NOTAS TÉCNICAS

REMOÇÃO DE CO_2

SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA

Cidades PELO Clima

Autoria Ana Filipa Grilo

IN+ Centro de Estudos em Inovação, Tecnologia e Políticas de Desenvolvimento // Cidades pelo Clima

Revisão Joana Portugal Pereira, Maria João Rodrigues

IN+ Centro de de Estudos em Inovação, Tecnologia e Políticas de Desenvolvimento // Cidades pelo Clima

Citação

(2025) Grilo, A.F., Portugal-Pereira, J., Rodrigues, M.J.. Remoção de Carbono: Soluções Baseadas na Natureza. Notas Técnicas. IN+ Centro de Estudos em Inovação, Tecnologia e Políticas de Desenvolvimento.

RESUMO DO DOCUMENTO

Este documento tem como objetivo **apresentar uma introdução abrangente às soluções baseadas na natureza (SbN)** no âmbito das estratégias municipais para a remoção de carbono**.**

O documento está organizado em quatro secções principais:

1. **O que são soluções baseadas na natureza?**

   Define-se o conceito de SbN, explicando a sua origem e evolução, e caracterizam-se os diferentes tipos de SbN.

2. **Quais os benefícios associados às SbN?**

   Apresentam-se os múltiplos benefícios das SbN, desde a regulação climática e gestão da água até à promoção da biodiversidade, saúde humana, coesão social e desenvolvimento económico sustentável, evidenciando o seu valor para territórios urbanos e rurais.

3. **Quais os elementos que influenciam o sequestro de carbono em SbN?**

   Exploram-se os elementos ecológicos e de gestão que determinam o potencial de sequestro de carbono das SbN.

4. **Quais as principais barreiras à implementação de estratégias de remoção de CO_2?**

   Identificam-se os principais obstáculos técnicos, financeiros, institucionais e sociais que dificultam a adoção e expansão das SbN para a remoção de carbono.

O QUE SÃO SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA?

As Soluções Baseadas na Natureza (SbN) são abordagens que utilizam os processos e elementos naturais para enfrentar desafios sociais de forma eficaz, sustentável e multifuncional. Segundo a Comissão Europeia [1], trata-se de soluções inspiradas e sustentadas pela natureza, que são custo-eficazes, fornecem simultaneamente benefícios ambientais, sociais e económicos e ajudam a reforçar a resiliência.

Este conceito foi posteriormente desenvolvido para abranger uma gama mais ampla de aplicações e benefícios, integrando o conhecimento das interações complexas entre seres humanos e natureza e respondendo a múltiplos desafios globais [2].

A definição atual de SbN da Assembleia das Nações Unidas para o Ambiente [3,4] descreve-as como "ações para proteger, conservar, restaurar, utilizar de forma sustentável e gerir ecossistemas terrestres, de água doce, costeiros e marinhos, naturais ou modificados, que respondem de forma eficaz e adaptativa a desafios sociais, económicos e ambientais, proporcionando simultaneamente bem-estar humano, serviços dos ecossistemas, resiliência e benefícios para a biodiversidade".

As SbN podem ser classificadas segundo o grau de intervenção nos ecossistemas, variando entre conservação, gestão sustentável e criação de novos ecossistemas.

A tipologia proposta por Eggermont e colegas [5], amplamente utilizada por instituições como a Comissão Europeia e a União Internacional para a Conservação da Natureza (da sigla inglesa IUCN), distingue três tipos principais de SbN:

