

### 3

## Histórico de acidentes, formas de monitoramento e medidas de remediação

Este capítulo apresenta informações a respeito dos acidentes relacionados ao armazenamento de CO<sub>2</sub>, dos métodos de monitoramento disponíveis e das medidas de remediação que podem ser tomadas caso o vazamento de CO<sub>2</sub> ocorra. Essas informações estão diretamente ligadas com a aceitação ou não do risco de um determinado cenário. Uma fonte de perigo de um cenário específico pode ter seu valor de risco considerado, pelos tomadores de decisão, como aceitável ou não, devido ao histórico de acidentes desse problema e pelas medidas de monitoramento e remediação disponíveis.

### 3.1

#### Histórico de acidentes

O histórico de acidentes em campos de armazenamento geológico de dióxido de carbono é pequeno. As tabelas a seguir apresentam alguns casos de vazamento de CO<sub>2</sub> em que o vazamento ocorreu através de poços e falhas e/ou fraturas, tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente [68].

Tabela 3.1: Casos de vazamento industrial de CO<sub>2</sub> através de poço.

Acidente	Local	Consequências
Montanha Sheep	Estados Unidos	Não analisadas.
Bacia Florina <sup>(1)</sup>	Grécia	Óbito de uma pessoa.
Gêiseres Crystal e Tenmile	Estados Unidos	Não analisadas.
Torre Alfina	Itália	Não analisadas.

<sup>(1)</sup> Vazamento através do poço e também ao longo das discontinuidades da rocha.

Alguns dos casos listados nas tabelas 3.2 e 3.1 estão detalhados nas seções 3.1.1 a 3.1.5. Eles fornecem informações importantes sobre as possíveis formas de vazamento de CO<sub>2</sub> em reservatórios geológicos, assim como as consequências ambientais, à saúde humana e à segurança.

Tabela 3.2: Casos de vazamento natural de CO<sub>2</sub> através de falhas e/ou fraturas.

Acidente	Local	Consequências
Montanha Mammoth	Estados Unidos	Áreas com árvores mortas, uma pessoa com sintomas de asfixia e um óbito de uma pessoa.
Solfataras	Itália	Área sem vegetação.
Colinas Albanas	Itália	Altas concentrações de CO <sub>2</sub> em casas, mortes de gado (1999 eventos), óbito de pessoas.
Lago Clear	Estados Unidos	Óbito de quatro pessoas.
Caldeira Latera	Itália	Vegetação morta ou estressada (efeitos ou bloqueios sobre o metabolismo, crescimento e desenvolvimento da vegetação [69]).
Mátraderecske	Hungria	Altas concentrações de CO <sub>2</sub> em casas e óbito de várias pessoas.
Dieng	Indonésia	Óbito de aproximadamente 145 pessoas.
Rabaul	Papua-Nova Guiné	Pássaros mortos e óbito de três pessoas.
Lagos Monoun e Nyos <sup>(1)</sup>	Camarões	Danos à vegetação, mortes de animais (milhares de gado) e óbito de pessoas (aproximadamente 1800 pessoas).
Lago Laacher <sup>(1)</sup>	Alemanha	Não analisadas.
Bacia Paradox	Estados Unidos	Não analisadas.

<sup>(1)</sup> Vazamento natural, porém não ocorreu através de falhas e/ou fraturas.

### 3.1.1

#### Montanha Mammoth

Montanha Mammoth é um jovem vulcão na região sudoeste de Long Valley Caldera, uma grande depressão vulcânica no leste da Califórnia, Estados Unidos. Hoje, Long Valley é uma área recreativa, onde atividades como esqui, caminhadas e *camping* ocorrem. Geólogos detectaram emissões de CO<sub>2</sub>, provavelmente derivadas do magma abaixo do vulcão, figura 3.1 adaptada de Sorey *et al.* [70].

Entre os problemas detectados devido ao vazamento de CO<sub>2</sub> nessa região, destacam-se uma área de aproximadamente 70 hectares de árvores mortas [71], figura 3.2 do USGS [72], e a morte de um patrulheiro da equipe de resgate da montanha [73].

