

1

Introdução

O aumento da temperatura média dos oceanos e do ar perto da superfície do planeta tem afetado não só o meio ambiente, mas a economia e a saúde humana. O aquecimento global possui uma ligação direta com as mudanças ambientais, o que muda os padrões climáticos levando a consequências como: diminuição da cobertura de gelo e aumento do nível do mar (meio ambiente); enchentes e secas (economia); e, de acordo com Saldiga *et al.* [1], mudanças nos padrões de distribuição das doenças infecto contagiosas (saúde humana).

O efeito estufa é parte de uma sequência de eventos, figura 1.1, que se inicia quando aproximadamente um terço da energia solar é refletida pela atmosfera, uma pequena parte é absorvida pela mesma e dois terços é absorvida pela superfície da Terra. Para haver o equilíbrio energético, a Terra irradia a mesma quantidade de energia absorvida de volta para o espaço.

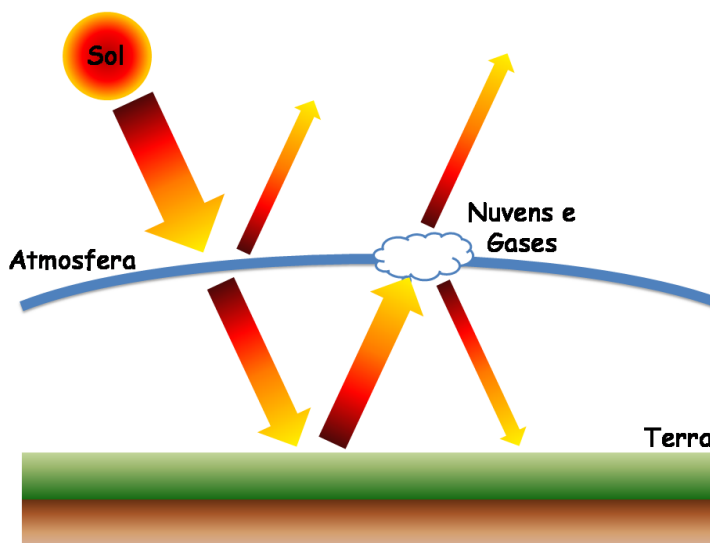


Figura 1.1: Esquema ilustrativo do efeito estufa.

O efeito estufa é um processo que ocorre quando uma parte da radiação térmica emitida pela superfície terrestre (terra e mar) é absorvida pela atmosfera, incluindo nuvens e determinados gases, e irradia por sua vez parte da energia absorvida de volta para a superfície. Como consequência disso, o calor fica retido, não sendo libertado para o espaço. O efeito estufa natural intensificado causa o aquecimento global [2].

Muitos estudiosos da área [3–5] acreditam que as temperaturas globais continuarão a subir e por isso diversas atitudes para reduzir o aquecimento global têm sido tomadas. A principal medida mundial de combate é o Protocolo

de Quioto, aberto para assinaturas em 1997, expirado no final de 2012 e estendido até 2020. Esse protocolo constituiu um compromisso, para a redução dos gases do efeito estufa (GEE) considerados como causa do aquecimento global derivada de atividades humanas. São gases do efeito estufa o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e os gases fluorados (CFCs etc).

De acordo com o relatório de mudanças climáticas de 2007 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*), o CO_2 tem a maior contribuição dentre os GEE, o que o transforma no principal gás a ser atacado. A figura 1.2 ilustra essa afirmação, com dados obtidos em IPCC 2007 [6], onde é mostrada a participação dos diferentes GEE antropogênicos no total de emissões em 2004 em termos de CO_2 equivalente (CO_2 -eq – descreve a quantidade de emissões de CO_2 que causariam o mesmo potencial de aquecimento global, medido sobre uma escala de tempo específica, geralmente 100 anos).