Tipo	Definição	Exemplos
Tipo 1: Intervenção mínima ou	Visa a proteção ou conservação de ecossistemas naturais para manter ou melhorar a provisão de serviços de ecossistema. Depende	• Estabelecimento de áreas protegidas e zonas de conservação; • Manutenção de zonas húmidas naturais;

nula nos ecossistemas	fortemente de fatores biofísicos, institucionais e sociais, e enquadra-se frequentemente em estratégias de governação ambiental.	• Planeamento urbano que protege redes ecológicas e limita a expansão urbana; • Monitorização ambiental contínua.
Tipo 2: Gestão sustentável de ecossistemas e paisagens	Inclui práticas de gestão extensiva ou intensiva que promovem a multifuncionalidade dos ecossistemas e a sustentabilidade a longo prazo. Amplamente aplicável em contextos rurais e periurbanos, e pode ser articulado com medidas agroambientais.	• Gestão integrada de pragas e doenças; • Criação de habitats e estruturas para apoiar a biodiversidade; • Compostagem e reutilização de resíduos orgânicos; • Gestão sustentável de recursos hídricos; • Controlo da erosão e densidade de pastoreio; • Agricultura de conservação com uso racional de fertilizantes.
Tipo 3: Criação de novos ecossistemas ou estruturas verdes	Envolve intervenções intensivas com criação ou restauro de ecossistemas para maximizar benefícios ecológicos e sociais. Particularmente relevantes em meio urbano, pela sua capacidade de gerar múltiplos co-benefícios visíveis e mensuráveis.	• Criação ou restauro de zonas ribeirinhas, pântanos, sapais e estruturas dunares; • Criação ou restauro de infraestruturas verdes e azuis: parques, jardins, hortas comunitárias, corredores, telhados, paredes verdes, bacias de retenção; • Medidas de conservação do solo como revegetação de taludes ou uso de culturas de cobertura.

QUAIS SÃO OS BENEFÍCIOS ASSOCIADOS ÀS SBN?

As SbN destacam-se por abordarem, de forma integrada, desafios ambientais, sociais e económicos, contribuindo para transformar territórios urbanos e rurais, promovendo a sustentabilidade, a resiliência e o bem-estar humano. Entre os benefícios associados às SbN destacam-se:

Mitigação e adaptação às alterações climáticas

As SbN desempenham um papel duplo no combate às alterações climáticas, ao contribuírem simultaneamente para a mitigação e adaptação. Do ponto de vista da **mitigação**, as SbN ajudam a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e a remover CO_2 da atmosfera, através da captura e armazenamento de carbono na vegetação e no solo, mesmo que temporariamente. Intervenções como a plantação de árvores, a recuperação de zonas húmidas, a renaturalização de rios ou a instalação de coberturas verdes aumentam a capacidade de remoção de carbono. Além disso, algumas destas SbN podem melhorar a eficiência energética dos edifícios, ao reduzirem a necessidade de arrefecimento, especialmente em climas urbanos quentes [6]. No que respeita à **adaptação**, as SbN reforçam a resiliência dos territórios, ajudando-os a preparar-se e a responder aos impactos das alterações climáticas, como ondas de calor, inundações ou tempestades [7].

Gestão da água e conservação hídrica

Soluções como jardins de retenção de águas pluviais e valas de infiltração ajudam a controlar o escoamento, filtram poluentes, recarregam aquíferos e protegem habitats aquáticos, oferecendo alternativas mais sustentáveis e eficazes face às infraestruturas cinzentas tradicionais [8].

Biodiversidade e conectividade ecológica

A conservação e restauro de ecossistemas naturais promovem a biodiversidade e criam habitats conectados para a flora e fauna nativas através de corredores ecológicos, jardins biodiversos e reconversão de espaços abandonados em áreas verdes funcionais [9].

Promoção da saúde pública e bem-estar

As SbN permitem o contacto com a natureza, nomeadamente em meio urbano. Esta interação com a natureza está associada à melhoria da saúde mental e física das populações, havendo uma associação entre a exposição a espaços verdes e menores níveis de stress, redução da pressão arterial, melhoria da função cognitiva e maior atividade física. Ao reduzir a poluição, ruído e temperaturas extremas, incentivam estilos de vida ativos e mais saudáveis, especialmente em zonas densamente urbanizadas [10].