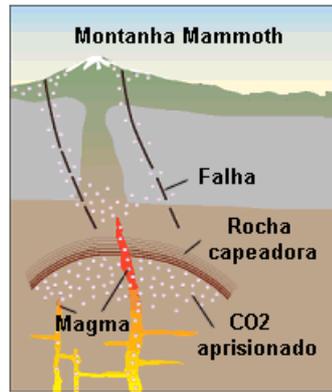


Figura 3.1: Esquema de vazamento de CO<sub>2</sub> da montanha Mammoth, adaptado de Sorey *et al.*



Figura 3.2: Foto da USGS, mostrando área de árvores mortas na região de Long Valley Caldera.

### 3.1.2 Colinas Albanas

As colinas Albanas encontram-se em complexo vulcânico inativo na Itália. O CO<sub>2</sub> emitido é de origem magmática. De acordo com Chiodini e Frondini [74], grande parte do gás é liberada a partir de reservatórios pressurizados, com a hipótese mais provável de que o vazamento ocorra ao longo de falhas geológicas.

A população que reside em regiões próximas convive com um risco constante, dado que ao longo do tempo vários escapes repentinos e de grande concentração de CO<sub>2</sub> foram registrados. A essas concentrações é associada a morte de pelo menos 10 pessoas na região central italiana de Lazio, entre os anos de 1980 e 2000 [75].

### 3.1.3 Lagos Monoun e Nyos

Os lagos Monoun e Nyos localizam-se no noroeste dos Camarões. Durante um longo tempo, o  $\text{CO}_2$  do lago Monoun, de origem vulcânica, acumulou-se dentro de uma cratera em águas profundas. Normalmente, o  $\text{CO}_2$  propagaria-se gradualmente para regiões de águas rasas, porém, em 1984, um deslizamento de terra subaquática na cratera levou a uma explosão de gás para a superfície, o que gerou uma nuvem com altas concentrações de  $\text{CO}_2$ , figura 3.3 adaptada de Sigurdsson *et al.* [76].

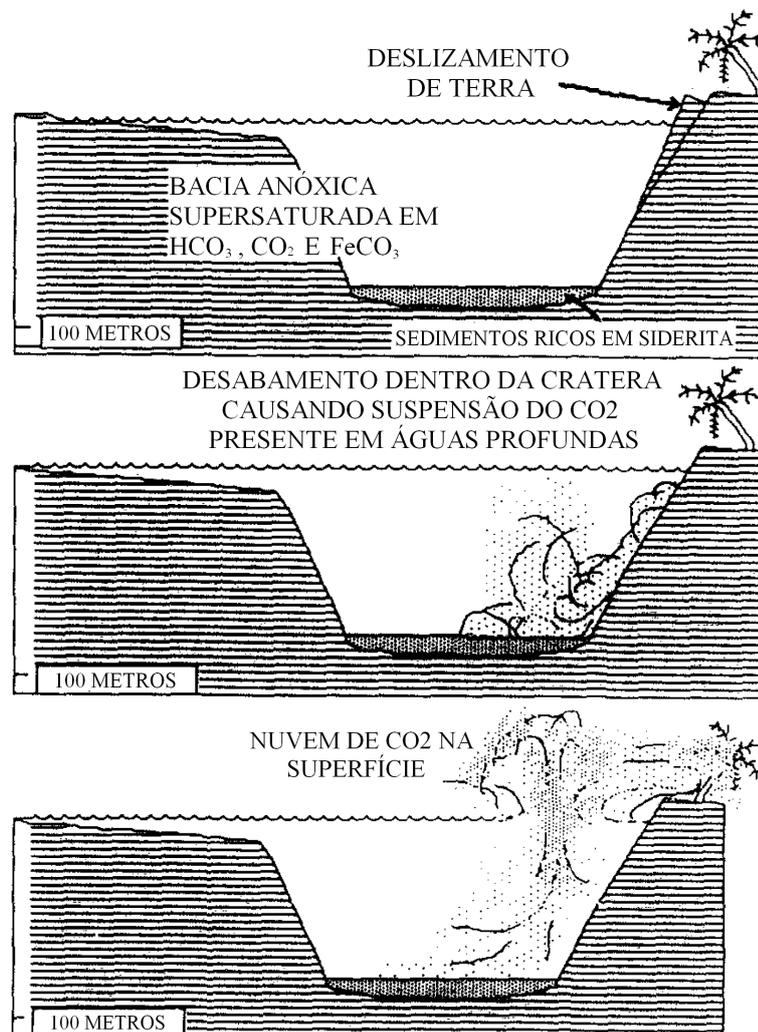


Figura 3.3: Esquema adaptado de Sigurdsson *et al.* apresentando a sequência de eventos que ocasionou o acidente natural no Lago Monoun.

