

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS

FABIO LOPES GEMELLI

**OS IMPACTOS DO USO DA GEOENGENHARIA  
NOS SISTEMAS HUMANOS**

Porto Alegre

2020

FABIO LOPES GEMELLI

**OS IMPACTOS DO USO DA GEOENGENHARIA  
NOS SISTEMAS HUMANOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à Faculdade de Ciências Econômicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Economia.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Rumi Regina Kubo

Porto Alegre

2020

### CIP - Catalogação na Publicação

Gemelli, Fabio Lopes  
Os impactos do uso da geoengenharia nos sistemas humanos / Fabio Lopes Gemelli. -- 2020.  
55 f.  
Orientadora: Rumi Regina Kubo.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade  
de Ciências Econômicas, Curso de Ciências Econômicas,  
Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Geoengenharia. 2. Aquecimento Global. 3.  
Mudanças Climáticas. 4. Gerenciamento de Radiação  
Solar. 5. Captura de carbono. I. Kubo, Rumi Regina,  
orient. II. Título.

FABIO LOPES GEMELLI

**OS IMPACTOS DO USO DA GEOENGENHARIA  
NOS SISTEMAS HUMANOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à Faculdade de Ciências Econômicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel Economia.

Aprovado em: 17 de novembro de 2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Fabian Scholze Domingues - UFRGS

---

Prof. Dr. Eduardo Ernesto Filippi - UFRGS

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Rumi Regina Kubo -UFRGS (orientadora)

Ao embaixador Alexi de Sadesky

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a mãe e a sorte que me acompanham.

*“Nothing vast enters the life of mortals without a curse.”*

*— Sophocles*

## RESUMO

Os impactos das mudanças climáticas nos sistemas humanos pela sua complexidade, abrangência, escopo e risco existencial, se revelam como um dos grandes temas de estudo desta geração. Aqui se pretende investigar uma secção desse universo, direcionando nosso escopo para os impactos nos sistemas humanos em dimensões em que ocorre o uso de tecnologias que pretendem intervir em larga escala nos ecossistemas a fim de mitigar o aquecimento global, isto é: cenários em que ocorre a aplicação de geoengenharia. A tecnologia para sua aplicação em alguns casos é simples, porém seus efeitos agregados, tanto nos sistemas naturais quanto nos sistemas humanos, ainda são desconhecidos. A fim de sintetizar o conhecimento do campo, balizado em revisões anteriores (CALDEIRA; BALA, 2017; MACMARTIN *et al.*, 2016; VAUGHAN; LENTON, 2011), realizamos uma revisão bibliográfica dos impactos que o uso dessa técnica acarretaria aos sistemas humanos. Conclui-se que sua aplicação teria um efeito global, possivelmente alterando a evolução dos sistemas climáticos de forma permanente além de incentivar a continuidade das emissões. O campo ainda está em sua infância e mais estudos são necessários antes de sua aplicação ser considerada como política ambiental.

Palavras-chave: Geoengenharia. Aquecimento Global. Mudanças Climáticas. Gerenciamento de Radiação Solar. Captura de Carbono.



## **ABSTRACT**

The impacts of climate change on human systems due to their complexity, scope and existential threat, reveal themselves as one of the major study topics of this generation. Here we intend to investigate a section of this universe, directing our scope to the impacts on human systems in dimensions where the use of technologies that intend to intervene on a large scale in ecosystems in order to mitigate global warming occurs, that is: scenarios in which there are use of geoengineering. The technology for its application in some cases is simple, but its aggregate effects, both in natural and human systems, are still unknown. In order to synthesize the knowledge of the field, based on previous reviews (CALDEIRA; BALA, 2017; MACMARTIN et al., 2016; VAUGHAN; LENTON, 2011), we conducted a bibliographic review of the impacts that the use of this technique would have on human systems. It is concluded that its application would have a global effect, possibly altering the evolution of climate systems permanently in addition to encouraging the continuity of emissions. The field is still in its infancy and further studies are needed before its application is considered as an environmental policy.

keywords: Geoengineering, Global Warming. Climate Change. Solar Radiation Management. Carbon Capture.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Crescimento percentual acumulado de emissões de CO <sub>2</sub> , consumo energético, PIB e população.....	16
Figura 2 – Tendências de emissões de CO <sub>2</sub> .....	20

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Comparação de Técnicas de Captura de CO <sub>2</sub> .....	26
Quadro 2 – Comparação de Técnicas de Gerenciamento de Radiação Solar.....	29

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 GEOENGENHARIA E A QUESTÃO AMBIENTAL .....</b>	<b>15</b>
<b>3 REVISÃO HISTÓRICA E TÉCNICAS.....</b>	<b>22</b>
<b>4 ÚLTIMAS DÉCADAS DE AVANÇO .....</b>	<b>32</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>42</b>
<b>APÊNDICE A – TERMOS-CHAVE .....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Caminhamos para o confronto de uma das contradições da expressão moderna do capitalismo. Partindo de uma ótica materialista, poderia se argumentar que existem dois pontos de intersecção entre a natureza e a manutenção do desenvolvimento capitalista. O primeiro é que existe uma necessidade de ou abandonar os objetivos de corte de emissões ou desacoplar o crescimento econômico do consumo energético. Caso contrário, até mesmo com um crescimento moderado iríamos alcançar um teto no tamanho da economia devido às leis da termodinâmica (HEIN; RUDELLE, 2020). O segundo é que apesar de avanços recentes, a produção agrícola global ainda está sujeita aos ciclos naturais (BOEHLJE, 1996; URBAN, 1991). Essas duas intersecções formam uma contradição sistêmica que ameaça o processo de crescimento. O desafio aqui é conciliar esse crescimento com os limites físicos do planeta, que é contido por limites energéticos na presença de restrições de emissões e ao mesmo tempo expandir uma produção agrícola que depende largamente de condições específicas para a operação.

Esse é o tamanho do desafio a ser superado nas próximas décadas. Os sistemas naturais não mais são capazes de se recompor em velocidade suficiente para permitir a perpetuação do sistema de produção corrente. Em alguma medida, esse confronto já ocorre atualmente, além da poluição a que, em menor ou maior grau, todos somos expostos de forma crescente, o surgimento, em números cada vez maiores, de pessoas deslocadas internamente por conta de desastres ambientais. Segundo o IDMC (2019), este número chega a cerca de 16,1 milhões de pessoas somente em 2019, e a projeções de aumento dos refugiados ambientais a uma escala nunca antes vista (ATAPATTU, 2020), podendo alcançar 140 milhões de pessoas até 2050 (RIGAUD *et al.*, 2018), evidencia a evolução desse cenário. Uma das maneiras de abordar, ainda que parcialmente, esse problema – considerado uma das maiores ameaças à continuidade da civilização por conta de uma acelerada extinção de espécies que sustentam ecossistemas provedores de serviços caros à sociedade (EHRlich; EHRlich, 2013) –, se dá, possivelmente, através da geoengenharia, intervindo diretamente nos ecossistemas para alterar suas características de forma intencional e em escala global, mantendo as qualidades que nos são úteis da forma mais econômica possível, incorporando mais um domínio à lógica do mercado.

A expressão moderna mais óbvia do impacto humano se materializou através da revolução industrial possibilitando a dissociação parcial entre o sistema produtivo e o sistema natural. Essa dissociação aliada à produção em um volume inédito gerou uma demanda crescente por insumos, quebrando um equilíbrio de ciclos naturais de reposição, como por exemplo, o

desmatamento para produção de combustível. Entretanto, mudanças climáticas a partir de ações humanas não são um fenômeno novo. Pongratz *et al.* (2011) relacionam eventos pré-industriais que levaram a uma diminuição na intensidade agrícola seguido de uma diminuição populacional como a peste negra na Europa, a conquista europeia das Américas, os ataques Manchu na China e, especialmente, as invasões mongóis na China. Pongratz *et al.* (2011) infere esse fenômeno a partir da diminuição da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, uma vez que, por causa da diminuição populacional causada por guerras e pandemias, a oferta de produtos agrícolas diminuiu e com ela a área plantada, o que por sua vez permitiu uma regeneração das florestas, aumentando a absorção de carbono das regiões, evidenciando que a humanidade tem um impacto relevante no ambiente mesmo em estágios históricos pré-industriais.

Tendo em vista a definição de geoengenharia observada em Keith (2000), como a manipulação intencional e em larga escala do ambiente para mitigar os efeitos do aquecimento global ou como pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, na sigla em inglês da US Environmental Protection Agency) (BICKEL; LANE, 2018) com a modificação intencional do ambiente da Terra a fim de promover habitabilidade, fica clara a importância deste estudo quando partimos de uma ótica utilitarista: por sua escala global, sua atualidade e pela ameaça existencial à expressão corrente do tecido social. Por isso, pretendemos realizar um apanhado histórico desde a compreensão dos mecanismos naturais, que mais tarde viriam a inspirar a tecnologia para o controle do meio ambiente através da injeção de aerossóis na atmosfera, em seguida percorrer o surgimento do campo em meados do século XX, momento em que surgem as primeiras considerações de aplicação de geoengenharia, uma modesta fagulha que apesar de inspirar as gerações futuras de pesquisadores não sustentou o desenvolvimento do campo de pesquisa por si só, e por fim desenvolver uma panorâmica do estado atual desse campo.

Partindo da hipótese de que o uso de geoengenharia pode vir a desempenhar um papel central na conservação da sociedade humana e seu status quo (GUNDERSON; PETERSEN; STUART, 2018; GUNDERSON; STUART; PETERSEN, 2020), e uma vez que os danos causados aos ecossistemas que nos subsidiam crescem, ainda que de forma concomitante aos esforços internacionais para reduzi-los, buscamos, neste contexto, como objetivo geral, realizar uma revisão bibliográfica para conhecer os impactos da geoengenharias nos sistemas humanos e de que forma esse debate se desenvolveu. Como objetivos específicos, pretendemos realizar uma revisão histórica do nascimento do campo como ciência até sua intersecção com as ciências sociais para então sintetizar o conhecimento atual acerca dos impactos dos usos da

geoengenharia nos sistemas humanos com um enfoque especial nas áreas de abrangência da economia.

Para isso, abordamos o conteúdo da seguinte forma: i) nesta introdução realizamos uma pequena explanação justificando a importância do estudo desse tema e uma panorâmica geral; ii) no segundo capítulo, desenvolvemos a ligação entre geoengenharia e a questão ambiental; iii) no terceiro, fazemos um apanhado histórico da descoberta dessas técnicas e como se deu o desenvolvimento a partir delas, abordando ressalvas dos próprios pesquisadores ao publicar artigos sobre o tema. Expomos, também, os principais métodos e técnicas; iv) na quarta parte, uma retrospectiva dos últimos vinte anos, atentando para o ponto de inflexão desse conteúdo, observando a floração da ciência que se ramificou para diversos campos. Ainda analisamos os artigos mais recentes com os campos com quem eles fazem intersecção a fim de propor uma concepção consolidada do que se passa no meio acadêmico corrente (ainda que esses artigos abranjam uma secção maior do que as categorias propostas, o objetivo é entender como cada um complementa a disciplina como um todo); v) por fim, na conclusão, evidenciamos quais são os pontos de tensão ou incongruência e, finalizamos com uma breve projeção de aplicação possível baseada nos estudos que estão mais rapidamente ganhando o campo experimental.

Além disso, mostraremos para quais ramos a pesquisa se diversificou e direcionaremos nossa redação para os efeitos de uma técnica de geoengenharia em particular, o Gerenciamento de Radiação Solar (GRS) (em inglês, Solar Radiation Management - SRM), que, de forma análoga aos efeitos observados naturalmente em erupções vulcânicas, pretende resfriar o planeta através de injeções de aerossóis na estratosfera, refletindo parcialmente a luz que atingiria a superfície da Terra para fora do planeta, reduzindo a incidência solar que, por sua vez, causaria uma redução na temperatura média da superfície. Em seguida, falaremos do nascimento de estudos sociais reduzindo nosso escopo, mais uma vez, para os impactos econômicos que poderiam ser observados a partir do uso do gerenciamento de radiação solar. Por exemplo, se se reduz intencionalmente a incidência de luz solar no planeta, os efeitos das mudanças climáticas poderiam ser parcialmente mitigadas, porém também se diminuiria o coeficiente de incidência solar, uma variável importante para o crescimento das plantas, além de criar um distúrbio na distribuição e volume das chuvas, dois fatores que causariam pressões negativas na oferta de alimentos.

Para realizar essa revisão bibliográfica da gênese da disciplina até o presente, a fim de determinar o estado da arte das geoengenharias com esse enfoque específico nas ramificações que impactam os sistemas humanos de forma agregada, fizemos uma seleção de artigos du-

rante o segundo semestre de 2019 e o primeiro de 2020 em diversos buscadores sendo eles: o repositório institucional UFJF, a biblioteca da Câmara dos Deputados, o portal de periódicos Capes, arca e o agregador, Google Acadêmico. Encontramos dificuldade em encontrar artigos relacionados em português e, portanto, apoiamos esse trabalho exclusivamente em conteúdo extranacional. Foram pesquisados os seguintes termos-chave, tanto em português como em inglês, em todos os buscadores mencionados acima (cf. Apêndice A). O critério de inclusão foi de que os artigos necessariamente precisavam ser relacionados com geoengenharia na definição dada acima e apresentar uma contribuição para a discussão sobre os efeitos do uso das geoengenharias nos sistemas humanos.

## 2 GEOENGENHARIA E A QUESTÃO AMBIENTAL

A temperatura observada no planeta é, em média, cerca de 33°C maior do que em um cenário com ausência de gases do efeito estufa (MA, 1998). Esses gases aprisionam calor, impedindo que ele se dissipe para fora do planeta, e uma contribuição importante para a concentração desses gases na atmosfera decorre da queima de combustíveis fósseis, desmatamento, agropecuária entre outras atividades humanas, o que nos leva a perceber um aumento gradual na temperatura média do planeta.

A influência humana no clima moderno alcançou uma magnitude suficiente a ponto de exceder a variabilidade natural. *Ceteris paribus*, um aumento nas concentrações de gases do efeito estufa levam a um aumento na temperatura média da superfície terrestre (LEE, 2007) enquanto a principal fonte das mudanças climáticas globais são provenientes do impacto antropogênico na composição atmosférica (KARL, 2003, p. 1720).