Transformação urbana sustentável e participativa

As SbN oferecem oportunidades para apoiar a transição para cidades mais sustentáveis, através de processos colaborativos de planeamento e gestão, envolvendo múltiplos atores. A criação de espaços de governação colaborativa e o estímulo à inovação social e institucional são componentes-chave para o sucesso destas soluções [11].

Justiça social, inclusão e coesão comunitária

Quando planeadas de forma inclusiva, as SbN promovem justiça ambiental e coesão social, assegurando acesso equitativo a espaços verdes. A presença de zonas verdes acessíveis em bairros vulneráveis pode reforçar o capital social e favorecer a integração das populações, fomentando um sentimento de pertença e segurança [12].

Economia verde e criação de emprego

As SbN estimulam setores como a engenharia ecológica, a horticultura urbana, a manutenção de infraestruturas verdes e o ecoturismo, gerando empregos e valor económico alinhado com uma transição para economias de baixo carbono, resilientes e inclusivas. Estas soluções promovem a criação de empregos verdes, incluindo funções relacionadas com o seu planeamento, instalação e manutenção, e impulsionam oportunidades no setor da educação ambiental, no turismo sustentável e no fornecimento de serviços e produtos ligados à natureza [13].

QUE FATORES INFLUENCIAM A REMOÇÃO DE CO_2 NAS SBN?

A capacidade das SbN para remover CO_2 da atmosfera depende de múltiplos elementos ecológicos e de gestão. As árvores, o solo e outros componentes dos ecossistemas terrestres funcionam simultaneamente como sumidouros e fontes de carbono, dependendo das suas características específicas e do modo como são geridos. O carbono pode ser armazenado na biomassa vegetal, na matéria orgânica do solo e em zonas húmidas, mas também pode ser libertado para a atmosfera através de processos naturais como a respiração, decomposição, incêndios ou outras perturbações ambientais. Para compreender o potencial de remoção de CO_2 nas SbN, é fundamental analisar separadamente os principais compartimentos do ecossistema onde ocorre o armazenamento e fluxo de carbono: a vegetação arbórea, a manta morta e o solo.

Vegetação arbórea

Nas árvores, o carbono é armazenado em diferentes compartimentos, com destaque para a **biomassa aérea viva** (tronco, ramos e folhas) que acumula carbono ao longo do crescimento da planta. Este processo ocorre por via da fotossíntese, que converte o CO_2 atmosférico em biomassa. O carbono permanece retido enquanto a árvore se mantém viva e em crescimento, sendo que a biomassa lenhosa (tronco e ramos) representa a maior fração desse armazenamento devido à sua elevada densidade e durabilidade. A **biomassa subterrânea** (raízes) também armazena carbono, embora em menor quantidade. Tem ainda um papel importante na transferência de carbono para o solo, através da exsudação de compostos orgânicos e da decomposição de raízes mortas. Por outro lado, o carbono armazenado pelas árvores pode ser libertado de duas formas principais: pela respiração celular das partes vivas da planta, que emite CO_2, e pela decomposição de tecidos mortos, como folhas caídas ou ramos partidos. Este

processo, conduzido por microrganismos decompositores, pode libertar CO_2 ou metano (CH_4), consoante as condições ambientais sejam aeróbias ou anaeróbias[1] [14].

Manta morta

Consiste em folhas, ramos e outros detritos orgânicos acumulados à superfície do solo. Estes materiais representam carbono temporariamente armazenado. A sua decomposição, influenciada por fatores como temperatura, humidade e presença de microrganismos, resulta na libertação gradual de carbono para a atmosfera ou na incorporação de matéria orgânica ao solo [15].