Esse acidente natural ocasionou a morte de 37 pessoas que estavam em uma estrada próxima do lago. Além disso animais domésticos e silvestres também foram encontrados mortos na área [68].

Dois anos depois, um acidente similar ocorreu no lago Nyos, porém com consequências muito maiores. A nuvem de gás fluiu e ganhou velocidade para

baixo ao passar ao longo de dois vales estreitos, que também impediram a dispersão do CO<sub>2</sub>. Ao longo desse caminho, observaram-se danos à vegetação, animais e pessoas inconscientes, resultando mais de 3000 animais mortos e um total de 1746 pessoas mortas [68].

#### 3.1.4

##### **Montanha Sheep**

A montanha Sheep é um reservatório natural de CO<sub>2</sub>, no Colorado, Estados Unidos, que fornece CO<sub>2</sub> para a recuperação avançada de petróleo. Esse reservatório provê um laboratório natural para o estudo dos efeitos a longo prazo do armazenamento de CO<sub>2</sub> no subsolo, além de ser considerado um candidato adequado para o processo de sequestro de CO<sub>2</sub> [77].

Em 1982, o *blowout* de um poço durante a perfuração resultou em livre fluxo de CO<sub>2</sub> na cabeça do poço e vazamento de CO<sub>2</sub> através de fraturas diretamente acima do local de perfuração [78]. Foram necessários 17 dias para obter o controle do poço, a energia do fluido dispersou o gás, o que, provavelmente, não gerou relatos de acumulações perigosas de gás perto do solo [79].

A respeito das consequências à saúde e à segurança, Oldenburg [79] considera possível, porém não provável, que altas concentrações de CO<sub>2</sub> acumulassem em depressões topográficas e apresentassem um perigo por inalação, porém apenas em condições fechadas com pouco ou nenhum vento.

#### 3.1.5

##### **Bacia Florina**

A bacia de Florina é a principal fonte comercial de CO<sub>2</sub> na Grécia [80], o campo foi descoberto em 1960 e a produção começou em 1980 [81]. O CO<sub>2</sub> produzido é vendido para o mercado doméstico, principalmente para as indústrias de alimentos e criogenia (produção de baixas temperaturas).

Em 1990, foi feito na região um poço de exploração de água mineral. Após a fase de completção (conjunto de serviços destinados a equipar o poço para a produção ou injeção de fluidos no reservatório) e enquanto uma válvula da cabeça do poço estava sendo fechada, ocorreu o vazamento de CO<sub>2</sub>. O progresso do vazamento gerou uma cavidade de mais de 25 m<sup>2</sup> com uma profundidade de 50 m. A base de cimento usada para a sonda de perfuração desabou criando um pequeno lago. O acesso para as pessoas e animais foi restringido com a instalação de uma cerca [82].

Alguns anos depois, as autoridades locais revestiram o lago com cimento, criando uma piscina circular de aproximadamente 5 m de diâmetro. A po-

pulação passou a utilizar a piscina como uma técnica de cura, através de banhos de imersão dos pés. Tal prática manteve-se por alguns anos, até que um acidente fatal ocorreu. Um homem tentou nadar nas águas da piscina, porém morreu sufocado pelo CO<sub>2</sub> concentrado perto da superfície [82].

## 3.2

### Formas de monitoramento

Há uma série de opções disponíveis para monitorar o armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>. A maior parte dessas tecnologias são bem desenvolvidas de outras aplicações, como: indústria de petróleo e gás, armazenamento de gás natural, deposição de resíduos líquidos e perigosos em formações geológicas profundas, monitorização das águas subterrâneas e indústrias de conservação de alimentos e bebidas, etc [83] (Benson *at al.*[84] *apud* Wilson e Gerard [85]). Os métodos de monitoramento do armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> fornecidos por Wilson e Gerard [85] estão resumidos a seguir, divididos por parâmetros e subdivididos pelo enfoque dado ao monitoramento (traduzido pela autora).

1. Localização da pluma de CO<sub>2</sub>.
  - Levantamentos sísmicos de reflexão 2D e 3D.
  - Medições sísmicas entre o poço e a superfície e entre poços.
  - Métodos elétricos e eletromagnéticos.
  - Deformação da superfície do terreno usando imagens de satélite (InSAR - *Interferometric synthetic aperture radar*).
  - Gravidade.
  - Monitoramento da pressão do reservatório.
  - Amostragem do fluido na cabeça de poço e na formação.
  - Marcadores gasosos naturais e introduzidos.
  