Através de sua civilização industrial mundial, o Homem está, involuntariamente, conduzindo um vasto experimento geofísico. No espaço de tempo de poucas gerações, ele está queimando o combustível fóssil que foi se acumulando lentamente na terra nos últimos 500 milhões de anos. O CO<sub>2</sub> produzido por esta combustão está sendo injetado na atmosfera: cerca de metade disso permanece lá.<sup>1</sup> (PRESIDENT'S SCIENCE ADVISORY COMMITTEE, 1965, p 126, tradução nossa).

Se relaxarmos a definição de geoengenharia para a intervenção em larga escala no meio ambiente, omitindo a intencionalidade da mitigação do aquecimento global, notamos que o que se deu após a revolução industrial foi justamente isso, geoengenharia às avessas, no qual um grande volume de matérias primas foram extraídas e destinadas para queima, entre outros fins, aumentando a concentração de dióxido de carbono, entre outros gases, na atmosfera que, por sua vez, é um gás de efeito estufa. “A indústria esteve envolvida em um enorme projeto de geoengenharia nos últimos 200 anos, mais intensivamente nos últimos 50 anos, que viu 200 bilhões de toneladas de carbono saírem das profundezas do solo para a atmosfera.”<sup>2</sup> (READ; LERMIT, 2005, p. 2665, tradução nossa).

---

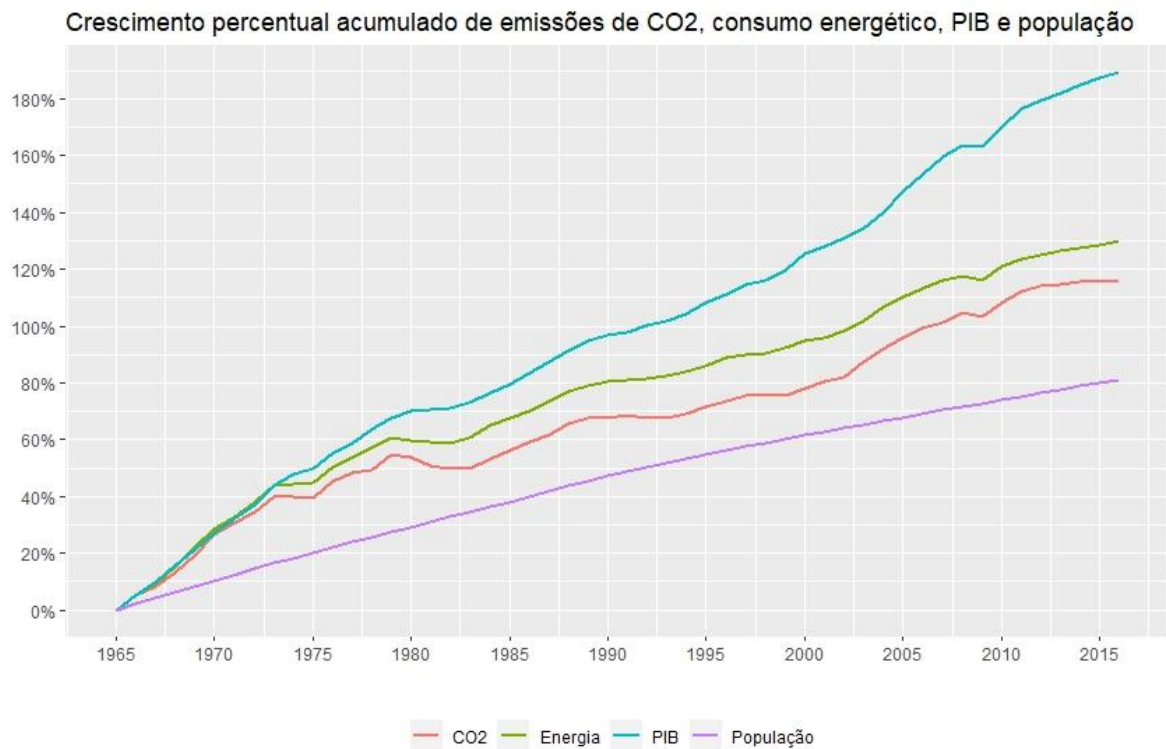
1 “Through his worldwide industrial civilization, Man is unwittingly conducting a vast geophysical experiment. Within a few generations he is burning the fossil fuels that slowly accumulated in the earth over the past 500 million years. The CO<sub>2</sub> produced by this combustion is being injected into the atmosphere; about half of it remains there.”

<sup>2</sup> “Industry has been engaged in a massive geoengineering project over the last 200 years, most intensively in the last 50, that has seen 200 billion tonnes of carbon moved from deep underground into the atmosphere.”



O ciclo atual de CO<sub>2</sub> soma cerca de 65 GtCO<sub>2</sub>/ano, mais da metade deste ciclo é atribuído a emissões de origem antropogênica (JOHNSON *et al.*, 2017). O ciclo de CO<sub>2</sub> global é dominado por atividades humanas, e um agravante é que esses gases tendem a permanecer e a se acumular na atmosfera por séculos.

Figura 1 – Crescimento percentual acumulado de emissões de CO<sub>2</sub>, consumo energético, PIB e população.



Fonte: Elaborada pelo autor com base em Ritchie e Roser (2017)

Não há mais Jardim do Éden. Mudamos tanto o mundo que cientistas dizem que estamos em uma nova era geológica: o Antropoceno, a era dos humanos. [...] As únicas condições que os humanos já conheceram estão mudando e mudando rapidamente. É tentador e compreensível ignorar as evidências e continuar como sempre ou ser tomado pela desgraça e escuridão. Mas também há um enorme potencial para aquilo que podemos fazer. Precisamos ultrapassar a culpa ou a vergonha e continuar com as tarefas práticas que temos em mãos.<sup>3</sup> (DAVID ATTENBOROUGH, [s. d.], tradução nossa)

<sup>3</sup> “The Garden of Eden is no more. We have changed the world so much that scientists say we are in a new geological age: the Anthropocene, the age of humans. [...] The only conditions modern humans have ever known are changing and changing fast. It is tempting and understandable to ignore the evidence and carry on as usual or to be filled with doom and gloom. But there is also a vast potential for what we might do. We need to move beyond guilt or blame and get on with the practical tasks at hand.”

Esse novo cenário que se apresenta gera toda sorte de desafio institucional. Uma vez que o custo da adaptação parece se apresentar de forma assimétrica entre os agentes, causando diferentes níveis de incentivos para mitigar ou se adaptar às mudanças climáticas. Desafios políticos dessa nova tendência também se apresentam elevados em razão de serem sujeitos a influências de segmentos econômicos, os mais diversos, e do dilema que se apresenta por falta de compreensão ou de interesses que são opostos à redução desse impacto. Além disso, no caso da geoengenharia temos mais um fator que contribui a esse dilema que é a falta de consenso acadêmico no que tange a sua aplicação. Aliado a esses fatores, também observamos que pela desigualdade do impacto regional tanto das mudanças climáticas (ROBOCK; OMAN; STENCHIKOV, 2008; SCHELLING, 1983) quanto, possivelmente, do uso da geoengenharia (PARKHOMENKO, 2018; RICKE; MORGAN; ALLEN, 2010; ROBOCK; OMAN; STENCHIKOV, 2008) muitos grupos podem perceber e se beneficiar desse ou daquele nível de adaptação ou mitigação. “A heterogeneidade das respostas físicas ao gerenciamento de radiação solar gera por sua vez heterogeneidades nas preferências do grau de sua implementação.” (RICKE; MORENO-CRUZ; CALDEIRA, 2013, p. 3. Tradução nossa).

Os debates intergovernamentais com o intuito de construir alguma forma de colaboração global para a manutenção dos sistemas de suporte da civilização têm falhado em alcançar resultados tangíveis, tanto pelas metas pouco ambiciosas quanto pela inabilidade de cumpri-las (CRUTZEN, 2006; DUBASH, 2009; STIGLITZ, 2015). Tomemos por exemplo o acordo de Copenhague, em 2009, em que líderes globais concordaram em fixar um limite no aumento global da temperatura. Pelo acordo, esforços seriam realizados a fim de impedir um aumento de não mais que 2°C acima dos níveis pré-industriais. Enquanto no acordo de Paris 194 países e a União Europeia definiram uma redução nas emissões globais de poluentes. Entretanto, já observamos que essas metas se mostram pouco ambiciosas em garantir a limitação do aumento da temperatura em 2°C no ano 2100 (MARROUCH; AMRITA, 2016; SCHLEUSSNER *et al.*, 2016). Ocorreu que esses acordos foram justamente o comprometimento ao crescimento industrial e à manutenção do *status quo*, o gerenciamento de risco em troca da prevenção de desastres. Colocando inovações tecnológicas em um papel de *Deus Ex Machina* no próximo capítulo da sobrevivência da organização social moderna (GUNDERSON; STUART; PETERSEN, 2017; SPASH, 2016). Contudo, se estabeleceu um consenso de que um corte brusco nas emissões se fazia urgentemente necessário.

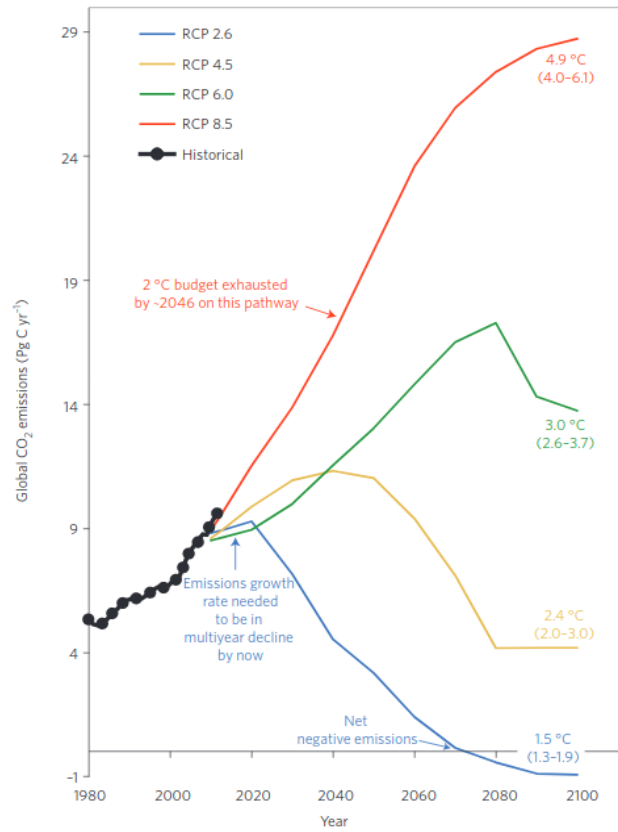
Apesar da imaturidade preocupante, essas discussões ocorrem a partir de consensos científicos em que a partir de uma configuração da natureza se modela um arranjo de cenários futuros combinados com caminhos evolucionários das emissões, ou seja, existe um imaginá-

rio comum sobre qual será o estado futuro da natureza a partir de cada plano de ação. Esse consenso parte de um ferramental desenvolvido para esse fim: permitir a comparação entre tomadas de decisões e aglomerar os modelos de previsão em torno de uma linguagem comum, permitindo realizar inferências sobre diferentes possibilidades de evolução do cenário atual e tornar comparável os resultados entre diferentes autores. Para que essas análises tenham alguma congruência tanto preditiva quanto descritiva foi necessário o desenvolvimento de um ponto de referência comum como expressado por Van Vuuren *et al.* (2011):

Cenários de emissões e socioeconômicos são usados na pesquisa acerca do clima para prover descrições plausíveis de como o futuro pode evoluir a partir de uma grande constelação de variáveis, incluído mudanças socioeconômicas, tecnológicas, do uso de energia e da terra, e da emissão de gases do efeito estufa e poluição. Eles são usados como informação de entrada para modelos climáticos e como um base para avaliação de possíveis impactos climáticos, opções de mitigação e custos associados. Para melhor comparação e comunicação de resultados de modelos entre diversos estudos, é preferível que a comunidade científica use um conjunto comum de cenários. (VAN VUUREN *et al.*, 2011, p. 6)

Essa necessidade de informação comum e mais detalhada para alimentar modelos climáticos mais sofisticados, conciliado com a demanda por mais cenários, levou o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (no inglês Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) a requerer da comunidade científica um conjunto de cenários para que fosse possível modelar os mais diversos planos de ação ou da falta dela (LEE, 2007). A partir disso, foi criado um referencial teórico para servir de base a experimentos de curto e longo prazo, os Caminhos Representativos de Concentração (do inglês Representative Concentration Pathways – RCPs), uma contribuição multidisciplinar da academia. Mais especificamente, o RCP é um conjunto de cenários de crescimento dos gases de efeitos estufa que, atualmente, são sumarizados em quatro caminhos desenhados para servir de base às simulações geradas no que tange a evolução do estado da natureza, considerando uma interação antropogênica. Seu uso como língua franca tem sido amplamente adotado por muitos cientistas, facilitando a comparação de seus trabalhos e a compreensão de suas conclusões. Esse ponto de referência teórico provém de projeções de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera até o ano 2100 (WAYNE, [s. d.]), e são úteis por indicar quanto da força radiativa solar em watts fica aprisionada no planeta por metro quadrado, a partir do nível de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera entre outras variáveis ambientais, e compará-los a níveis pré-industriais (VAN VUUREN *et al.*, 2011). Os quatro RCPs selecionados pelo IPCC para serem representativos contém os seguintes cenários: de mitigação (RCP 2,6), dois cenários médios de estabi-

lização (RPC 4,5/RCP 6) e um alto para cenários de alta emissão (RCP 8,5). O primeiro resultado observado com o uso dessa referência é descritivo: o efeito corrente acumulado da ação humana na prática é de um aumento de 0,95°C, quando comparado a valores pré-industriais. (NOAA, 2020). A partir da evolução corrente da interação antropogênica com os ecossistemas, já é possível observarmos consequências perigosas incluindo mortes por calor extremo, deflorestações, inundações e, mais recentemente, queimadas em uma escala inédita apesar dos esforços (KRAWCHUK *et al.*, 2009; LIU; STANTURF; GOODRICK, 2010). Ainda assim, as emissões globais de carbono continuam a aumentar em média 3% ao ano desde 2000, ano em que diversos tratados inter-regionais foram assinados, como os acordos citados anteriormente. A trajetória atual para o crescimento da concentração dos gases de efeito estufa torna o cenário em RCP 8,5, o mais alto desta referência atualmente. Ainda assim, as emissões crescem a uma taxa alta o suficiente para superar esse pior cenário projetado na RCP (SANFORD *et al.*, 2014). Conforme figura abaixo, essa trajetória nos levaria a um aumento de temperatura média da superfície entre 4°C e 6,1°C, muito acima das metas propostas por esses diversos acordos climáticos, trazendo consigo inúmeros desafios em todos os campos da vida humana.