Solo

O solo constitui um dos maiores reservatórios de carbono terrestre, armazenando-o sob a forma de matéria orgânica estável, designada por carbono orgânico do solo. Este carbono resulta da decomposição da manta morta, das raízes mortas e das exsudações das raízes vivas. A capacidade de armazenamento de carbono no solo é fortemente influenciada por fatores como a textura do solo, o teor de argila, as práticas de gestão adotadas (por exemplo, a ausência de revolvimento) e a presença de cobertura vegetal permanente. Por outro lado, o solo também pode funcionar como fonte de carbono, através da libertação de CO_2 proveniente da respiração microbiana associada à mineralização da matéria orgânica. Esta libertação tende a ser mais acentuada em solos expostos, degradados ou sujeitos a aquecimento. Além disso, alterações nas condições hidrológicas ou perturbações como incêndios, compactação ou processos de urbanização podem acelerar significativamente as perdas de carbono do solo para a atmosfera [16].

[1] Condições aeróbias referem-se a ambientes onde existe presença de oxigénio, permitindo que os microrganismos decompositores utilizem o oxigénio para degradar a matéria orgânica, libertando principalmente CO_2. Já condições anaeróbias ocorrem na ausência de oxigénio, levando à atuação de outros tipos de microrganismos que produzem, entre outros gases, metano (CH_4).

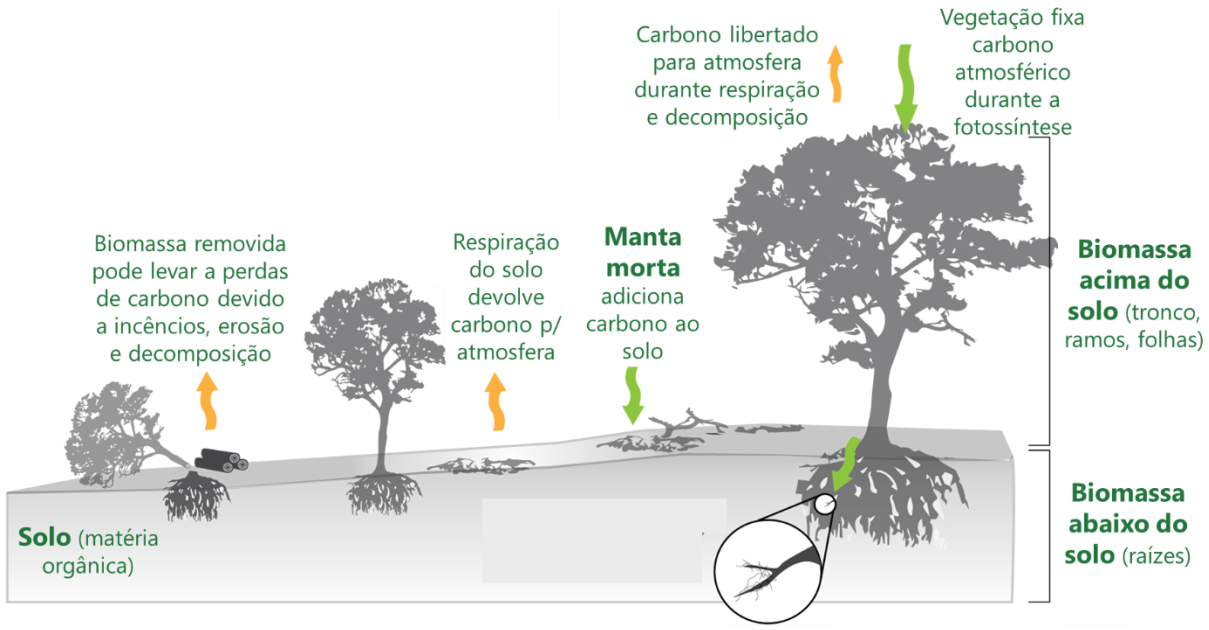

Figura 1. Armazenamento e libertação de carbono na vegetação arbórea (biomassa acima e abaixo do solo), manta morta e solo. Figura adaptada de [17].

As SbN com elevada capacidade de remoção de CO_2 partilham um conjunto de características associadas à estrutura e diversidade da vegetação, à sua distribuição espacial, composição funcional e quantidade de biomassa. Abaixo, sistematizam-se as principais dimensões que influenciam a remoção de CO_2 em contextos urbanos. Compreender estes fatores é essencial para maximizar o potencial de mitigação das SbN e orientar estratégias de planeamento e gestão mais eficazes.