2. Produção de alertas rápidos que um local de armazenamento pode estar falhando.
  - Levantamentos sísmicos de reflexão 2D e 3D.
  - Medições sísmicas entre o poço e a superfície e entre poços.
  - Deformação da superfície do terreno usando imagens de satélite (InSAR).
  - Monitoramento da pressão do reservatório e da injeção do poço.
  
3. Concentrações de CO<sub>2</sub> e fluxos na superfície do solo.
  - Amostragem e análise do ar utilizando cromatografia gasosa ou espectrometria de massa.
  - Torre micrometeorológica, figura 3.4 de Melo e Bressan [86].

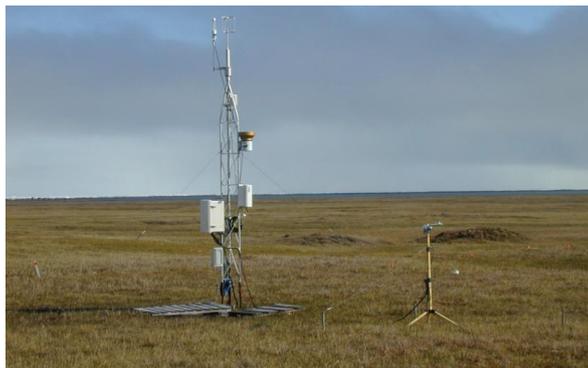
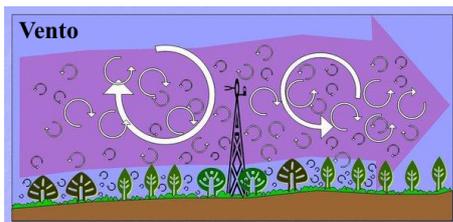


Figura 3.4: Ilustração e foto de Melo e Bressan de uma torre micrometeorológica (Torre de Eddy).

- Detectores de concentração de  $\text{CO}_2$ , figura 3.5 de Melo e Bressan [86].



Figura 3.5: Sensores para monitoramento de  $\text{CO}_2$ , fotos de Melo e Bressan.

- Câmara de acumulação de fluxo, figura 3.6 de Melo e Bressan [86].



Figura 3.6: Câmara de fluxo que quantifica fluxos de  $\text{CO}_2$  do solo em uma área pré-determinada, foto de Melo e Bressan.

- Monitoramento para marcadores naturais ou introduzidos.

#### 4. Condição de injeção do poço, taxas de fluxo, e pressões.

- Registros do furo do poço, incluindo registros de integridade do revestimento, ruídos e temperatura.

- Medidores da pressão da cabeça do poço e da formação.
- Medições de pressão do espaço anular do poço.
- Medidor de orifício ou outros medidores de fluxo diferencial.
- Concentrações de  $\text{CO}_2$  na superfície perto dos poços de injeção.

#### 5. Qualidade das águas subterrâneas.

- Amostragem de águas subterrâneas e análise geoquímica da água de beber ou monitoramento de poços, figura 3.7 de Melo e Bressan [86].

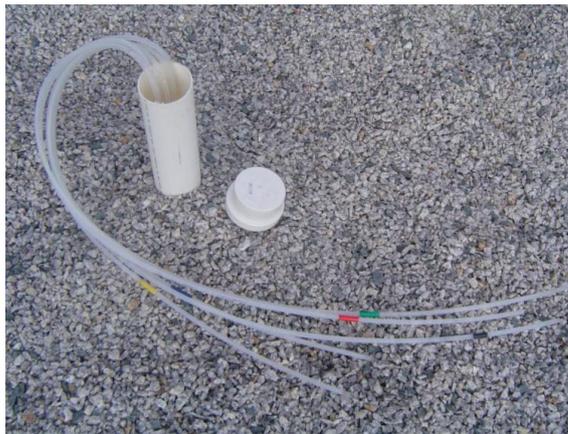


Figura 3.7: Amostragem da água subterrânea e do solo para análises químicas básicas, foto de Melo e Bressan.

- Marcadores gasosos naturais e introduzidos.