Figura 2 – Tendências de emissões de CO<sub>2</sub>

**Figure 1** | Observed and projected trends in global CO<sub>2</sub> emissions under four RCP scenarios. Trends are adapted from ref. 2 extended to 2100 and include both fossil fuel and industrial emissions, but not land-use-change emissions, and were accessed at the RCP database version 2.0.5 (<http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>). Numbers on the right-hand side represent the median values of global mean surface temperature projections above pre-industrial levels in 2100 and the 66% probability range of the ensemble projections for each RCP scenario<sup>4</sup>. The 2046 budget number is determined from the allowable carbon emissions budget of 1,000 Pg C consistent with a >66% likelihood of limiting warming to less than 2 °C (ref. 7). The remaining available emissions and estimated year when those will be exhausted are based on the total allowable and that already emitted (531 Pg C) as of 2011 (ref. 7) coupled with projected emissions under RCP 8.5 (RCP database, see above). Emissions are reported every ten years in the database and a linear rate of increase was assumed for the intervening years. Deforestation emissions are not included in this calculation.

Fonte: SANFORD et al., 2014

Observando o efeito desestabilizador que o aumento da incerteza climática causa nos sistemas políticos em seu sentido amplo (BARNETT; ADGER, 2007; BOHLE; DOWNING; WATTS, 1994; CORNER; PIDGEON, 2010; KENNETT *et al.*, 2012), vemos que existe uma inter-relação entre a mudança da configuração da natureza e a alteração da configuração política que ocorre, muitas vezes, no limite, através dos riscos associados à produção agrícola (AUYERO; MORAN, 2007; BELLEMARE, 2015; BOHSTEDT, 2013; WISCHNATH; BUHAUG, 2014) e tantos outros setores que dependem de uma configuração específica do ambiente para maximizarem suas operações o que, na média, causaria pressões altistas em seus custos. Adicionando complexidade ao tema, diferentes regiões experimentam as mudanças climáticas de forma diferente, fazendo com que todos agentes tenham diferentes níveis de

incentivos para exacerbar ou mitigar o processo de mudanças climáticas (RICKE; MORENO-CRUZ; CALDEIRA, 2013), aumentando ainda mais a complexidade desse sistema, já que ao incorporarmos o social ao problema, o sistema não mais fica limitado a seus componentes físicos, mas as próprias previsões sobre o estado futuro da natureza, que impactam sua configuração futura a partir das expectativas e reações dos agentes.

### 3 REVISÃO HISTÓRICA E TÉCNICAS

A fundamentação teórica para o uso de Gerenciamento de Radiação Solar (do inglês Solar Radiation Management -SRM) foi apresentada pela primeira vez no início do século passado a partir do artigo de Humphrey (1913) que, entre outras constatações, relacionou a mudança climática à poeira vulcânica que era lançada no que ele chamou de parte alta da atmosfera durante as erupções. Humphreys nota que a incidência solar no planeta variava de forma inversa à concentração dessa poeira e com ela a temperatura da superfície. Essas observações foram realizadas a partir de grandes atividades vulcânicas, então recentes:

Por dois ou três anos após a erupção do Krakatoa, em 1883, também após as erupções do Monte Pelée e o Santa Maria, em 1902, e de novo após a erupção do Katmai, em 1912, em condições favoráveis, uma espécie de coroa marrom-avermelhada era frequentemente observada ao redor do sol. [...] Este fenômeno foi claramente o resultado de uma difração da luz do sol pelas partículas da poeira vulcânica na alta atmosfera e, portanto, forneceu um meio satisfatório para determinar o tamanho aproximado das partículas<sup>4</sup>. (HUMPHREYS, 1913, p. 141, tradução nossa).

Humphreys ainda vai mais longe estabelecendo através de leituras pireliométricas (PIRELIÔMETRO, 2019), medidas da irradiação direta solar representando a intensidade da radiação solar recebida na superfície da terra, que não só existe poeira vulcânica na parte superior da atmosfera, mas que ela também é eficiente em interceptar radiação solar. Apesar de já em 1913 Humphreys ter demonstrado os fundamentos do que viria a se tornar uma das técnicas de geoengenharia solar, ele não chegou a avaliar as possibilidades de alterações artificiais, aquelas causadas pela humanidade de forma intencional e em larga escala.

Em 1965, temos a primeira sugestão de alterações intencionais no clima global, destacando não só as potencialidades de uma intervenção direta nos sistemas naturais, mas também avaliando o custo dessa implementação, um contexto idêntico ao que é tratado contemporaneamente:

Uma mudança no equilíbrio da radiação na direção oposta a isso, que pode ser resultado do aumento do CO<sub>2</sub> atmosférico, poderia ser produzida ao aumentar o albedo, ou refletividade, da terra. Tal mudança no albedo poderia ser provocada, por exemplo, pelo espalhamento de partículas refletivas mui-

---

<sup>4</sup> “For two or three years after the eruption of Krakatoa, in 1883, also after the eruptions of Mount Pelée and Santa Maria, in 1902, and again after the eruption of Katmai, in 1912, a sort of reddish-brown corona was often, under favorable conditions, observed around the sun. [...] This phenomenon, known as Bishop’s ring, clearly was a result of diffraction of sunlight by the particles of volcanic dust in the upper atmosphere, and therefore furnished a satisfactory means for determining the approximate size of the particles themselves.”

to pequenas sobre grandes áreas oceânicas. As partículas devem ser suficientemente flutuantes para que permaneçam perto da superfície do mar e elas devem ter uma alta refletividade, assim, mesmo com uma cobertura parcial da superfície, seriam adequadas para produzir uma mudança significativa na quantidade de luz solar refletida.<sup>5</sup> (ENVIRONMENTAL POLLUTION PANEL, 1965, p. 127, tradução nossa).

Aqui, pode ser proposto o argumento de que as propostas de geoengenharia antecedem às propostas de redução na emissão de gases do efeito estufa, uma vez que, no melhor conhecimento do autor, não se aborda a hipótese de redução nas emissões, enquanto nesse painel já identificamos sugestões para aplicação possível da geoengenharia como solução para o desequilíbrio ambiental.

A seguir temos duas ramificações relevantes que desenvolveram o tema sem fazer referência ao PSAC com Budyko (1977) e Marchetti (1977), que abordam aspectos técnicos e de implementação, e no trabalho de Kellogg e Schneider (1974), primeiro a propor dimensões sociais, questionando a possibilidade de um *status quo* climático:

Mas se o *status quo* climático for considerado um objetivo que valha a pena, existem alguns problemas a serem superados antes que isso possa ser realizado. O primeiro é a nossa inabilidade de prever o que irá acontecer se tentarmos influenciar parte do sistema climático. O segundo é a dificuldade de decidir o que os diferentes povos do mundo vão aceitar como um “clima ótimo” para o qual devemos direcionar nossos esquemas de estabilização. Qualquer modificação (ou conservação) imperfeita do esquema do clima terá seus prós e contras<sup>6</sup>. (KELLOGG; SCHNEIDER, 1974, p. 1163, tradução nossa).

Então já em 1974, temos componentes sociais que até o momento ainda são atuais na discussão da aplicação da geoengenharia: questionava-se a capacidade de se prever os impactos da intervenção, não só nos sistemas climáticos, mas também nos humanos, indo de considerações em relação ao produto das nações até questões sobre governança e desigualdade causada por essas intervenções.

---

<sup>5</sup> “A change in the radiation balance in the opposite direction to that which might result from the increase of atmospheric CO<sub>2</sub> could be produced by raising the albedo, or reflectivity, of the earth. Such a change in albedo could be brought about, for example by spreading very small reflecting particles over large oceanic areas. The particles should be sufficiently buoyant so that they will remain close to the sea surface and they should have a high reflectivity, so that even a partial covering of the surface would be adequate to produce a marked change in the amount of reflected sunlight.”

<sup>6</sup> “But if a climatic status quo is deemed a worthy objective, there are some serious problems to overcome before it can be realized. First is our present inability to predict what will happen if we do try to influence part of the climate system. Second is the difficulty of deciding what different peoples of the world will accept as an “optimum climate” toward which we should aim our stabilization schemes. Any imperfect climate modification (or conservation) scheme will have its winners and losers.”



Em suma, existem duas abordagens possíveis de se conciliar a habitabilidade humana com o impacto antropogênico moderno, possivelmente com o custo econômico menor do que implementar controles de volume de emissões (DICKINSON, 1996). A primeira seria capturar gases do efeito estufa da atmosfera e removê-los do sistema climático, como em Marchetti que em 1977 propôs uma forma de geoengenharia através da captura, em larga escala, do CO<sub>2</sub> produzido e sua injeção nas profundezas do oceano a fim de negar parte das mudanças climáticas antropogênicas, hoje conhecido como captura de CO<sub>2</sub> (MARCHETTI, 1977). Essa técnica é de baixíssimo risco por ter uma atuação reversa à ação humana, entretanto seus custos são altos apesar de avanços recentes terem o reduzido. A segunda seria adicionar algo a mais na atmosfera, buscando um efeito de reduzir a energia que alcança o planeta como com a contribuição de Budyko (1977), primeiro a sugerir a alteração na concentração de partículas aerossóis na estratosfera com o intuito de aumentar a reflexividade da atmosfera, reduzindo assim o coeficiente de incidência solar. A primeira sugestão de gerenciamento de radiação solar como concebida atualmente:

Deve notar-se que uma oportunidade foi encontrada recentemente para um impacto intencional do homem no clima ao mudar a concentração de partículas aerossóis na estratosfera [...]. Este método, que é bastante viável com equipamentos modernos, pode reduzir a temperatura do ar próximo a superfície terrestre em alguns décimos de grau ou, até mesmo, em alguns graus. O uso desse método pode ser importante para prevenir o aquecimento do clima<sup>7</sup>. (BUDYKO, 1977, p.203, tradução nossa)

Então, em 1977, já é possível observarmos o surgimento das primeiras ramificações do campo de geoengenharia, nesse momento se dividindo pelas duas técnicas em consideração, as que hoje são conhecidas, respectivamente, como captura de carbono e o gerenciamento de radiação solar. Repare ainda que a contribuição de Budyko vai além da mera constatação da técnica e ele já insere na discussão os problemas de governança ao sugerir que o objetivo de alterar o clima deva ser manter as condições atuais, conforme Schneider (1996 p. 293 *apud* BUDYKO, 1974, p. 244).:

Se concordarmos que é teoricamente possível produzir uma mudança notável no clima global utilizando um método comparativamente simples e econômico, cabe a nós desenvolvermos um plano para a modificação climática que manterá as condições climáticas existentes, apesar da tendência em direção ao aumento da temperatura devido à atividade econômica do homem [...]. A

---

<sup>7</sup> “It should be noted that an opportunity has recently been found for man’s intentional impact on climate by changing aerosol particle concentration in the stratosphere[...] This method, which is quite feasible with modern equipment, may reduce the mean air temperature near the earth’s surface by some tenths of a degree or, perhaps, even by a few degrees. The use of this method may be important for preventing the warming of the climate.”

possibilidade de usar tal método para prevenir flutuações climáticas naturais, levando a uma diminuição da taxa do ciclo hidrológico em regiões caracterizadas pela umidade insuficiente, também é de algum interesse<sup>8</sup>. (SCHNEIDER, 1996, p. 293 *apud* BUDYKO, 1974, p. 244, tradução nossa).

Apesar do seu breve início nos anos 1970 depois dos artigos seminais (BUDYKO, 1977, 1982; MARCHETTI, 1977) o campo fica em dormência até os anos 1990. A partir do *Panel on the Policy Implications of Greenhouse Warming* (SCIENCE; WARMING, 1992) é lançada uma discussão sobre o uso de geoengenharia que, por sua vez, acaba conferindo legitimidade e credibilidade ao estudo que até o momento era mais visto como um gênero de ficção científica. Podemos observar nesse painel uma ideia de geoengenharia que precede o debate de redução das emissões, conforme excerto abaixo em que a opção da geoengenharia já é tratada em 1965 sem menções a redução nas emissões:

Tal mudança no albedo poderia ser provocada, por exemplo, pelo espalhamento de partículas refletivas muito pequenas sobre grandes áreas oceânicas. [...] Estimativas aproximadas indicam que partículas suficientes para cobrirem cerca de 1,5 km<sup>2</sup> podem ser produzidas por talvez cem dólares. Assim, uma mudança de 1% na refletividade pode ser gerada por cerca de 500 milhões de dólares ao ano, especialmente se as partículas refletivas forem espalhadas em baixas latitudes, onde a radiação incidente é concentrada. Considerando a extraordinária importância econômica e humana do clima, custos dessa magnitude não parecem excessivos<sup>9</sup>. (ENVIRONMENTAL POLLUTION PANEL, 1965, p. 127, tradução nossa).

Essa visibilidade institucional crescente acabou trazendo a credibilidade necessária para tirar o campo da geoengenharia do esquecimento e da ficção científica, atraindo novos pesquisadores para o assunto. Após a publicação da Academia de Ciências Nacional (SCIENCE; WARMING, 1992), os autores Keith e Dowlatabadi (1992) publicam uma primeira revisão bibliográfica, trazendo à tona as opções de geoengenharia que existem à disposição, no caso da remoção de dióxido de carbono se remove CO<sub>2</sub> capturado da atmosfera, em seguida injetando-o no fundo do oceano da mesma forma proposta por Marchetti, em 1977, com a fertili-

---

<sup>8</sup> “If we agree that it is theoretically possible to produce a noticeable change in the global climate by using a comparatively simple and economical method, it becomes incumbent on us to develop a plan for climate modification that will maintain existing climatic conditions, in spite of the tendency toward a temperature increase due to man’s economic activity[...] The possibility of using such a method for preventing natural climatic fluctuations leading to a decrease in the rate of the hydrological cycle in regions characterized by insufficient moisture is also of some interest.”