1. Vegetação

A vegetação desempenha um papel crucial na remoção de CO_2 da atmosfera através de diversos mecanismos [14,18,19]:

1.1. Abundância, tipo e estrutura: A densidade arbórea influencia diretamente a remoção de CO_2 ao impactar a biomassa acumulada; contudo, densidades excessivas podem gerar competição por recursos e limitar o crescimento individual, reduzindo o potencial de armazenamento. A diversidade da vegetação também é relevante, pois ecossistemas com mais espécies tendem a ser mais produtivos devido ao uso complementar de recursos, enquanto uma maior cobertura de copa está associada a mais biomassa aérea e maior armazenamento de carbono. A estratificação vertical da vegetação, abrangendo camadas herbáceas, arbustivas e arbóreas, contribui adicionalmente para a acumulação de carbono na biomassa aérea, na manta morta e no solo. Em relação à idade e estágio de crescimento, florestas maduras, com árvores antigas, acumulam significativamente mais biomassa ao longo do tempo, atuando como grandes reservatórios, ao passo que em fases iniciais da sucessão ecológica, espécies pioneiras sequestram carbono rapidamente devido ao seu crescimento acelerado. Quanto ao tipo de ecossistema, florestas temperadas, tropicais e boreais são grandes sumidouros de carbono devido à elevada biomassa aérea e subterrânea; zonas húmidas e turfeiras, com solos encharcados e decomposição lenta, também armazenam grandes quantidades de carbono, e pradarias e pastagens, embora com menor biomassa aérea, destacam-se no sequestro de carbono no solo graças às suas raízes profundas.

1.2. Distribuição espacial e conectividade: A distribuição e a conectividade dos espaços verdes influenciam significativamente o sequestro de carbono nas cidades, promovendo a continuidade ecológica e aumentando a resiliência dos ecossistemas urbanos.

1.3. Biomassa: A biomassa aérea (folhas, caules, ramos), é uma importante reserva de carbono, especialmente em árvores com copas amplas e crescimento lento. Já a biomassa subterrânea (raízes), é essencial na estabilização do carbono a longo prazo, contribuindo também para a formação e manutenção da matéria orgânica no solo.

1.4. Características funcionais: As características funcionais das espécies vegetais desempenham um papel crucial na sua capacidade de sequestro e armazenamento de carbono. Árvores com maior densidade de madeira são mais eficientes, pois armazenam mais carbono por volume e são menos suscetíveis à decomposição. Espécies com baixa área foliar específica possuem folhas mais duradouras, o que reduz os custos de substituição e aumenta a eficiência fotossintética e, consequentemente, o sequestro de carbono. Um maior teor de azoto foliar também está associado a uma maior capacidade fotossintética e fixação de carbono, embora possa resultar em uma rotatividade foliar mais elevada. A estatura das árvores (altura e diâmetro à altura do peito) é diretamente proporcional à acumulação de biomassa e, portanto, de carbono. Embora espécies com taxa de crescimento rápida fixem carbono rapidamente, estas tendem a ter uma vida mais curta; em contraste, espécies de vida longa garantem um armazenamento de carbono mais duradouro, sendo que um tempo de vida máximo longo para a espécie reduz a necessidade de substituição. Um rácio raiz/parte aérea elevado favorece a acumulação de carbono no solo, enquanto períodos fenológicos mais longos permitem uma maior captação anual de carbono. Traços hidráulicos, como a condutividade do xilema, influenciam o crescimento e a fotossíntese, desde que haja um equilíbrio com a resistência à seca. A massa e os traços reprodutivos das sementes afetam a regeneração das espécies, contribuindo para a estabilidade do sequestro de carbono a longo prazo. O tipo de ciclo fotossintético também é um fator determinante, uma vez que, espécies C3, típicas de climas temperados e húmidos, tendem a sequestrar mais carbono por unidade de biomassa do que espécies C4 ou CAM, mais comuns em ambientes tropicais e áridos[2].