#### 6. Vazamento por falhas e fraturas.

- Levantamentos sísmicos de reflexão 2D e 3D.
- Medições sísmicas entre o poço e a superfície e entre poços.
- Métodos elétricos e eletromagnéticos.
- Deformação da superfície do terreno usando imagens de satélite (InSAR).
- Monitoramento da pressão do reservatório e do aquífero.
- Amostragem das águas subterrâneas e da zona vadosa.

#### 7. Solubilidade e aprisionamento mineral.

- Marcadores gasosos naturais e introduzidos.
- Amostragem de fluidos de formação usando amostras da cabeça do poço ou do fundo de poço.

#### 8. Concentrações de $\text{CO}_2$ na zona vadosa e do solo.

- Recolhimento de informações dos gases no solo e análise da composição do gás.

- Poços de amostragem na zona vadosa e análise da composição do gás, figura 3.8 de Melo e Bressan [86].



Figura 3.8: Amostragem de gases na zona vadosa/solo para análises de CO<sub>2</sub>, foto de Melo e Bressan.

#### 9. Efeitos sobre os ecossistemas.

- Monitoramento hiperespectral geobotânico do gás no solo, figura 3.9 de Pickles e Cover [87].

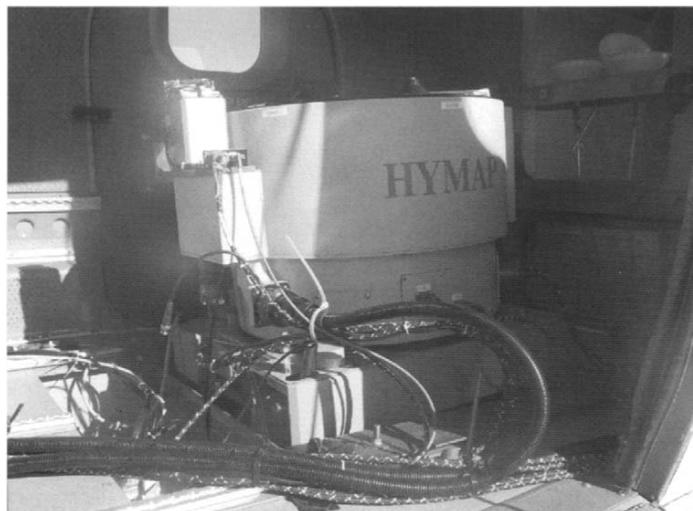


Figura 3.9: Sensor hiperespectral, foto de Pickles e Cover.

- Observação direta da biota.

#### 10. Microssismicidade.

- Monitoramento sísmico passivo utilizando sismógrafos.

### 3.3

#### Medidas de remediação

Medidas de remediação são aquelas a serem tomadas caso o vazamento de CO<sub>2</sub> ocorra devido ao seu armazenamento geológico. Sete tipos de vazamentos identificados por Solomon [88] são listados a seguir, junto com suas respectivas opções de remediação (traduzido pela autora).

1. Vazamentos através de falhas geológicas, fraturas e outros pontos de fuga.
  - Reduzir a pressão de injeção, injetando a uma taxa inferior ou através de mais poços.
  - Reduzir a pressão do reservatório através da remoção de água ou outros fluidos da estrutura de armazenamento.
  - Interceptar o vazamento com poços de extração na área do vazamento.
  - Criar uma barreira hidráulica, aumentando a pressão do reservatório antes do local do vazamento.
  - Reduzir a pressão do reservatório, criando uma via de acesso a novos compartimentos no reservatório de armazenamento.
  - Interromper a injeção para estabilizar o projeto.
  - Interromper a injeção, produzir o CO<sub>2</sub> do reservatório de armazenamento e reinjetá-lo para um reservatório de armazenamento mais adequado.
  
2. Vazamento através de poços ativos ou abandonados.
  - Reparação de poços de injeção com vazamento através de técnicas de recompletação padrão do poço, tais como a substituição da tubulação de injeção e *packers*.
  - Reparação de poços de injeção com vazamento através da injeção de cimento por trás do revestimento do poço.
  - Tampar e abandonar poços de injeção que não podem ser reparados pelos métodos listados anteriormente.
  - Parar o *blowout* de poços de injeção ou abandonados com técnicas padronizadas para “matar” um poço tal como a injeção de lama pesada dentro do revestimento do poço. Depois que o controle do poço é reestabelecido, as práticas de recompletação ou abandono descritos anteriormente podem ser usadas. Se a cabeça do poço não é acessível, um poço próximo pode ser perfurado para interceptar o revestimento abaixo da superfície do solo e “matar” o poço através de bombeamento de lama para baixo da intercepção do poço.