<sup>9</sup> “A change in albedo could be brought about, for example by spreading very small reflecting particles over large oceanic areas. [...] Rough estimates indicate that enough particles partially to cover a square mile could be produced for perhaps one hundred dollars. Thus a 1% change in reflectivity might be brought about for about 500 million dollars a year, particularly if the reflecting particles were spread in low latitudes, where the incoming radiation is concentrated. Considering the extraordinary economic and human importance of climate, costs of this magnitude do not seem excessive.”

zação do oceano com fosfato, a fertilização dos oceanos com ferro, o reflorestamento, os escudos solares no espaço, a injeção de dióxido sulfuroso na estratosfera, a poeira estratosférica e o dióxido sulfuroso na troposfera.

Geoengineering afeta o clima alterando os fluxos globais de energia através de duas estratégias, aumentando a quantidade de radiação infravermelha que sai do planeta através da redução da concentração dos gases do efeito estufa ou por diminuir a quantidade de radiação solar absorvida através de um aumento no albedo. (KEITH, D. W.; DOWLATABADI, 1992, p. 290)

As técnicas envolvidas no primeiro caso em que se pretende diminuir a quantidade de radiação aprisionada no planeta diminuindo a concentração de gases do efeito estufa geralmente são propostas através de um movimento no sentido inverso ao da ação humana, ou seja, remover CO<sub>2</sub> da atmosfera. As formas são bem criativas, indo de intervenções diretas nos ciclos fotossintéticos da base da cadeia alimentar marinha até a filtragem direta da atmosfera para remoção desses gases, principalmente o CO<sub>2</sub>. Essa extração do CO<sub>2</sub> adicionado pela humanidade apresentam riscos significativamente mais baixos que as alternativas, porém seus custos são elevados e relevantes mesmo quando comparados com o PIB global.

*Quadro 1 – Comparação de Técnicas de Captura de CO<sub>2</sub>*

	Potencial de remoção de GtCO <sub>2</sub> e/ano	Custo	Descrição Abreviada	Benefícios	Efeitos Colaterais	Execução Factível	Problemas não técnicos	Referências
Reflorestamento	1.1	30 USD/tCO <sub>2</sub>	Utiliza o ciclo fotossintético no crescimento de árvores para capturar o CO <sub>2</sub> , essas árvores precisam posteriormente ser armazenadas fora do sistema.	Recuperação da diversidade ecológica, baixíssimo risco.	Remoção de nutrientes de forma exagerada do solo.	Baixo potencial de remoção de CO <sub>2</sub>	Questões de legalidade, quais países devem ceder as terras?	ENVIRONMENTAL POLLUTION PANEL, 1965; REYER; GUERICKE; IBISCH, 2009; STRECK; SCHOLZ, 2006
Sequestro de Carbono do Solo	1.3	8 USD/tCO <sub>2</sub>	Técnica de manejo do solo que busca maximizar a quantidade de carbono aprisionada no solo.	Processo inteiramente natural	Possível diminuição da produtividade agrícola	Demonstrada	Governança, equidade. Técnica mutuamente exclusiva com produção agrícola.	LAL, 2011; SMITH, P., 2008, 2016

	Potencial de remoção de GtCO <sub>2</sub> e/ano	Custo	Descrição Abreviada	Benefícios	Efeitos Colaterais	Execução Factível	Problemas não técnicos	Referências
Captura Direta pelo Ar	1	345 USD/tCO <sub>2</sub>	Filtragem em larga escala da atmosfera, removendo e armazenando CO <sub>2</sub> .	Método mais seguro de geogenharia	Estabilidade das opções de armazenamento pode comprometer o esforço.	Sempre complementar, consumo energético alto, potencial de escalabilidade duvidoso.	Alto custo de execução	FASIHI; EFIMOVA; BREYER, 2019; REALMONTE <i>et al.</i> , 2019
Bioenergia com armazenagem de CO <sub>2</sub>	9	60 USD/tCO <sub>2</sub>	Produção de combustíveis com impacto neutro de carbono aliado com captura ou redução de CO <sub>2</sub> emitido pelas refinarias.	Potencial de crescimento baseado em exportações de combustíveis. Aumento na segurança do suprimento de combustíveis. Melhor suporte para fazendeiros	Alteração da carteira produtiva deve causar pressões em outros produtos agrícolas.	Localização de armazenagem de carbono pode ser distante da produção de bioenergia.	Indexação relativa da oferta de combustíveis às condições de colheita e plantio.	READ; LERMIT, 2005; ZHANG <i>et al.</i> , 2015
Fertilização Oceânica	4	30 USD/tCO <sub>2</sub>	Catalisa ciclo bioquímico de plânctons, aumentando sua absorção e armazenamento de CO <sub>2</sub> .	Possível aumento na produção marinha	Acidificação Oceânica	Baixo potencial de remoção de CO <sub>2</sub>	Quem paga e quem se beneficia do aumento da base da cadeia alimentar do oceano?	ROBINSON <i>et al.</i> , 2014; YOON <i>et al.</i> , 2018
Recuperação de Óleo	65	40 USD/tCO <sub>2</sub>	Armazenamento de Co <sub>2</sub> capturado em poços de petróleo	Armazenamento relativamente seguro	Danos a zonas próximas	Demonstrada	Logística de transporte de CO <sub>2</sub>	LUNT <i>et al.</i> , 2008
Armazenamento Oceânico	0.55	26 USD/tCO <sub>2</sub>	Armazenamento de dióxido de carbono em estado sólido nas profundezas do oceano	Armazenamento relativamente seguro	Dano a comunidade marinha ciliar	Baixo potencial de remoção de CO <sub>2</sub>	Logística de transporte de CO <sub>2</sub>	MATTER <i>et al.</i> , 2016

Fonte: Elaborado pelo autor com potencial e custo extraído de LUNT *et al.*, 2008

Enquanto gerenciamento de radiação solar visa aumentar o albedo, diminuindo o coeficiente solar do planeta, geralmente envolve a inserção de um componente, normalmente químico, que aumente a reflexividade do planeta. O exemplo mais comum na literatura é injeção de aerossóis na estratosfera. Caso fosse refletido uma fração da luz solar que ingressa no planeta seria possível anular um alcance muito grande de cenários de emissões de gases do efeito estufa, como por exemplo, o caso em que se dobra o nível desses gases em relação ao

nível pré-industrial (LENTON; VAUGHAN, 2009). Refletir essa quantidade de luz solar parece ser factível, uma vez que uma pequena quantidade de matéria pulverizada tem um efeito significativo. A ideia é injetar partículas na atmosfera refletindo a luz solar, normalmente sulfatos são considerados pela semelhança com o processo natural, porém já observamos artigos debatendo qual substância deve ser usada nessa pulverização (POPE *et al.*, 2012), qual o tamanho ótimo das partículas (KEITH, D. W., 2010; RASCH; CRUTZEN; COLEMAN, 2008) e qual a melhor forma de distribuição (LOCKLEY; MACMARTIN; HUNT, 2020; MORIYAMA *et al.*, 2017; SMITH, J. P.; DYKEMA; KEITH, 2018) a fim de reduzir externalidade negativas. O análogo natural, a erupção de vulcânica causa um resfriamento significativo cujo impacto na temperatura perdura por alguns anos a partir de uma quantidade relativamente pequena de matéria. Como no caso do Monte Pinatubo (HANSEN *et al.*, 1992) em que observamos uma queda de 0,5°C na média da temperatura na superfície (LANE *et al.*, 2007). Desenhando paralelos com a erupção do Monte Pinatubo em 1991 e dos efeitos na temperatura solar, muito em linha com o realizado por Humphreys no início do século. Schelling (1996) desenvolve o elo entre geoengenharia e seus efeitos nos sistemas políticos e econômicos:

A primeira coisa a dizer sobre a economia da geoengenharia em comparação com a redução de CO<sub>2</sub> é que provavelmente ela transforma totalmente o problema do efeito estufa de um regime regulatório extremamente complicado para um problema simples - não necessariamente fácil, mas simples - em compartilhamento internacional de custos. Não posso afirmar pois não sabemos de qual geoengenharia estaremos falando daqui a 50 anos, mas se o assunto é colocar aerossóis ou objetos na estratosfera ou em órbita, ou fertilizar os oceanos, esses são o que podemos chamar de programas 'exonacionais' - programas que não são confinados a territórios nacionais, não são dependentes do comportamento das populações nacionais e não exigem regulações ou incentivos nacionais e provavelmente não sejam nem um pouco dependentes de participação universal.<sup>10</sup> (SCHELLING, 1996, p. 305, tradução nossa)

Apesar de propor a questão de governança de forma superficial, ele abre a porta para uma comparação com a formação de estados nacionais. Talvez essa ameaça global gere algum desenvolvimento de um estado internacional como solução à questão de governança. Vale ainda destacar a injeção de aerossóis pelos custos diretos relativamente insignificantes e a

---

<sup>10</sup> "The first thing to say about the economics of geoengineering compared with CO<sub>2</sub> abatement is that probably it totally transforms the greenhouse issue from an exceedingly complicated regulatory regime to a simple - not necessarily easy, but simple - problem in international cost sharing. I cannot be sure because we don't know just what geoengineering we are talking about 50 years from now; but if the subject is putting aerosols or objects in the stratosphere or in orbit, or fertilizing the oceans, these are what we can call 'exo-national' programs - programs not confined to national territories, not depending on the behavior of national populations, not requiring national regulations or incentives, and probably not at all dependent on universal participation."

quantidade de menções presentes na literatura. Essa técnica pretende estabilizar as temperaturas globais ainda que concomitantemente com um crescimento de emissões através do aumento do albedo do planeta (KEITH, D. W.; DOWLATABADI, 1992; SHEPHERD, 2012), e podem até ser reconfigurados para impedir outra era do gelo (TELLER; WOOD; HYDE, 1996). Em modelos climáticos, essas técnicas se mostraram capazes de reverter a totalidade do aquecimento da temperatura média do planeta (GOVINDASAMY; CALDEIRA, 2000; LUNT *et al.*, 2008; RASCH *et al.*, 2008; ROBOCK; OMAN; STENCHIKOV, 2008), entretanto ela tem outros efeitos em variáveis que não a temperatura e por isso causam preocupação no que tange a manutenção de direitos humanos básicos (ROBOCK, 2008b) como reduzir a precipitação (TILMES *et al.*, 2013) e, obviamente, a própria incidência solar.

*Quadro 2 – Comparação de Técnicas de Gerenciamento de Radiação Solar*

	<b>Custo</b>	<b>Descrição Abreviada</b>	<b>Benefícios</b>	<b>Efeitos Colaterais</b>	<b>Execução Factível</b>	<b>Problemas não técnicos</b>	<b>Referências</b>
Escudos Solares	<.5% PIB GLOBAL por ano durante 25 anos	Escudo instalado no espaço composto por vários discos a fim de bloquear a entrada de radiação solar no planeta.	Processo totalmente mecânico	Impacto da modificação do albedo	Viabilidade financeira depende de reduções nos custos transporte extra planetário.	Impactos heterogêneos em preferências climáticas também heterogêneas	ANGEL, 2006; BICKEL, J. Eric et al., 2010; EARLY, 1989; ELLERY, 2015
Injeção de Aerossóis	18bn usd/C	Pulverizar partículas na estratosfera a fim de refletir parte da luz para fora do planeta.	Técnica de custo direto mais baixo.	Impacto da modificação do albedo; interações não antecipadas dos aerossóis; aumento da temperatura estratosférica; aumento no número e intensidade de secas; destruição da camada de ozônio; chuva ácida. Céu pode deixar de ser azul ou ganhar uma tonalidade acinzentada.	Interrupção da injeção pode causar aumento repentino da temperatura em poucos anos.	Colapsos sociais podem ter seu efeito amplificado. Baixo custo possibilita instalação de forma unilateral por estados ou agentes privados.	BICKEL, J; LANE, 2018; GOVINDASAMY, CALDEIRA, 2000; KEITH, D. W.; DOWLATABADI, 1992; LANE <i>et al.</i> , 2007; LUNT <i>et al.</i> , 2008; MORIYAMA <i>et al.</i> , 2017; POPE <i>et al.</i> , 2012; RASCH <i>et al.</i> , 2008; ROBOCK <i>et al.</i> , 2009; ROBOCK; OMAN; STENCHIKOV, 2008; SHEPHERD, 2012; SMITH, J. P.; DYKEMA; KEITH, 2018; SMITH, W., 2020; TELLER.; WO-

	Custo	Descrição Abreviada	Benefícios	Efeitos Colaterais	Execução Factível	Problemas não técnicos	Referências
							OD; HYDE, 1996; TILMES <i>et al.</i> , 2013
Embranquecimento de Nuvens Marinhas	Sem Informação	Com o uso de uma grande frota de barcos manipular a densidade de gotículas presentes em nuvens para controlar sua reflexividade e aumentar o albedo do planeta.	Restaurar a cobertura de gelo polar e reduzir o embranquecimento de corais. Impacto ambiental relativamente baixo	Modificação dos ciclos hídricos globais.	Custos de instalação, desenvolvimento e manutenção desconhecidos.	Redistribuição das chuvas globais, enchentes e/ou secas em regiões ciliares.	BICKEL, J. <i>et al.</i> , 2010; BOWER <i>et al.</i> , 2006; LATHAM, 1990; SALTER; SORTINO; LATHAM, 2008

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na prática, vemos que está sendo avaliado seriamente a possibilidade de não serem realizadas mudanças significativas nas capacidades de adaptação às mudanças climáticas a ponto delas serem mitigadas sem o uso da geoengenharia e, além disso, as experiências conduzidas nesse planeta poderiam, em algum grau, serem extrapoladas para outros planetas (MCINNES, 2009). Além disso, é interessante notar a evolução do significado de geoengenharia nessa fase inicial de consolidação do conceito. A técnica começa a ser apresentada de forma crescente como uma solução em conjunto ou até independente das reduções das emissões, ou seja, as considerações em torno da sua aplicação ganham um papel cada vez mais central nas publicações. Isso evidencia um descrédito da comunidade acadêmica em relação à capacidade do controle do clima através de uma adaptação dos meios de produção que fosse capaz de gerar uma retrocompatibilidade com a natureza, porém sempre com ressalvas:

Em termos técnicos ou econômicos, engenharia climática pode ser possível. No entanto, o atual estado da ciência não é capaz de avaliar todos os possíveis efeitos colaterais. Ao longo da próxima década, pesquisas em mudança global do clima devem construir a referência necessária para tal avaliação. Precisamos de um entendimento mais abrangente das características temporais e espaciais do aquecimento global observado e precisamos quantificar melhor como aerossóis naturais e antropogênicos formam e afetam o sistema climático. Precisamos de uma compreensão mais clara das implicações das distribuições espaciais de aquecimento que seriam impostas, como elas podem afetar o acoplamento superfície-atmosfera e o ciclo hidrológico. Também precisamos de uma avaliação clara do potencial negativo dos efeitos na camada de ozônio e as estratégias para minimizá-los. Todos os argumentos

usados aqui para discutir o sistema climático, presumiram, implicitamente, um sistema simples e linear, que de certa forma é acelerado, e uma resposta quase linear é esperada. Se limites não lineares no sistema pudessem ser alcançados por meio de uma modificação climática acidental ou inadvertida, algumas linhas de raciocínio muito diferentes seriam necessárias<sup>11</sup>. (DICKINSON, 1996, ANO, pg. 288, tradução nossa)

Note ainda que já realizamos injeção de aerossóis porque nossa poluição dissemina toneladas de enxofre na atmosfera e isso já é observável na temperatura e na precipitação (RAMANATHAN *et al.*, 2001). A dissonância de ter que conjugar os riscos da geoengenharia com nossa incapacidade se manifesta nessa dificuldade de conceber um mundo em que desenvolvimento e meio ambiente coexistem. Um mundo em que a instalação de tecnologia limpa, aliado a alguma forma de cooperação política internacional, levaria a uma condição ambiental pré-industrial conciliado ou não com um avanço material tangível em um horizonte de tempo razoável.