[2] As plantas podem ser classificadas em três tipos de ciclo fotossintético: **C3, C4 e CAM**, cada um com implicações distintas no sequestro de carbono e na adaptação ao clima: i. **Espécies C3** (como muitas árvores e culturas como o trigo) são as mais comuns em climas temperados e húmidos. Tendem a ter uma maior taxa de sequestro de carbono por unidade de biomassa, mas são menos eficientes sob altas temperaturas e baixa disponibilidade de água; ii. **Espécies C4** (como o milho e cana-de-açúcar), são mais adaptadas a ambientes quentes e secos, apresentando maior eficiência no uso da água e do azoto. Embora fixem carbono de forma mais eficiente sob stress térmico, armazenam geralmente menos carbono por unidade de biomassa; iii. **Espécies CAM** (como cactos e algumas suculentas) estão adaptadas a

2. Solo

A capacidade do solo para remover CO_2 da atmosfera está diretamente relacionada com características como [16]:

2.1. Matéria orgânica e profundidade: A matéria orgânica é a principal reserva de carbono nos solos. Solos com maior teor de matéria orgânica armazenam mais carbono e emitem menos CO_2. A maior parte do carbono está concentrada nas camadas superficiais, embora camadas mais profundas também possam contribuir significativamente, especialmente em sistemas com raízes profundas.

2.2. Textura, estrutura, agregação e mineralogia: Solos com textura fina, ricos em argila e silte, formam agregados estáveis que protegem o carbono da decomposição, dificultando o acesso de microrganismos. Minerais como argilas e óxidos contribuem ainda mais para essa estabilização ao promoverem a adsorção da matéria orgânica.

2.3. Humidade, temperatura e pH: Solos bem drenados e com humidade adequada favorecem o sequestro de carbono. Temperaturas elevadas aceleram a decomposição da matéria orgânica, enquanto solos frios acumulam mais carbono devido à decomposição lenta. O pH regula a atividade microbiana: solos neutros a ligeiramente ácidos equilibram decomposição e acumulação, enquanto valores extremos podem inibir a atividade microbiana.

---

ambientes áridos. Fixam carbono à noite para reduzir perdas de água, o que torna o processo mais lento, mas eficaz em condições extremas.

2.4. Atividade microbiana: O equilíbrio entre a respiração microbiana e a estabilização da matéria orgânica é crucial para o armazenamento de carbono. A microbiota do solo desempenha um papel direto na taxa de decomposição da matéria orgânica.

2.5. Erosão e deposição: A erosão pode diminuir o carbono do solo, mas a deposição de sedimentos pode contribuir para o sequestro ao enterrar matéria orgânica e protegê-la da decomposição.

3. Água

A água também desempenha um importante na remoção de CO_2 da atmosfera, estando esta capacidade relacionada com [20]:

3.1. Profundidade, temperatura e oxigénio: Em massas de água profundas, o carbono é sequestrado sobretudo pela acumulação de sedimentos orgânicos no fundo. Este processo é favorecido por condições anóxicas (baixa concentração de oxigénio), que reduzem a decomposição da matéria orgânica. A estratificação térmica contribui para esse efeito, criando camadas profundas mais frias e pobres em oxigénio. A temperatura influencia fortemente as taxas metabólicas, dado que águas mais quentes aceleram a decomposição e reduzem o armazenamento de carbono, enquanto águas frias preservam melhor a matéria orgânica.

3.2. Composição química e salinidade: O pH regula a dinâmica do carbono, dado que águas ácidas aumentam a solubilidade do carbono inorgânico, enquanto águas alcalinas favorecem a precipitação de carbonatos e o armazenamento nos sedimentos. A salinidade elevada, típica de zonas costeiras e pântanos salgados, estimula a formação de carbonato de cálcio e pode inibir a atividade microbiana, promovendo a preservação da matéria orgânica.