### 3. Acúmulo de CO<sub>2</sub> na zona vadosa e de gás no solo.

- Acumulações de CO<sub>2</sub> gasoso nas águas subterrâneas podem ser removidas ou, pelo menos, imobilizadas, por perfuração de poços que interceptam as acumulações e extraem o CO<sub>2</sub>. O CO<sub>2</sub> extraído pode ser ventilado para a atmosfera ou reinjetado de volta para um local de armazenagem apropriado.
- CO<sub>2</sub> residual preso em uma fase imóvel do gás, pode ser removido através da dissolução em água e extraído como uma fase dissolvida por meio de um poço de extração de águas subterrâneas.
- CO<sub>2</sub> que se tenha dissolvido na água subterrânea de pouca profundidade pode ser removido, se necessário, por bombeamento para a superfície e aeração para removê-lo. A água subterrânea pode então ser usada diretamente ou reinjetada de volta.
- Se metais ou outros contaminantes vestigiais foram mobilizados pela acidificação das águas subterrâneas, os métodos de “bombear e tratar” podem ser usados para removê-los. Alternativamente, barreiras hidráulicas podem ser criadas para imobilizar e conter os contaminantes através de poços de injeção e extração adequadamente colocados. Em adição a esses métodos de remediação ativos, podem também ser utilizados métodos passivos que dependem de processos bioquímicos naturais.

### 4. Vazamento na zona vadosa e acúmulo de gás no solo.

- O CO<sub>2</sub> pode ser extraído a partir da zona vadosa e do gás do solo por meio de técnicas padronizadas de extração de vapor de poços horizontais ou verticais.
- Fluxos da zona vadosa para a superfície do solo podem ser reduzidos ou interrompidos por tampões ou barreiras de vapor de gás. Bombeamento abaixo da tampa ou barreira de vapor pode ser usado para esgotar o acúmulo de CO<sub>2</sub> na zona vadosa.
- Dado que o CO<sub>2</sub> é um gás denso, ele pode ser recolhido em trincheiras subterrâneas. O gás acumulado pode ser bombeado das trincheiras e liberado para a atmosfera ou reinjetado de volta no subsolo.
- Técnicas de recuperação passivas que dependem apenas de difusão e “bombeamento barométrico” podem ser utilizadas para exaurir lentamente emissões pontuais de CO<sub>2</sub> na zona vadosa. Este método não será eficaz para o gerenciamento de emissões contínuas, porque é relativamente lento.

- A acidificação dos solos pelo contato com  $\text{CO}_2$  pode ser remediada por irrigação e drenagem. Alternativamente, suplementos agrícolas, tais como cal podem ser utilizados para neutralizar o solo.

5. Grandes lançamentos de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera.

- Para lançamentos no interior de um edifício ou em espaços confinados, grandes ventiladores podem ser utilizados para diluir rapidamente o  $\text{CO}_2$  para níveis de segurança.
- Para grandes emissões espalhadas por uma grande área, a diluição proveniente da mistura atmosférica natural (vento) será o único método prático para diluir o  $\text{CO}_2$ .
- Para vazamento contínuo em áreas estabelecidas, riscos de exposição a altas concentrações de  $\text{CO}_2$  em espaços confinados (por exemplo, porão ao redor de uma cabeça de poço) ou durante períodos de vento muito fraco, ventiladores podem ser usados para manter a taxa de circulação de ar alta o suficiente para garantir a diluição adequada.

6. Acumulação de  $\text{CO}_2$  em ambientes internos com vazamento crônico de baixo nível.

- Vazamentos lentos em estruturas podem ser eliminados pela utilização de técnicas que têm sido desenvolvidas para o controle da vazamento de radônio e compostos orgânicos voláteis em edifícios. Os dois métodos principais para vazamentos internos são ventilação ou pressurização da fundação. Ambos teriam o efeito de diluir o  $\text{CO}_2$  antes dele entrar no ambiente interno.

7. Acumulação nas águas de superfície.

- Corpos de água superficiais rasas que possuem significativo volume (lagos rasos) ou turbulência (fluxos) para lançar rapidamente o  $\text{CO}_2$  dissolvido de volta para a atmosfera.
- Para lagos estratificados profundos e estáveis, sistemas ativos para liberação de acúmulos de gás têm sido desenvolvidos e aplicados nos Lagos Nyos e Monoun nos Camarões.