---

<sup>11</sup> On a technical and economic basis, climate engineering may be feasible. However, the current state of science is not capable of assessing all of the potential side effects. Over the next decade, research on global climate change should build the reference necessary for such an assessment. We need a fuller understanding of the temporal and spatial characteristics of the observed global warming and we need to better quantify how natural and anthropogenic aerosols form and affect the climate system. We need a clearer understanding of the implications of the spatial distributions of heating that would be imposed, how they might affect surface- atmosphere coupling, and the hydrological cycle. We also need a clear assessment of the potential negative effects on the ozone layer and strategies to minimize these. All of the arguments used here to discuss the climate system have implicitly assumed a simple, linear system. It is pushed in a certain way and an, almost, linear response is anticipated. If nonlinear thresholds in the system could be reached by advertent or inadvertent climate modification, some very different lines of reasoning would be required.



#### 4 ÚLTIMAS DÉCADAS DE AVANÇO

Precisamos considerar que a etapa seguinte no desenvolvimento da disciplina não sofre mais problemas de credibilidade ou se sua discussão é pertinente ou não aos estudos de cientistas climáticos. Já existem exemplos de intervenção artificial nos sistemas que acabam inadvertidamente resfriando o planeta, tanto é que caso tornássemos o ar atmosférico livre de poluições nocivas, como o enxofre, observaríamos que a temperatura aumentaria 0,73°C na maioria dos continentes podendo alcançar 2°C nos Estados Unidos e no norte da Ásia (ARNETH *et al.*, 2009; BRASSEUR; ROECKNER, 2005; LELIEVELD *et al.*, 2019; SAMSET *et al.*, 2018; SCHWARTZ, 2018; SHINDELL; SMITH, 2019). Isso se deve não só, mas principalmente, à poluição baseada em enxofre: emitimos cerca de 12,5 toneladas de enxofre na forma de dióxido de enxofre todos anos na atmosfera (AAS *et al.*, 2019; STERN, 2005). Com a questão da credibilidade resolvida e a partir do apoio em pesquisa anterior, mais cientistas climáticos começam a promover e expandir o conhecimento dessa disciplina.

No que tange os desenvolvimentos na área dos cientistas climáticos relacionado à geoengenharia, observamos que os estudos científicos no geral incorporaram uma resolução mais detalhada e com tecnicidades que vão desde quais moléculas devem ser utilizadas (RASCH; CRUTZEN; COLEMAN, 2008) até qual o tipo de infraestrutura seria necessária e quanto custaria sua pesquisa e desenvolvimento (ROBOCK *et al.*, 2009). Além dessa contribuição mais técnica, os cientistas climáticos não se abstêm de fazer asserções sobre os impactos éticos, legais e econômicos das geoengenharias. Fugindo, em certa medida, da visão Popperiana que permeia com mais vigor as ciências exatas (CALDEIRA; BALA, 2017).

A seguir vamos fazer um breve apanhado das evoluções mais marcantes que observamos no que tange aos avanços acerca da compreensão física do nosso objeto. Um portfólio de técnicas de geoengenharia para a remoção de dióxido de carbono são discutidas em Flannery *et al.* (1997). Essa forma é considerada a melhor resposta às mudanças climáticas, uma vez que os custos das técnicas de remoção de carbono são altos assim como os riscos do GRS. Edward Teller (1999) realizou publicações com o objetivo de compreender o potencial de controle do clima por meio de aerossóis. Ele argumenta que os custos da geoengenharia seriam duas ordens de magnitude menores quando comparados aos seus benefícios na prevenção de mudanças climáticas perigosas (TELLER. *et al.*, 1999; TELLER; HYDE; WOOD, 2002). O próximo marco vem de dois artigos seminais em que não apenas a definição moderna de geoengenharia é exposta pela primeira vez de forma concisa, mas também uma revisão da ampla literatura, com foco no campo físico, político, jurídico e ético em Keith (2000; 2001).

No mesmo período, tivemos a primeira publicação de uma simulação de geoengenharia utilizando um modelo climático tridimensional, reforçando que os esquemas de geoengenharia poderiam reduzir drasticamente o aquecimento global causado por CO<sub>2</sub> (GOVINDASAMY; CALDEIRA, 2000) e em 2003 a demonstração de que existem mecanismos não lineares na aplicação da geoengenharia solar, ou seja, nesse caso, seu uso levaria a um resfriamento mais potente nos trópicos, um super resfriamento enquanto nos polos observaríamos um sub-resfriamento. (GOVINDASAMY; CALDEIRA; DUFFY, 2003).

Nesse mesmo contexto, avançamos no entendimento dos impactos dessas técnicas nos ciclos da água. Vemos que ao diminuir a concentração de gases de efeito estufa, observamos um efeito hidrológico diferente do que alterar o albedo do planeta e consequentemente ciclos de água menos intensos (BALA; DUFFY; TAYLOR, 2008; BALA; CALDEIRA; NEMANI, 2010; CAO; BALA; CALDEIRA, 2012; LUNT *et al.*, 2008; TILMES *et al.*, 2013) uma vez que a eficácia da redução do coeficiente solar é menor e precisa ser realizada em maior intensidade para obter o mesmo efeito da redução da concentração de dióxido de carbono (CEPPI; GREGORY, 2019; KNUTTI; RUGENSTEIN; HEGERL, 2017; MODAK *et al.*, 2016). Em Irvine *et al.* (2019), mais de uma dúzia de modelos são aplicados para analisar a fração dos locais que observariam como mudanças climáticas são exacerbadas ou moderadas pelo uso de geoengenharia solar. Ele conclui que para variáveis climáticas como temperatura e disponibilidade de água, apenas 0,4% da área terrestre não congelada perceberia uma exacerbção das mudanças climáticas. A contribuição de Matthews e Caldeira (2007) avaliou a sensibilidade climática à implantação e interrupção repentinas. Iluminando como os sistemas climáticos reagem a este tipo de intervenção. Avanços ainda foram feitos no entendimento do impacto da injeção de sulfato via aerossóis na camada de ozônio. (HECKENDORN *et al.*, 2009; KEITH *et al.*, 2016; PITARI *et al.*, 2014; RICHTER *et al.*, 2017; XIA *et al.*, 2017).

A coroa da última década de desenvolvimento foi, sem dúvida, o esforço do GeoMIP (CALDEIRA; BALA, 2017), o Projeto Intercomparação de Modelos de Geoengenharia (do inglês, Geoengineering Model Intercomparison Project) que busca estabelecer um consenso entre os modelos de forma semelhante ao IPCC, mencionado anteriormente. Cenários padrão que alimentam vários modelos climáticos para comparar seus resultados e determinar o quão robustos são seus resultados (KRAVITZ *et al.*, 2011). O GeoMIP tem sido executado em fases, cada uma abordando um aspecto diferente das geoengenharias. Permeando essas fases, nós vemos experimentos avaliando diminuição do coeficiente solar, da injeção de aerossóis, do embranquecimento de nuvens. Essa lista continua a crescer conforme o projeto avança. Porém, mais relevante é o impacto que esse projeto está tendo nas publicações mais recentes,

como em Irvine *et al.* (2019) e Pitari *et al.* (2014) em que os pesquisadores se preocuparam em aplicar sua hipótese em 12 modelos fornecidos pelo GeoMIP. Esse projeto melhorou a qualidade dos modelos no que tange às previsões sobre os efeitos climáticos causados por geoengenharia em diversas áreas, como distribuição espacial em Kravitz *et al.* (2013).

Os artigos até aqui expandiram a qualidade e resolução dos modelos e os tornaram mais robustos, além de trazerem considerações acerca de sua viabilidade técnica, econômica, com ocasionais considerações sobre temas geralmente reservados às sociais. Também notamos que a tradição de promover o não uso de geoengenharia sem que se tenha uma melhor compreensão dos seus efeitos, ou seja, uma tradição de cautela continua forte, apesar de Irvine *et al.* (2019) sugerir que essa preocupação seja exagerada. Sendo que o conservadorismo que vemos em Flanery *et al.* (1997), cuja mais forte recomendação no que tange ao esforço de compreensão da constelação de processos que interagem com o sistema climático e do cenário futuro que as mudanças climáticas apresentam se mantém idêntica às apresentadas mais recentemente.

Modernamente, a geoengenharia já se dissemina em diversas áreas do conhecimento com ramificações indo desde modelagens da atmosfera até análises linguísticas de quais metáforas estão sendo usadas para explicar o conteúdo e como elas podem impactar a compreensão de massa sobre o conteúdo e propor situações de falsa escolha. Porém, o fundamento empírico para essas análises geralmente é baseado em estudos das exatas, enquanto as ciências climáticas atingem o que pode ser considerado seu ápice na ausência de experimentos físicos mais diretos no clima para coletar informação nova (CALDEIRA; BALA, 2017). Olhemos agora para a mudança mais relevante que começamos a notar no início do milênio (FLEGAL *et al.*, 2019): a entrada de um grande número de cientistas sociais, jurídicos, economistas, cientistas políticos e filósofos no campo, além do aumento também na participação dos cientistas climáticos (CALDEIRA; BALA, 2017). A partir da conjugação dessas áreas, vem sendo desenvolvido a infraestrutura necessária para a compreensão da possibilidade de um uso responsável de geoengenharia: eticamente viável, socialmente responsável, governável, ambiental, etc. (GOES; TUANA; KELLER, 2011).

Partindo de uma ótica materialista, poderia se argumentar que existem dois pontos de intersecção entre a natureza e a manutenção do desenvolvimento capitalista. O primeiro é que existe uma necessidade de, ou abandonar os objetivos de corte de emissões ou desacoplar o crescimento econômico do consumo energético. Caso contrário, até mesmo com um crescimento moderado iríamos alcançar um teto no tamanho da economia devido às leis da termodinâmica (HEIN; RUDELLE, 2020). O segundo é que apesar de avanços recentes, a produção

agrícola global ainda está sujeita aos ciclos naturais (BOEHLJE, 1996; URBAN, 1991). Essas duas intersecções formam uma contradição sistêmica que ameaça o processo de crescimento. O desafio aqui é conciliar esse crescimento com os limites físicos do planeta, que como vimos é restringido por limites energéticos na presença de restrições de emissões, e, ao mesmo tempo, expandir uma produção agrícola que depende largamente de condições climáticas específicas para maximizar a operação.

Uma forma de relaxar tanto a restrição de emissões quanto aliviar a pressão nos sistemas agrícolas e energéticos se dá através do gerenciamento de radiação solar. Dentre os cenários de produtividade agrícola possíveis, os mais estudados são os resultantes das intervenções a partir da GRS por sua facilidade de implementação, sensibilidade, probabilidade de uso e ao volume de incertezas relacionadas. Esse desvio intencional da luz do sol poderia mitigar parte do dano das mudanças climáticas. (GOVINDASAMY; CALDEIRA, 2000; LUNT *et al.*, 2008; RASCH *et al.*, 2008). Observe que contrário às mudanças climáticas (LOBELL; FIELD, 2007), o gerenciamento de radiação solar causaria que as perdas por estresse térmico fossem mitigadas enquanto os ganhos por fertilização de CO<sub>2</sub> fossem retidos (PONGRATZ, J. *et al.*, 2012).

O primeiro impacto do uso de GRS é a redução da incidência solar no planeta, uma vez que uma fração maior da energia solar seria refletida para fora do planeta. Incidência solar é uma importante variável no que tange o desenvolvimento das plantações. Pongratz. *et al.* (2012) abordam essa questão realizando estimativas dos impactos de GRS na produtividade agrícola, revelando que, contra intuitivamente, o uso de GRS causaria um efeito de ganho de produtividade agrícola. O efeito da queda na incidência solar é mais do que superado pelo controle de temperatura, diminuindo estresses térmicos, aliado com concentrações do fertilizante CO<sub>2</sub> duplicados, conforme é projetado para cenários de forte crescimento econômico (ALLEY *et al.*, 2007, p. 12). Mesmo considerando uma incidência solar menor, deve se considerar que, para a fotossíntese, a forma com que a luz atinge as plantas altera sua capacidade de desenvolvimento. No caso do GRS, a luz que incidiria seria mais difusa, aumentando a produção de fotossíntese. Segundo modelo gerado por Xia *et al.* (2016), a partir de uma injeção de 8Tg/ano de SO<sub>2</sub> a incidência da radiação difusa na terra aumentaria 11%. Este aumento na incidência da radiação difusa, combinado com menores estresses térmicos, elevaria a eficiência fotossintética, trazendo consigo ganhos da ordem de 3,8 + - 1.1 GtC/ano a mais de produtos primários (GU *et al.*, 1999, p. 31,429). Impactos secundários do uso dessa técnica seriam alterar a dinâmica de climas regionais e ter efeitos em variáveis climáticas além da temperatura como precipitação, ainda que, mais recentemente, Irvine *et al.* (2019) mostraram

que com uma aplicação de GRS para mitigar apenas metade do aquecimento global, apenas 0,4% da área terrestre não congelada observaria uma alteração extrema na temperatura, precipitação ou disponibilidade de recursos hídricos, o que não é consenso no campo, uma vez que os estudos que usaram erupções vulcânicas como *proxy* para o efeito da GRS notaram uma redução e redistribuição da precipitação, destacando a heterogeneidade dos impactos (CRANE-DROESCH; KRAVITZ; ABATZOGLOU, 2018; TRENBERTH; DAI, 2007). Vemos, também, que a dinâmica de quebra de safras seria alterada. Mudanças climáticas associadas com uma duplicação do dióxido de carbono levaria a um aumento de quebras de safra. Cenários com a presença de embranquecimento de nuvens tem um menor número de quebras de safra, quando comparado com o controle, ou seja, geoengenharia promove conservação em ambientes de mudanças climáticas (DAGON; SCHRAG, 2019). Porém, o estresse hídrico é a causa principal de quebra de safras em um clima futuro, com ou sem geoengenharia, revelando a importância da implementação de infraestrutura hídrica e alteração genética das plantações a fim de se tornarem mais resistentes a esse tipo de estresse. (PARKES; CHALLINOR; NICKLIN, 2015).