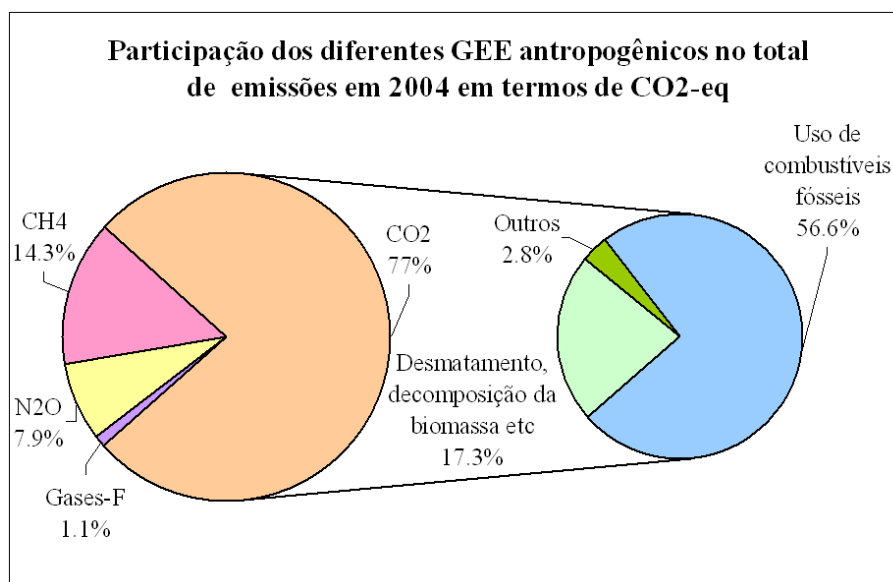


Figura 1.2: Participação dos diferentes GEE antropogênicos no total de emissões em 2004 em termos de CO_2 -eq, dados obtidos em IPCC 2007.

Existe uma série de maneiras para a mitigação dos GEE, dentre eles alguns que podem ser aplicados ao CO_2 , como o sequestro e o armazenamento de carbono (CCS - *Carbon Capture and Sequestration*). Esse processo é composto de três etapas: captura, transporte e sequestro. A captura pode ser feita em fontes estacionárias, como em centrais termoeletricas, refinarias e indústrias de produção de cimento. Ou pela atmosfera, o que não é prático, uma vez que a concentração de CO_2 migra rapidamente de sua fonte. O transporte pode ser feito por gasodutos, navios ou caminhões. A etapa final do processo é o sequestro, que garante a retenção do gás. Este pode ser feito por injeção

em formações geológicas, como em reservatórios de petróleo e gás esgotados, formações salinas profundas com rochas capeadoras adequadas e formações profundas de carvão.

Projetos de armazenamento de CO₂ em reservatórios geológicos já estão em atividade ao redor do mundo: Frio (EUA) [7], Ketzin (Alemanha) [8], Nagaoka (Japão) [9], Sleipner (Noruega) [10], In Salah (Argélia) [11]. Esse progresso pode ser atribuído, em parte, ao aproveitamento da experiência e da tecnologia usada na indústria de petróleo e gás, como em operações de recuperação avançada de óleo (EOR - *Enhanced Oil Recovery*). Entretanto, há uma série de questões específicas ao armazenamento geológico que requerem conhecimento adicional, uma vez que é preciso assegurar que o CO₂ possa ser armazenado com segurança por milhares de anos. Deve-se ainda considerar que o processo possui incertezas associadas. Do mesmo modo, avaliar os riscos e desenvolver uma estratégia de armazenamento para reduzir essas incertezas são parte essencial do processo de segurança e um facilitador na obtenção de autorizações para um projeto de armazenamento geológico [12].

De acordo com o que foi exposto, o objetivo principal desta tese consiste no estabelecimento de uma metodologia para a quantificação do risco da injeção de CO₂ em um cenário pré-definido. Além disso, essa metodologia deve fornecer informações importantes aos analistas e tomadores de decisão, acerca das fontes de perigo presentes no processo de injeção que requerem mais atenção e das incertezas associadas a elas.

No capítulo 2, os principais problemas associados ao processo de injeção de CO₂ registrados e investigados na literatura são explicados e alguns métodos de avaliação são exibidos. Casos de acidentes com vazamento de CO₂ por causas naturais e industriais são apresentados no capítulo 3. Bem como, métodos de monitoramento e medidas de remediação. Os elementos da análise probabilística, juntamente com uma síntese dos conceitos associados a eles são reunidos no capítulo 4.

No capítulo 5, os conceitos expostos no capítulo anterior, são investigados e aplicados em um modelo sintético de reservatório com falha geológica para avaliação da probabilidade de reativação. Além disso, através de uma abordagem analítica, é feita uma análise comparativa dos métodos probabilísticos. Por fim, uma análise probabilística é realizada em um campo de petróleo *offshore* brasileiro, reforçando a aplicabilidade dos conceitos probabilísticos na engenharia de reservatórios geológicos.

A partir dessa coleta de informações, no capítulo 6, a metodologia de avaliação do risco da injeção de CO₂ para armazenamento em reservatórios geológicos é apresentada através de um processo semi-quantitativo. Alguns

enfoques da literatura são discutidos, as etapas do desenvolvimento da metodologia são exibidas, bem como uma aplicação e a discussão dos resultados.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões e a partir das contribuições desta tese, sugestões para a continuidade dos estudos relacionados à avaliação do risco da injeção de CO₂ em reservatórios geológicos, como parte de uma das etapas do CCS, são listadas.