3.3. Carbono inorgânico dissolvido e nutrientes: O carbono inorgânico dissolvido pode precipitar como carbonatos sólidos, especialmente em ambientes marinhos e lagos alcalinos, contribuindo para o armazenamento geológico. A presença de nutrientes como azoto e fósforo aumenta a produtividade primária e a biomassa, reforçando a disponibilidade de carbono para deposição.

3.4. Hidrologia e dinâmica da água: Em águas estagnadas ou de fluxo lento, o carbono orgânico tende a acumular-se nos sedimentos, favorecendo o sequestro local. Já em águas de fluxo rápido, o transporte contínuo reduz o armazenamento. Inundações frequentes e lençóis freáticos elevados criam condições anaeróbias no solo e nos sedimentos, o que diminui a decomposição e aumenta a retenção de carbono.

3.5. Vegetação aquática: A vegetação submersa capta carbono atmosférico por fotossíntese e, após a sua morte, a matéria orgânica pode ser depositada nos sedimentos, contribuindo para o sequestro de carbono a longo prazo.

4. Outras características

Existem ainda outras características importantes na remoção de CO_2 da atmosfera, tais como [14]:

4.1. Práticas de gestão: As práticas de gestão são cruciais para otimizar o sequestro de carbono em diversos ecossistemas. A silvicultura urbana e a conservação de espaços verdes existentes aumentam a biomassa e o armazenamento de carbono nas cidades, ajudando a compensar as emissões associadas à urbanização. A gestão eficiente dos recursos hídricos, particularmente através de sistemas de irrigação adequados, pode potenciar a remoção de carbono. Quanto aos ciclos de manutenção, podas adequadas podem estimular o crescimento e a remoção de carbono, mas a decomposição inadequada dos resíduos pode, paradoxalmente, libertar esse carbono de

volta para a atmosfera. A gestão do solo também é determinante, uma vez que o uso de fertilizantes pode acelerar o crescimento e a remoção de carbono, embora possa gerar emissões de outros gases. A compactação do solo, se mal gerida, reduz a infiltração de água e compromete a sua saúde, limitando o potencial de remoção de carbono. Em contrapartida, a adição de biocarvão pode melhorar significativamente a capacidade de remoção de carbono no solo.

4.2. Contexto: O macroclima influencia fortemente a dinâmica do sequestro de carbono. Em climas mediterrânicos, o crescimento vegetal tende a ser mais lento, o que pode limitar a remoção de carbono. A proximidade à costa pode favorecer taxas de crescimento mais elevadas devido à maior humidade atmosférica. Por outro lado, ambientes urbanos, sujeitos a diversos fatores de stress ambiental, apresentam geralmente taxas mais baixas de sequestro de carbono, com uma tendência para diminuição à medida que as plantas atingem a fase adulta.

4.3. Regimes de distúrbio: Distúrbios ambientais, como tempestades, incêndios ou intervenções humanas, podem reduzir o armazenamento de carbono ao causar perda de biomassa. No entanto, dependendo da sua intensidade e frequência, estes eventos também podem estimular o crescimento de nova vegetação, contribuindo para a renovação dos sistemas e a retoma do sequestro de carbono.

EQUIPAMENTO E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REMOÇÃO DE CO_2 POR SBN

Para quantificar com precisão a remoção de CO_2 por SbN, é essencial combinar diferentes abordagens e tecnologias. Estas incluem medições de campo diretas, análises laboratoriais detalhadas e o uso de deteção remota para uma visão mais ampla.