O campo da economia ainda é bastante árido no que tange geoengenharia apesar da necessidade de sua contribuição ser central. A maior incerteza em ciências climáticas não é física e, sim, econômica. São necessários estimativas e cenários de emissões melhores para que se desenvolvam modelos com mais acurácia (HAWKINS; SUTTON, 2009; HSIANG; KOPP, 2018). Alguns temas explorados em economia são: como o uso dessa tecnologia iria afetar desigualdades sociais, desenho de política pública, precificação de carbono, interação estratégica entre agentes, fontes de risco e incerteza em torno da geoengenharia. Apesar dessas contribuições, precisamos de um detalhamento em maior resolução nesse aspecto e por ora os impactos econômicos do uso de GRS ainda são desconhecidos (MACMARTIN *et al.*, 2016).

Descartando custos operacionais por serem relativamente insignificantes quando comparados com o produto global ou até mesmo ao produto de alguns países desenvolvidos e de renda média (BARRETT, 2008), um questionamento interessante se deve ao possível dano econômico de uma maior acidificação dos oceanos, e aqui o uso de GRS não endereça esse problema em nenhum aspecto, podendo até mesmo aumentá-lo. Além dos custos diretos mencionados, a alteração das temperaturas globais sem a diminuição dos gases de efeito estufa pode levar a consequências sérias como a diminuição das chuvas da monção indiana ou africana. Na sequência da erupção do Monte Pinatubo, foram observadas diminuições na precipitação e alguns modelos sugerem que isso pode ser um resultado de estratégias de GRS (RO-

BOCK, 2008a), nesse caso o custo do uso de GRS aumentaria dramaticamente, tendo em vista os danos causados à capacidade produtiva de zonas afetadas, que teriam seu estoque ambiental reduzido. Não são apenas custos ambientais que se apresentam: a possibilidade de um aumento de conflitos entre nações, uma vez que sua instalação pode ser feita de forma unilateral; os diversos problemas de governança para gerir um esforço global; e a definição do conceito de clima ótimo (BROVKIN *et al.*, 2009).

Riscos relevantes ainda antecedem a implementação das técnicas de geoengenharia. Eles se dão em torno da própria compreensão do sistema que rege o clima no planeta. A complexidade dos sistemas climáticos torna a tarefa de modelagem árdua no que tange previsões de diferentes cenários de possíveis implementações, uma vez que uma simplificação da interação de todas as moléculas da atmosfera se faz necessária e que, sem variáveis adicionais, vem sendo uma tarefa com resultados variados, ainda mais quando se trata de escalas de tempo de longo prazo com fatores humanos inclusos (KNUTTI *et al.*, 2009; NYCHKA, 2000). Esse risco inerente à falta de conhecimento ou de ferramentas para entender a fenomenologia serve como amplificador dos riscos de uso e aplicação dessas técnicas, já que um pequeno erro em sua aplicação poderia ter consequências com efeitos que podem perdurar por vários anos e que alterariam, em menor ou maior grau, a dinâmica reprodutiva de toda vida planetária por alterar o coeficiente de incidência solar. Por outro lado, essa mesma falta de compreensão amplifica os riscos de inação como quando observamos predicamentos serem subestimados e seu impacto real ser maior do que a previsão. Além disso, mais dúvidas circundam esse tema no sentido que o sistema climático pode conter pontos sem retorno em que a temperatura e outros fatores podem gerar mudanças rápidas e, potencialmente, muito destrutivas, já que sua quantidade e gatilhos são desconhecidos, afetando a performance econômica e ecossistemas. Esses eventos são difíceis de prever, raros, irreversíveis. (HEUTEL; MORENO-CRUZ; SHAYEGH, 2016).

Danos ambientais podem ser encarados como externalidades negativas criadas a partir de uma falha de mercado da atividade econômica. Uma solução típica para esse problema seria precificá-las baseada no dano econômico marginal causado pela emissão de uma unidade extra de poluentes. Argumenta-se que essa precificação seria alta na ausência de GRS (HEUTEL; MORENO-CRUZ; SHAYEGH, 2018) e por tanto a possibilidade do uso de GRS deslocaria o preço do carbono para baixo, diminuindo incentivos para reduzir emissões.

Existem diversas análises numéricas que pretendem modelar os efeitos da geoengenharia considerando os impactos econômicos. O mais comum deles são estudos que expandem o modelo Dinâmico Integrado do Clima e Economia (do inglês Dynamic Integrated Cli-

mate Economy - DICE). Este é um modelo climático simples que simula o clima da terra e o ciclo de carbono combinado com um modelo de produção econômica onde a tecnologia é exógena ao crescimento. Em termos simples, as variáveis do modelo interagem da seguinte forma: emissões de carbono a partir da produção aumenta os estoques de carbono nos oceanos e na atmosfera, que através da temperatura aumenta os danos econômicos.

O modelo DICE presume que políticas econômicas e climáticas devam ser elaboradas para otimizar o fluxo de consumo ao longo do tempo. Consumo deve ser interpretado como “consumo generalizado”, o que inclui não apenas o mercado de serviços e bens tradicional como comida e habitação, mas também itens como lazer, saúde e serviços ambientais<sup>12</sup>. (NORDHAUS, 2007, p. 33).

Esse modelo vem sendo usado para encontrar o preço de carbono ótimo e o melhor nível de mitigação no tempo. Bickel e Lane (2010) adaptam o modelo para incluir tanto gerenciamento de radiação solar quanto captura de carbono. Sendo que somente GRS passa a análise de custo-benefício, Moreno-Cruz, Ricke e Keith (2012) tentam definir o que seria um nível de aplicação de GRS no sentido ótimo de Pareto. Eles concluem que o nível ótimo de GRS seria compensar 56% ou mais dos danos induzidos por mudanças climáticas.

Weitzman (2015) desenvolve um modelo de votação a partir de super maiorias e expande as suas propriedades básicas a fim de contornar o problema de caroneiro e conciliar os diferentes incentivos de diferentes agências dentro dos cenários de aplicação de GRS.

Considerações éticas de como podemos decidir se somos permitidos a alterar o clima, e em qual extensão e condições e, mais além, considerando se essas intervenções não são uma forma de mascarar problemas introduzidos pela tecnologia com camadas adicionais de tecnologias, ao invés de alterar significativamente a forma como vivemos, são feitas em Betz (2012), Corner e Pidgeon (2010), Gardiner (2013; 2004) Huttunen, Skytén e Hildén (2015) e Jamieson (1996). Ainda nesse tema, uma preocupação relevante é acerca das possíveis justificações intergeracionais. Burns (2011) argumenta que o uso de GRS iria violar o princípio de equidade intergeracional, uma vez que a aplicação de GRS não pode ser terminada de forma abrupta e precisa ser continuada até que a fonte causadora da sua aplicação seja de alguma forma mitigada. Assim, ocorria uma transferência de risco para futuras gerações, violando

---

<sup>12</sup> The DICE model assumes that economic and climate policies should be designed to optimize the flow of consumption over time. Consumption should be interpreted as “generalized consumption,” which includes not only traditional market goods and services like food and shelter but also non-market items such as leisure, health status, and environmental services.

princípios de justiça intergeracional e benefícios presentes não devem ser criados gerando custos a gerações futuras.

Entretanto essa conjugação entre as ciências sociais e exatas, nesse caso, levanta uma questão interessante: alguns pesquisadores temem que a entrada dessas áreas poderia provocar uma consolidação de geoengenharia como opção de política ambiental de forma prematura antes mesmo que seus efeitos sejam plenamente compreendidos ou que avanços nas exatas sejam barrados caso as questões de governança não sejam resolvidas (BELLAMY; LEZAUN, 2017; FLEGAL *et al.*, 2019; STILGOE, 2015). Porém, é difícil enxergar a evolução do sistema climático desacoplado da evolução do sistema econômico (KUHNHENN, 2018). Além disso, substituir a diminuição da concentração de CO<sub>2</sub> por GRS pode ser uma estratégia economicamente ineficaz, uma vez que caso ocorra uma falha em manter a injeção de aerossóis, o resultado disso seria um catastrófico retorno às temperaturas sem o uso de GRS, causando uma mudança abrupta e em um curto espaço de tempo, que por sua vez maximiza o dano ambiental e social dessa aplicação (BICKEL; AGRAWAL, 2013; GOES; TUANA; KELLER, 2011).



## 5 CONCLUSÃO

Os ganhos do uso da geoengenharia talvez não sejam descentralizados e pode haver vencedores e perdedores, dependendo da técnica e intensidade, revelando o potencial para atritos militares internacionais. Seu berço, em 1996, já abrangia além das ciências naturais, as sociais, no tangente não só aos problemas de governança em relação à distribuição do custo da execução da geoengenharia, mas também da complexidade que os sistemas humanos acrescentam ao processo decisório como quando se destaca os benefícios que algumas regiões globais poderiam coletar caso o aquecimento global fosse intensificado. Regiões não navegáveis se tornariam navegáveis, a região de permafrost poderia se tornar produtiva e, inclusive, do ponto de vista militar ou de disputas em relação aos danos causados por essa geoengenharia já que não mais poderia se atribuir os acidentes naturais à apenas causas naturais, mas também à intervenção deliberada e intencional nos sistemas climáticos.

Geoengenharia é um tema que, inevitavelmente, caso aplicado, afetaria, em maior ou menor grau, todos ecossistemas do planeta em uma tentativa de manter as condições em que o consenso científico entende como ótimas para a humanidade e os subsistemas que a sustentam. Mudanças extremas nesses ecossistemas já aconteceram anteriormente como as que levaram a criação de grandes depósitos de matéria biológica com as quais alimentamos os motores de uma revolução econômica sem precedentes.

A melhor forma de reduzir o aquecimento global é, sem dúvida, diminuindo nossas emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Mas a economia global é viciada em energia, que é produzida principalmente por combustíveis de carbono fóssil. Como o crescimento econômico e o aumento da população mundial exigem cada vez mais energia, não podemos parar de usar combustíveis fósseis rapidamente nem em curto prazo. Se por um lado substituir esse vício por energias renováveis livres de dióxido de carbono e por eficiência energética será demorado, caro e difícil. Por outro lado, enquanto soluções efetivas são desenvolvidas (por exemplo, energia de fusão), o aquecimento global pode ser aliviado por outros métodos.<sup>13</sup>. (MING *et al.*, 2014, pg. 792)

A trama que une todo o conhecimento produzido nesse escopo é o de que não sabemos o suficiente e que trilhamos RCPs que nos colocarão em uma posição frágil no futuro do pon-

---

13 “The best way to reduce global warming is, without any doubt, cutting down our anthropogenic emissions of greenhouse gases. But the world economy is addict to energy, which is mainly produced by fossil carbon fuels. As economic growth and increasing world population require more and more energy, we cannot stop using fossil fuels quickly, nor in a short term.

On the one hand, replacing this addiction with carbon dioxide-free renewable energies, and energy efficiency will be long, expensive, and difficult. On the other hand, meanwhile effective solutions are developed (i.e. fusion energy), global warming can be alleviated by other methods.”

to de vista do aumento dos custos para nossa própria existência, a partir do empobrecimento ou inviabilização dos sistemas que suportam essa era de prosperidade, possivelmente trazendo/forçando/causando o uso de técnicas antes de elas estarem prontas para serem usadas ou, até mesmo, que seus efeitos sejam compreendidos de maneira adequada, devido ao momento de mudança climática antropogênica sem precedentes na nossa história. Os desafios de governança relacionados ao uso dessas técnicas podem, por si só, provocar tensões entre diferentes Estados, podendo conduzir até a guerra. Ainda é questionado se estudar essas técnicas não pode ser mais danoso, uma vez que sua instalação pode levar governos a não diminuírem emissões nem realizar outras implementações de contenção de danos ao meio ambiente já que a geoengenharia poderia, em certa medida, resolver parte dessas questões. Por outro lado, o risco de não as estudar acaba sendo ainda mais alto. Se dentro de algumas décadas nós estivermos em uma posição de sermos forçados a usá-las sem ter realizados os estudos necessários estaríamos em uma posição de desvantagem, com a teoria sobre o comportamento do sistema subdesenvolvida.

O principal discernimento que se extrai é da necessidade do uso conjunto desse crescente número de ferramentas que, com o passar do tempo, através de desenvolvimento tecnológico, se tornam disponíveis à sociedade já que a maior parte das técnicas apresentadas têm efeitos indiretos não desejados e sua diversificação é capaz de amenizá-los. Outras deficiências nessas áreas, no momento, são de modelos considerando curvas de aprendizado e de novas tecnologias que sejam capazes de reduzir custos, tanto implícitos como explícitos dessa abordagem, além de melhores previsões dos níveis de emissões de gases do efeito estufa com fonte antropogênica.

