M. Garrels. 1983. “The Carbonate-Silicate Geochemical

Cycle and Its Effect on Atmospheric Carbon Dioxide over the Past 100 Million Years.” *American Journal of Science* 283(7): 641–83.

Chin, Anne, Timothy Beach, Sheryl Luzzadder-Beach, and William D. Solecki. 2017. “Challenges of the ‘Anthropocene.’” *Anthropocene* 20: 1–3.

Condie, Kent C. (New Mexico Institute of Mining and Technology). 1997. *Plate Tectonics and Crustal Evolution Plate Tectonics and Crustal Evolution*. 4o Edition. Socorro, New Mexico.

Crutzen, Paul J. 2002. “Geology of Mankind.” *Nature* 415(6867): 23.

Davis, Steven J. et al. 2018. “Net-Zero Emissions Energy Systems.” *Science* 360(6396).

Deji et al. 2017. “Warming and Wetting Climate during Last Century Revealed by an Ice Core in Northwest Tibetan Plateau.” *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 487 (September): 270–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.09.009>.

European Environment Agency. 2011. 34 COM A Roadmap for Moving to a Competitive Low Carbon Economy in 2050. http://ec.europa.eu/clima/documentation/roadmap/docs/com_2011_112_en.pdf.

Falkner, Robert. 2016. “The Paris Agreement and the New Logic of International Climate Politics.” *International Affairs* 92(5): 1107–25.

Herzog, Timothy. 2009. “World Greenhouse Gas Emissions in 2005 | World Resources Institute.” WRI Working Paper. World Resources Institute: 2005–9. <http://www.wri.org/publication/world-greenhouse-gas-emissions-2005>.

Idso, Sherwood B. 1988. “Carbon Dioxide and Climate in the Vostok Ice Core.” *Atmospheric Environment (1967)* 22(10): 2341–42.

IEA. 2011. *SpringerReference Energy Technology Roadmaps*.

———. 2013. *IEA, PARIS Technology Roadmap Carbon Capture and Storage - 2013 Edition*.

———. 2017. *IEA Energy Technology Perspectives 2017*. PARIS. <https://webstore.iea.org/download/summary/237?fileName=English-ETP-2017-ES.pdf>.

———. 2019. *Transforming Industry through CCUS Transforming Industry through CCUS*.

———. 2020a. *Energy Technology Perspectives 2020 - Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage Energy Technology Perspectives 2020 - Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage*. Paris. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>.

———. 2020b. *World Energy Outlook 2020*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.

IPCC. 2006. 114 *Ippc Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Elsevier. <https://>

ci.nii.ac.jp/naid/110004000227.

———. 2014. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change*. Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change.

Kasting, James F. 2019. “The Goldilocks Planet? How Silicate Weathering Maintains Earth ‘Just Right.’” *Elements* 15(4): 235–40.

Klein, E. S. et al. 2016. “McCall Glacier Record of Arctic Climate Change: Interpreting a Northern Alaska Ice Core with Regional Water Isotopes.” *Quaternary Science Reviews* 131: 274–84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.07.030>.

Marsh, George Perkins. 1864. *Man and Nature or, Physical Geography as Modified by Human Action*. NEW YORK: NEW YORK: CHARLES SCRIBNER & CO., No. 654 BROADWAY. 1807.

McQueen, Noah, Caleb M. Woodall, Peter Psarras, and Jennifer Wilcox. 2020. 2020-Janua RSC Energy and Environment Series Chapter 11: CCS in the Iron and Steel Industry.

Millar, R. J., and M. R. Allen. 2020. “Chapter 2: Understanding the Role of CCS Deployment in Meeting Ambitious Climate Goals.” RSC Energy and Environment Series 2020-Janua(26): 8–35.

Paul J. Crutzen and Eugene F. Stoermer. 2000. “The Anthropocene.” *Global Change Newsletter*, *Global Change Newsletter* (41): 239–46.

Pearson, Paul N., Gavin L. Foster, and Bridget S. Wade. 2009. “Atmospheric Carbon Dioxide through the Eocene-Oligocene Climate Transition.” *Nature* 461(7267): 1110–13.

Pearson, Paul N., and Martin R. Palmer. 2000. “Atmospheric Carbon Dioxide Concentrations over the Past 60 Million Years.” *Nature* 406(6797): 695–99.

Pee, Arnout de et al. 2018. “Decarbonization of Industrial Sectors: The next Frontier.” McKinsey & Company (June): 68. <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business Functions/Sustainability and Resource Productivity/Our Insights/How industry can move toward a low carbon future/Decarbonization-of-industrial-sectors-The-next-frontier.ashx>.

Petit, J. R. et al. 1999. “Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 Years from the Vostok Ice Core, Antarctica The Recent Completion of Drilling at Vostok Station in East.” *Nature* 399: 429–36. www.nature.com.

Porinchu, D. F., D. R. Haskett, and S. A. Reinemann. 2017. “Biostratigraphic Evidence of Human Modification of High Elevation Aquatic Ecosystems in the Intermountain West of the United States.” *Anthropocene* 20: 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.08.003>.

Rothman, Daniel H. 2002. “Atmospheric Carbon Dioxide Levels for the Last 500 Million Years.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99(7): 4167–71.