## REFERÊNCIAS

- AAS, Wenche *et al.* Global and regional trends of atmospheric sulfur. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 953, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37304-0>
- ALLEY, Richard *et al.* Climate change 2007: The physical science basis. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland. 21p**, [s. l.], 2007.
- ANGEL, R. Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1). **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 103, n. 46, p. 17184–17189, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.0608163103>
- ARNETH, A. *et al.* Clean the Air, Heat the Planet? **Science**, [s. l.], v. 326, n. 5953, p. 672–673, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1181568>
- ATAPATTU, S. Climate change and displacement: protecting ‘climate refugees’ within a framework of justice and human rights. **Journal of Human Rights and the Environment**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 86–113, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4337/jhre.2020.01.04>
- AUYERO, J.; MORAN, T.. The Dynamics of Collective Violence: Dissecting Food Riots in Contemporary Argentina. **Social Forces**, [s. l.], v. 85, n. 3, p. 1341–1367, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1353/sof.2007.0030>
- BALA, G.; DUFFY, P. B.; TAYLOR, K. E. Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 105, n. 22, p. 7664–7669, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.0711648105>
- BALA, G.; CALDEIRA, K.; NEMANI, R. Fast versus slow response in climate change: implications for the global hydrological cycle. **Climate Dynamics**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 423–434, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0583-y>
- BARNETT, J.; ADGER, W. Climate change, human security and violent conflict. **Political geography**, [s. l.], v. 26, n. 6, p. 639–655, 2007.
- BARRETT, S. The Incredible Economics of Geoengineering. **Environmental and Resource Economics**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 45–54, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10640-007-9174-8>
- BELLAMY, R.; LEZAUN, J. Crafting a public for geoengineering. **Public Understanding of Science**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 402–417, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0963662515600965>
- BELLEMARE, M. Rising Food Prices, Food Price Volatility, and Social Unrest. **American Journal of Agricultural Economics**, [s. l.], v. 97, n. 1, p. 1–21, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ajae/aau038>
- BETZ, G. The case for climate engineering research: an analysis of the “arm the future” ar-

gument. **Climatic Change**, [s. l.], v. 111, n. 2, p. 473–485, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0207-5>

BICKEL, J. *et al.* Climate Engineering. In: LOMBORG, Bjorn (org.). **Smart Solutions to Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. p. 9–73. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511779015.002>. Acesso em: 6 abr. 2020.

BICKEL, J.; AGRAWAL, S. Reexamining the economics of aerosol geoengineering. **Climatic Change**, [s. l.], v. 119, n. 3, p. 993–1006, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0619-x>

BICKEL, J.; LANE, L. **CONSIDERING CLIMATE ENGINEERING AS A RESPONSE TO CLIMATE CHANGE: An Analysis of Climate Engineering as a Response to Climate Change**. [S. l.]: Copenhagen Consensus Center, 2018. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/resrep16324.4>. Acesso em: 22 abr. 2020.

BICKEL, J.; LANE, L. Climate engineering. **Smart Solutions to Climate Change: Comparing Costs and Benefits**, [s. l.], p. 9–51, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511779015.002>

BOEHLJE, M. Industrialization of agriculture: what are the implications? **Choices**, [s. l.], v. 11, n. 316-2016–6650, 1996.

BOHLE, H.; DOWNING, T.; WATTS, M. Climate change and social vulnerability: toward a sociology and geography of food insecurity. **Global environmental change**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 37–48, 1994.

BOHSTEDT, J. **The Politics of Provisions: Food Riots, Moral Economy, and Market Transition in England, c. 1550–1850**. [S. l.]: Ashgate Publishing, Ltd., 2013.

BOWER, K. *et al.* Computational assessment of a proposed technique for global warming mitigation via albedo-enhancement of marine stratocumulus clouds. **Atmospheric Research**, [s. l.], v. 82, n. 1–2, p. 328–336, 2006.

BRASSEUR, G. P.; ROECKNER, E. Impact of improved air quality on the future evolution of climate. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 32, n. 23, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005GL023902>. Acesso em: 12 out. 2020.

BROVKIN, V. *et al.* Geoengineering climate by stratospheric sulfur injections: Earth system vulnerability to technological failure. **Climatic Change**, [s. l.], v. 92, n. 3, p. 243–259, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9490-1>

BUDYKO, M. I. Climate Changes. American Geophysical Union, Washington, DC. 244 pp. **English translation of**, [s. l.], 1974.

BUDYKO, M. I. On present-day climatic changes. **Tellus**, [s. l.], v. 29, n. 3, p. 193–204, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1977.tb00725.x>

BUDYKO, M. I. **The Earth's Climate**: [S. l.]: Academic Press, Inc., 1982. *E-book*.

- BURNS, W. C. G. **Climate Geoengineering: Solar Radiation Management and its Implications for Intergenerational Equity**. Rochester, NY: Social Science Research Network, 2011. SSRN Scholarly Paper. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/abstract=1837833>. Acesso em: 21 mar. 2020.
- CALDEIRA, K; BALA, G. Reflecting on 50 years of geoengineering research. **Earth's Future**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 10–17, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2016EF000454>
- CAO, L.; BALA, G.; CALDEIRA, K. Climate response to changes in atmospheric carbon dioxide and solar irradiance on the time scale of days to weeks. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 034015, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034015>
- CEPPI, P.; GREGORY, J. M. A refined model for the Earth's global energy balance. **Climate Dynamics**, [s. l.], v. 53, n. 7, p. 4781–4797, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04825-x>
- CORNER, A.; PIDGEON, N. Geoengineering the Climate: The Social and Ethical Implications. **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 24–37, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00139150903479563>
- CRANE-DROESCH, A.; KRAVITZ, B.; ABATZOGLOU, J. T. Using Deep Learning to Model Potential Impacts of Geoengineering via Solar Radiation Management on US Agriculture. **AGU Fall Meeting Abstracts**, [s. l.], v. 11, 2018. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2018AGUFMGC11I1011C>. Acesso em: 21 mar. 2020.
- CRUTZEN, P. J. Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? **Climatic Change**, [s. l.], v. 77, n. 3, p. 211, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9101-y>
- DAGON, K.; SCHRAG, D. P. Quantifying the effects of solar geoengineering on vegetation. **Climatic Change**, [s. l.], v. 153, n. 1, p. 235–251, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02387-9>
- DAVID ATTENBOROUGH: “THE GARDEN OF EDEN IS NO MORE”. READ HIS DAVOS SPEECH IN FULL. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2019/01/david-attenborough-transcript-from-crystal-award-speech/>. Acesso em: 10 out. 2019.
- DICKINSON, R. E. Climate engineering a review of aerosol approaches to changing the global energy balance. **Climatic Change**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 279–290, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00142576>
- DUBASH, NAVROZ K. Copenhagen: Climate of Mistrust. **Economic and Political Weekly**, [s. l.], v. 44, n. 52, p. 8–11, 2009.
- EARLY, J. T. Space-based solar shield to offset greenhouse effect. **Journal of the British Interplanetary Society**, [s. l.], v. 42, p. 567–569, 1989.
- EHRLICH, P. R.; EHRLICH, A. H. Can a collapse of global civilization be avoided? **Pro-**

ceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, [s. l.], v. 280, n. 1754, p. 20122845, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.2845>

ELLERY, A.. A New Approach to Geoengineering: Manna From Heaven. [s. l.], v. 17, p. 2808, 2015.

ENVIRONMENTAL POLLUTION PANEL. Restoring the quality of our environment. **Washington, DC: The White House. Appendix Y**, [s. l.], v. 4, 1965. Disponível em: <https://www.documentcloud.org/documents/3227654-PSAC-1965-Restoring-the-Quality-of-Our-Environment.html>. Acesso em: 30 mar. 2020.

FASIHI, M.; EFIMOVA, O.; BREYER, C.. Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub> direct air capture plants. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 224, p. 957–980, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>

FLANNERY, B. P. *et al.* Geoengineering climate. **Engineering Response to Global Climate Change**, [s. l.], p. 379–427, 1997.

FLEGAL, J. A. *et al.* Solar Geoengineering: Social Science, Legal, Ethical, and Economic Frameworks. **Annual Review of Environment and Resources**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 399–423, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030032>

GARDINER, S. M. Ethics and Global Climate Change. **Ethics**, [s. l.], v. 114, n. 3, p. 555–600, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1086/382247>

GARDINER, S. M. The Desperation Argument for Geoengineering. **PS: Political Science & Politics**, [s. l.], v. 46, n. 1, p. 28–33, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S1049096512001424>

GOES, M.; TUANA, N.; KELLER, K.. The economics (or lack thereof) of aerosol geoengineering. **Climatic Change**, [s. l.], v. 109, n. 3, p. 719–744, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9961-z>

GOVINDASAMY, B.; CALDEIRA, K.; DUFFY, P. B. Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate climate change from a quadrupling of CO<sub>2</sub>. **Global and Planetary Change**, [s. l.], v. 37, n. 1, Evaluation, Intercomparison and Application of Global Climate Models, p. 157–168, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(02\)00195-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(02)00195-9)

GOVINDASAMY, B; CALDEIRA, K. Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate CO<sub>2</sub>-induced climate change. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 27, n. 14, p. 2141–2144, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/1999GL006086>

GU, L. *et al.* Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness: Results from two North American deciduous forests. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 104, n. D24, p. 31421–31434, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/1999JD901068>

GUNDERSON, R.; PETERSEN, B.; STUART, D. A Critical Examination of Geoengineering: Economic and Technological Rationality in Social Context. **Sustainability**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 269, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su10010269>

GUNDERSON, R.; STUART, D.; PETERSEN, B.. Ideological obstacles to effective climate policy: The greening of markets, technology, and growth: **Capital & Class**, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0309816817692127>. Acesso em: 15 out. 2020.

GUNDERSON, R; STUART, D.; PETERSEN, B. Materialized ideology and environmental problems: The cases of solar geoengineering and agricultural biotechnology. **European Journal of Social Theory**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 389–410, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1368431019839252>

HANSEN, J. *et al.* Potential climate impact of Mount Pinatubo eruption. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 215–218, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/91GL02788>

HAWKINS, E.; SUTTON, R. The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], v. 90, n. 8, p. 1095–1108, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1>

HECKENDORN, P. *et al.* The impact of geoengineering aerosols on stratospheric temperature and ozone. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 045108, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045108>

HEIN, A. M.; RUDELLE, J. Energy Limits to the Gross Domestic Product on Earth. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2005.05244v1>. Acesso em: 14 out. 2020.

HEUTEL, G.; MORENO-CRUZ, J.; SHAYEGH, S. Climate tipping points and solar geoengineering. **Journal of Economic Behavior & Organization**, [s. l.], v. 132, Thresholds, Tipping Points, and Random Events in Dynamic Economic Systems, p. 19–45, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2016.07.002>

HEUTEL, G.; MORENO-CRUZ, J.; SHAYEGH, S.. Solar geoengineering, uncertainty, and the price of carbon. **Journal of Environmental Economics and Management**, [s. l.], v. 87, p. 24–41, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.11.002>

HSIANG, S.; KOPP, R.. An Economist’s Guide to Climate Change Science. **Journal of Economic Perspectives**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 3–32, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1257/jep.32.4.3>

HUMPHREYS, W. J. Volcanic dust and other factors in the production of climatic changes, and their possible relation to ice ages. **Journal of the Franklin Institute**, [s. l.], v. 176, n. 2, p. 131–160, 1913. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(13\)91294-1](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(13)91294-1)

HUTTUNEN, S.; SKYTÉN, E.; HILDÉN, M. Emerging policy perspectives on geoengineering: An international comparison. **The Anthropocene Review**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 14–32, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/2053019614557958>

IDMC | GLOBAL REPORT ON INTERNAL DISPLACEMENT 2019. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.internal-displacement.org/global-report/grid2019/>. Acesso em: 22 abr. 2020.

IRVINE, P. *et al.* Halving warming with idealized solar geoengineering moderates key climate hazards. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 295–299, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0398-8>

JAMIESON, D. Ethics and intentional climate change. **Climatic Change**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 323–336, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00142580>

JOHNSON, K. *et al.* Carbon dioxide removal options: a literature review identifying carbon removal potentials and costs. [s. l.], 2017.

KARL, T. R. Modern Global Climate Change. **Science**, [s. l.], v. 302, n. 5651, p. 1719–1723, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1090228>

KEITH, D. Geoengineering the Climate: History and Prospect. [s. l.], p. 40, 2000.

KEITH, D. Geoengineering. **Nature**, [s. l.], v. 409, n. 6818, p. 420–420, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/35053208>

KEITH, D. Photophoretic levitation of engineered aerosols for geoengineering. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 107, n. 38, p. 16428–16431, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1009519107>

KEITH, D. *et al.* Stratospheric solar geoengineering without ozone loss. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 113, n. 52, p. 14910–14914, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1615572113>

KEITH, D.; DOWLATABADI, H. a serious look at geoengineering. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, [s. l.], v. 73, n. 27, p. 289–293, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/91EO00231>

KELLOGG, W. W.; SCHNEIDER, S. H. Climate Stabilization: For Better or for Worse? **Science**, [s. l.], v. 186, n. 4170, p. 1163–1172, 1974.

KENNETT, D. J. *et al.* Development and disintegration of Maya political systems in response to climate change. **Science**, [s. l.], v. 338, n. 6108, p. 788–791, 2012.

KNUTTI, R. *et al.* Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 23, n. 10, p. 2739–2758, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3361.1>

KNUTTI, R.; RUGENSTEIN, M. A. A.; HEGERL, G. C. Beyond equilibrium climate sensitivity. **Nature Geoscience**, [s. l.], v. 10, n. 10, p. 727–736, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ngeo3017>

KRAVITZ, B. *et al.* An overview of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 118, n. 23, p. 13,103–13,107, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013JD020569>

KRAVITZ, B. *et al.* The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). **Atmospheric Science Letters**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 162–167, 2011. Disponível em:



<https://doi.org/10.1002/asl.316>

KRAWCHUK, M. A. *et al.* Global Pyrogeography: the Current and Future Distribution of Wildfire. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. e5102, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005102>

KUHNHENN, K. **Economic growth in mitigation scenarios: a blind spot in climate science**. [S. l.]: Berlin: Heinrich Boll Foundation, 2018.

LAL, R. Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. **Food Policy**, [s. l.], v. 36, The challenge of global food sustainability, p. S33–S39, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.12.001>

LANE, L. *et al.* Workshop report on managing solar radiation. [s. l.], 2007.

LATHAM, J. Control of global warming? **Nature**, [s. l.], v. 347, n. 6291, p. 339–340, 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/347339b0>

LEE, H.. Intergovernmental Panel on Climate Change. [s. l.], 2007.

LELIEVELD, J. *et al.* Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 116, n. 15, p. 7192–7197, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>

LENTON, T. M.; VAUGHAN, N. E. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 9, n. 15, p. 5539–5561, 2009.