- Salawitch, Ross J. et al. 2017. Paris Climate Agreement: Beacon of Hope. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-46939-3>.
- Santana-Casiano, J. M. et al. 2016. "Significant Discharge of CO₂ from Hydrothermalism Associated with the Submarine Volcano of El Hierro Island." *Scientific Reports* 6(April): 1–9.
- Schmidt, Amanda H. et al. 2018. "Agricultural Land Use Doubled Sediment Loads in Western China's Rivers." *Anthropocene* 21: 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.10.002>.
- Seip, Knut L., Øyvind Grøn, and Hui Wang. 2018. "Carbon Dioxide Precedes Temperature Change during Short-Term Pauses in Multi-Millennial Palaeoclimate Records." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 506(June): 101–11. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.06.021>.
- Speelman, E. N. et al. 2009. "The Eocene Arctic Azolla Bloom: Environmental Conditions, Productivity and Carbon Drawdown." *Geobiology*.
- Steffen, Will et al. 2015. "The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration." *Anthropocene Review* 2(1): 81–98.
- Storey, Michael, Robert A. Duncan, and Carl C. Swisher. 2007. "Paleocene-Eocene Thermal Maximum and the Opening of the Northeast Atlantic." *Science* 316(5824): 587–89. <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1135274>.
- Thompson, Lonnie G. 2000. "Ice Core Evidence for Climate Change in the Tropics: Implications for Our Future." *Quaternary Science Reviews* 19(1–5): 19–35.
- UNCC. 2019. "Climate Action and Support Trends." United Nations Climate Change Secretariat: 34. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Climate_Action_Support_Trends_2019.pdf.
- Walker, Mike et al. 2018. "Formal Ratification of the Subdivision of the Holocene Series/ Epoch (Quaternary System/Period): Two New Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) and Three New Stages/ Subseries." *Episodes* 41(4): 213–23.
- Wunsch, Carl. 2004. "Quantitative Estimate of the Milankovitch-Forced Contribution to Observed Quaternary Climate Change." *Quaternary Science Reviews* 23(9–10): 1001–12. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0277379104000575>.
- Yamamoto, Yuuki, Naoki Kitahara, and Makoto Kano. 2012. "Long Memory Effect of Past Climate Change in Vostok Ice Core Records." *Thermochimica Acta* 532: 41–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2011.11.033>.
- Zalasiewicz, Jan et al. 2017. "The Working Group on the Anthropocene: Summary of Evidence and Interim Recommendations." *Anthropocene* 19(August): 55–60.

Submetido

em:09/04/2021

Aceito em: 04/12/2021

2022;25:e00361

Israel Lacerda de Araujo

✉ israel@senado.leg.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5323-4666>

Submetido em: 09/04/2021

Aceito em: 04/12/2021

2022;25:e00361

Hirdan Katarina de Medeiros Costa

✉ hirdan@usp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5106-6251>

Zen A. Makuch

✉ z.makuch@imperial.ac.uk

El cambio climático y la contribución de la tecnología de CCS a los desafíos de la mitigación del clima

Israel Lacerda de Araujo
Hirdan Katarina de Medeiros Costa
Zen Makuch

Resumen: El contemporáneo ha sido enfrentar el aumento de gases de efecto Invernadero (GEI) postindustrial, tema de los esfuerzos internacionales para mitigar efectos del clima. Este trabajo objetiva discutir el tema principal desde la perspectiva de los cambios geológicos a largo plazo, y cómo la tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CCS) puede contribuir a resolver el desafío climático. La metodología se basa en una revisión literaria de CCS y datos geológicos. El resultado muestra que la actividad humana en materia de GEI ha sido vector para definir el Antropoceno como una era geológica, y ha generado inquietudes políticas y acuerdos climáticos internacionales, que fomentan mejoras legales, institucionales y normativas para enfrentar los desafíos de implementarlo CCS. Concluye con la responsabilidad del poder público como agente que arbitra reglas y establece los recursos disponibles, los intereses involucrados y los ajustes de costos en el tiempo a los empleados remunerados

São Paulo. Vol. 25, 2022

Artículo original

Palabras-clave: Cambio climático, medidas de mitigación, tecnología CCS, fuentes antropogénicas de gases de efecto invernadero.

Climate change review and the CCS technology contribution to the climate mitigation challenges

Israel Lacerda de Araujo
Hirdan Katarina de Medeiros Costa
Zen Makuch

Abstract: The main issue in this century were the increasing greenhouse gases (GHG) emissions after the industrial cycle, and it became international concerns related to climate mitigation challenges. Thus, our focus is to discuss a historical view between climate change diagnosis and how carbon capture and storage (CCS) technology may contribute to mitigate climate change challenges. Our methodology is a literature review of technical and economic questions of CCS and the analysis based on geological data. Results show anthropogenic GHG sources' geological view from chronologic era highlighted how human interaction with the environment climate conditions, and international climate agreements may encourage changes in new legal, institutional, and normative frameworks under jurisdictions and deal with the challenges for implementing CCS technology via soft power. Therefore, we conclude that governments are responsible for arbitrating and establishing the available resources, the interests between the groups, adjusting costs over time to those they will fund.

São Paulo. Vol. 25, 2022

Original Article

Keywords: Climate change; mitigation measures; CCS technology; anthropogenic GHG's source.