LIU, Y.; STANTURF, J.; GOODRICK, S. Trends in global wildfire potential in a changing climate. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 259, n. 4, Adaptation of Forests and Forest Management to Changing Climate, p. 685–697, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.002>

LOBELL, D. B.; FIELD, C. B. Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 014002, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/1/014002>

LOCKLEY, A.; MACMARTIN, D.; HUNT, H. An update on engineering issues concerning stratospheric aerosol injection for geoengineering. **Environmental Research Communications**, [s. l.], v. 2, n. 8, p. 082001, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2515-7620/aba944>

LUNT, D. J. *et al.* “Sunshade World”: A fully coupled GCM evaluation of the climatic impacts of geoengineering. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 35, n. 12, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2008GL033674>. Acesso em: 22 mar. 2020.

MA, Q. Greenhouse Gases: Refining the Role of Carbon Dioxide. **NASA Goddard Institute for Space Studies**. <http://www.giss.nasa.gov/research/intro/ma>, [s. l.], v. 1, 1998.

MACMARTIN, D. G. *et al.* Geoengineering with stratospheric aerosols: What do we not

know after a decade of research? **Earth's Future**, [s. l.], p. 543–548, 2016. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/2016EF000418@10.1002/\(ISSN\)2328-4277.GEOENGINE1](https://doi.org/10.1002/2016EF000418@10.1002/(ISSN)2328-4277.GEOENGINE1)

MARCHETTI, C. On geoengineering and the CO<sub>2</sub> problem. **Climatic Change**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 59–68, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00162777>

MARROUCH, W.; AMRITA, R. C. International Environmental Agreements: Doomed to Fail or Destined to Succeed? A Review of the Literature. **International Review of Environmental and Resource Economics**, [s. l.], v. /9, n. 3–4, p. 245–319, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1561/101.00000078>

MATTER, J. M. *et al.* Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. **Science**, [s. l.], v. 352, n. 6291, p. 1312–1314, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aad8132>

MATTHEWS, H. D.; CALDEIRA, K. Transient climate–carbon simulations of planetary geoengineering. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 104, n. 24, p. 9949–9954, 2007.

MCINNES, C. R. Mars Climate Engineering Using Orbiting Solar Reflectors. *In*: BADESCU, Viorel (org.). **Mars: Prospective Energy and Material Resources**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. p. 645–659. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-03629-3\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-642-03629-3_25). Acesso em: 30 set. 2020.

MING, T. *et al.* Fighting global warming by climate engineering: Is the Earth radiation management and the solar radiation management any option for fighting climate change? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 31, p. 792–834, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.032>

MODAK, A. *et al.* Why must a solar forcing be larger than a CO<sub>2</sub> forcing to cause the same global mean surface temperature change? **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 044013, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/044013>

MORENO-CRUZ, J. B.; RICKE, K. L.; KEITH, D. W. A simple model to account for regional inequalities in the effectiveness of solar radiation management. **Climatic Change**, [s. l.], v. 110, n. 3, p. 649–668, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0103-z>

MORIYAMA, R. *et al.* The cost of stratospheric climate engineering revisited. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, [s. l.], v. 22, n. 8, p. 1207–1228, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11027-016-9723-y>

NORDHAUS, W D. **The challenge of global warming: economic models and environmental policy**. [S. l.]: Citeseer, 2007. v. 4

NOAA - National Centers for Environmental Information, State of the Climate: **Global Climate Report for Annual 2019**, jan. 2020. Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201913>. Acesso em: 17 out. 2020.

NYCHKA, D. Challenges in Understanding the Atmosphere. **Journal of the American Statistical Association**, [s. l.], v. 95, n. 451, p. 972–975, 2000. Disponível em:

<https://doi.org/10.1080/01621459.2000.10474287>

PARKES, B.; CHALLINOR, A.; NICKLIN, K. Crop failure rates in a geoengineered climate: impact of climate change and marine cloud brightening. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 084003, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084003>

PARKHOMENKO, V P. Modeling of global and regional climate response to solar radiation management. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 1141, p. 012057, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1141/1/012057>

PIRELIÔMETRO. *In*: WIKIPÉDIA, A ENCICLOPÉDIA LIVRE. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Pireli%C3%B4metro&oldid=55136730>. Acesso em: 5 out. 2019.

PITARI, G. *et al.* Stratospheric ozone response to sulfate geoengineering: Results from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 119, n. 5, p. 2629–2653, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013JD020566>

PONGRATZ, J. *et al.* Crop yields in a geoengineered climate. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 101–105, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate1373>

PONGRATZ, J. *et al.* Coupled climate–carbon simulations indicate minor global effects of wars and epidemics on atmospheric CO<sub>2</sub> between ad 800 and 1850. **The Holocene**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 843–851, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0959683610386981>

POPE, F. D. *et al.* Stratospheric aerosol particles and solar-radiation management. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 2, n. 10, p. 713–719, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate1528>

PRESIDENT’S SCIENCE ADVISORY COMMITTEE, PSAC. **Restoring the quality of our environment**. Washington, DC: Executive office of the president, 1965. Disponível em: <https://ozonedepletiontheory.info/Papers/Revelle1965AtmosphericCarbonDioxide.pdf>. Acesso em: 9 set. 2020.

RAMANATHAN, V. *et al.* Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle. **Science**, [s. l.], v. 294, n. 5549, p. 2119–2124, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1064034>

RASCH, P. J. *et al.* An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [s. l.], v. 366, n. 1882, p. 4007–4037, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0131>

RASCH, P. J.; CRUTZEN, P. J.; COLEMAN, D. B. Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols: The role of particle size. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 35, n. 2, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007GL032179>. Acesso em: 4 out. 2020.

READ, P.; LERMIT, J. Bio-energy with carbon storage (BECS): A sequential decision ap-

proach to the threat of abrupt climate change. **Energy**, [s. l.], v. 30, n. 14, International Energy Workshop, p. 2654–2671, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.07.003>

REALMONTE, G. *et al.* An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways. **Nature Communications**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 3277, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10842-5>

REYER, C.; GUERICKE, M.; IBISCH, P. L. Climate change mitigation via afforestation, reforestation and deforestation avoidance: and what about adaptation to environmental change? **New Forests**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 15–34, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11056-008-9129-0>

RICHTER, J. H. *et al.* Stratospheric Dynamical Response and Ozone Feedbacks in the Presence of SO<sub>2</sub> Injections. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 122, n. 23, p. 12,557–12,573, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2017JD026912>

RICKE, K. L.; MORENO-CRUZ, J. B.; CALDEIRA, K. Strategic incentives for climate geoengineering coalitions to exclude broad participation. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 014021, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014021>

RICKE, K. L.; MORGAN, M. G.; ALLEN, M. R. Regional climate response to solar-radiation management. **Nature Geoscience**, [s. l.], v. 3, n. 8, p. 537–541, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ngeo915>

RIGAUD, K. K. *et al.* **Groundswell: Preparing for Internal Climate Migration**. World Bank, Washington, DC. \copyright World Bank. [S. l.: s. n.], 2018.

RITCHIE, H.; ROSER, M. CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions. **Our World in Data**, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 1 nov. 2020.

ROBINSON, J. *et al.* How deep is deep enough? Ocean iron fertilization and carbon sequestration in the Southern Ocean. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 41, n. 7, p. 2489–2495, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013GL058799>

ROBOCK, A. 20 Reasons Why Geoengineering May Be a Bad Idea. **Bulletin of the Atomic Scientists**, [s. l.], v. 64, n. 2, p. 14–18, 2008a. Disponível em: <https://doi.org/10.2968/064002006>

ROBOCK, A. *et al.* Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 36, n. 19, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2009GL039209>. Acesso em: 25 nov. 2019.

ROBOCK, A. Whither geoengineering? **Science**, [s. l.], v. 320, n. 5880, p. 1166–1167, 2008b.

ROBOCK, A.; OMAN, L.; STENCHIKOV, Georgiy L. Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO<sub>2</sub> injections. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 113, n. D16, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2008JD010050>. Acesso em: 22 abr. 2020.

- SALTER, S.; SORTINO, G.; LATHAM, J. Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [s. l.], v. 366, n. 1882, p. 3989–4006, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0136>
- SAMSET, B. H. *et al.* Climate Impacts From a Removal of Anthropogenic Aerosol Emissions. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 45, n. 2, p. 1020–1029, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2017GL076079>
- SANFORD, T. *et al.* The climate policy narrative for a dangerously warming world. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 164–166, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate2148>
- SCHELLING, T. C. Climatic change: Implications for welfare and policy. **Changing climate**, [s. l.], p. 442–482, 1983.
- SCHELLING, T. C. The economic diplomacy of geoengineering. **Climatic Change**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 303–307, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00142578>
- SCHLEUSSNER, C. F. *et al.* Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 6, n. 9, p. 827–835, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate3096>
- SCHWARTZ, S. E. Unrealized Global Temperature Increase: Implications of Current Uncertainties. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 123, n. 7, p. 3462–3482, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2017JD028121>
- SCIENCE, Committee on; WARMING, Public Policy (US) Panel on Policy Implications of Greenhouse. **Policy implications of greenhouse warming: mitigation, adaptation, and the science base**. [S. l.]: National Academies Press, 1992.
- SHEPHERD, J. G. Geoengineering the climate: an overview and update. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [s. l.], v. 370, n. 1974, p. 4166–4175, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0186>
- SHINDELL, D.; SMITH, C. J. Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels. **Nature**, [s. l.], v. 573, n. 7774, p. 408–411, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1554-z>
- SMITH, J.; DYKEMA, J. A.; KEITH, D. W. Production of Sulfates Onboard an Aircraft: Implications for the Cost and Feasibility of Stratospheric Solar Geoengineering. **Earth and Space Science**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 150–162, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2018EA000370>
- SMITH, P. Land use change and soil organic carbon dynamics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [s. l.], v. 81, n. 2, p. 169–178, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9138-y>

SMITH, P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 1315–1324, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.13178>

SMITH, W. The cost of stratospheric aerosol injection through 2100. **Environmental Research Letters**, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba7e7>. Acesso em: 26 set. 2020.

SPASH, C. L. This Changes Nothing: The Paris Agreement to Ignore Reality. **Globalizations**, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 928–933, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14747731.2016.1161119>

STERN, D. I. Global sulfur emissions from 1850 to 2000. **Chemosphere**, [s. l.], v. 58, n. 2, p. 163–175, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.08.022>

STIGLITZ, J. E. Overcoming the Copenhagen failure with flexible commitments. **Economics of Energy & Environmental Policy**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 29–36, 2015.

STILGOE, J. **Experiment earth: responsible innovation in geoengineering**. [S. l.]: Routledge, 2015.

STRECK, C.; SCHOLZ, S. M. The role of forests in global climate change: whence we come and where we go. **International Affairs**, [s. l.], v. 82, n. 5, p. 861–879, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1468-2346.2006.00575.x>

TELLER, E. *et al.* **Long-range weather prediction and prevention of climate catastrophes: a status report**. US Department of Energy, Lawrence Livermore National Laboratory. [S. l.]: UCRL-JC-135414, 1999.

TELLER, E.; HYDE, T.; WOOD, L. **Active climate stabilization: Practical physics-based approaches to prevention of climate change**. [S. l.]: Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States), 2002.

TELLER, E.; WOOD, L.; HYDE, R. **Global warming and ice ages: I. Prospects for physics-based modulation of global change**. [S. l.]: Lawrence Livermore National Lab., 1996.

TILMES, S *et al.* The hydrological impact of geoengineering in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 118, n. 19, p. 11,036-11,058, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jgrd.50868>

TRENBERTH, K. E.; DAI, A. Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 34, n. 15, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007GL030524>. Acesso em: 31 mar. 2020.

URBAN, T. N. Agricultural industrialization: It's inevitable. **Choices**, [s. l.], v. 6, n. 316-2016–7592, 1991.

VAN VUUREN, D. P. *et al.* The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, [s. l.], v. 109, n. 1, p. 5, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

VAUGHAN, N. E.; LENTON, T. M. **A review of climate geoengineering proposals**. *Climatic Change*, [s. l.], v. 109, n. 3, p. 745–790, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0027-7>

WAYNE, G. The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways. [s. l.], p. 25, [s.d.].

WEITZMAN, M. L. A Voting Architecture for the Governance of Free-Driver Externalities, with Application to Geoengineering. **The Scandinavian Journal of Economics**, [s. l.], v. 117, n. 4, p. 1049–1068, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/sjoe.12120>

WISCHNATH, G.; BUHAUG, H. Rice or riots: On food production and conflict severity across India. **Political Geography**, [s. l.], v. 43, Special Issue: Climate Change and Conflict, p. 6–15, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2014.07.004>

XIA, L. *et al.* Stratospheric sulfate geoengineering could enhance the terrestrial photosynthesis rate. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 1479–1489, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-16-1479-2016>

XIA, L. *et al.* Impacts of stratospheric sulfate geoengineering on tropospheric ozone. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 17, n. 19, p. 11913–11928, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-17-11913-2017>

YOON, J. *et al.* Reviews and syntheses: Ocean iron fertilization experiments – past, present, and future looking to a future Korean Iron Fertilization Experiment in the Southern Ocean (KIFES) project. **Biogeosciences**, [s. l.], v. 15, n. 19, p. 5847–5889, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-15-5847-2018>

ZHANG, Z. *et al.* Review of geoengineering approaches to mitigating climate change. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 103, Carbon Emissions Reduction: Policies, Technologies, Monitoring, Assessment and Modeling, p. 898–907, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.076>

**APÊNDICE A – TERMOS-CHAVE UTILIZADAS PARA A PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.**

<b>Português</b>	<b>Inglês</b>
geoengenharia mudanças climáticas	geoengineering climate change
geoengenharia radiação solar	geoengineering solar radiation
economia da geoengenharia	economics of geoengineering
economia gestão da radiação solar	economics solar radiation management
impactos econômicos da geoengenharia	geoengineering economics impacts
projeto de intercomparação do modelo de geoengenharia	geoengineering model intercomparison project
geoengenharia agricultura	geoengineering agriculture
previsão de geoengenharia	geoengineering prediction
gestão de radiação solar	solar radiation management
política de geoengenharia	geoengineering policy
descarte direto no oceano	direct ocean disposal
métodos de geoengenharia	geoengineering methods
geoengenharia social	geoengineering social