Equipamento de campo

- Fita de diâmetro ou paquímetro: Para medição do Diâmetro à Altura do Peito (DAP), crucial na estimativa de biomassa e carbono arbóreo.
- Clinómetro ou telémetro laser: Utilizado para aferir a altura das árvores, um parâmetro essencial para o cálculo da biomassa.
- Trado ou extrator de solo: Para recolha de amostras de solo, permitindo a análise do carbono orgânico do solo.
- Analisador portátil de CO_2: Mede os fluxos de CO_2 na vegetação e no solo, auxiliando na estimativa da fotossíntese e respiração.
- Medidores de Índice de Área Foliar (LAI): Avaliam a área foliar por unidade de solo, correlacionando-se com o potencial de sequestro de carbono.
- Trado de incremento: Extrai amostras do tronco para determinar a idade e a taxa de crescimento das árvores, dados fundamentais para cálculos de carbono.

Tecnologia de deteção remota

- LiDAR (Light Detection and Ranging): Fornece dados tridimensionais da estrutura da vegetação (altura e densidade da canópia arbórea), essencial para estimar biomassa e carbono em larga escala.
- Imagens de satélite (Landsat, MODIS, Sentinel): Permitem a monitorização da cobertura e saúde da vegetação ao longo do tempo, sendo úteis para modelar o sequestro de carbono.
- Drones: Equipados com câmaras ou sensores multiespectrais, recolhem dados de alta resolução sobre a estrutura e o estado da vegetação a uma escala local.

Equipamento de laboratório

- Espectrómetros de massa ou analisadores elementares: Analisam o conteúdo de carbono em amostras de solo e plantas, determinando o seu contributo para o armazenamento total.
- Torres de fluxo de carbono: Instaladas em ecossistemas, medem em tempo real as trocas de CO_2 entre a atmosfera e o ecossistema.

***Software* e ferramentas de modelação**

- Modelos alométricos: Utilizam dados de campo (DAP, altura) para estimar a biomassa e o carbono presente na vegetação.
- Sistemas de informação geográfica (SIG): Permitem a análise espacial da vegetação e do potencial de sequestro, integrando dados de campo e de satélite.
- Ferramentas de contabilidade de carbono: Modelam o armazenamento e o sequestro de carbono com base em diferentes cenários e usos do solo (por exemplo, CBM-CFS3, InVEST).

Equações de biomassa e carbono

- Fórmulas empíricas que relacionam atributos físicos da vegetação (diâmetro, altura, espécie) com a biomassa e o teor de carbono, adaptadas a tipos de vegetação e contextos regionais específicos.

DESTAQUE: Contributo das SbN para a remoção de CO_2 em contextos urbanos

A quantificação da remoção de CO_2 por SbN é um pilar essencial para a gestão climática em ambientes urbanos. Compreender o contributo das SbN no contexto das cidades permite não só valorizar o seu papel ecológico, mas também informar estratégias eficazes de mitigação das alterações climáticas, especialmente considerando que diferentes tipos de SbN apresentam capacidades distintas de sequestro de carbono.

Estudos internacionais demonstram o papel relevante dos **parques urbanos** na remoção de CO_2, com taxas médias globais de 12,8 tCO_2/ha/ano [21] e picos notáveis como 88,1 tCO_2/ha/ano em Cuenca, Equador [22] e 85,1 tCO_2/ha/ano na Coreia [23]. No vale do Yangtzé, China, parques urbanos podem compensar até 1,08 tCO_2/ha/dia durante o verão [24]. Em regiões mediterrânicas, a remoção tende a ser mais modesta, variando entre 1,8 e 3,7 tCO_2/ha/ano em Itália [25], e 0,92 tCO_2/ha/ano em Sacramento, Califórnia [26]. Contudo, em Florença (Itália), os espaços verdes urbanos compensam 6,2% das emissões da cidade, com taxas de sequestro entre 4,6 e 12,6 tCO_2/ha/ano, dependendo do tipo e localização da vegetação [27].

As **árvores de arruamento** também podem contribuir significativamente para a remoção de CO_2. Estudos em Itália mostram que ruas arborizadas podem sequestrar até 9,2 tCO_2/ha/ano, avenidas largas com árvores (boulevards) 8.4, ciclovias arborizadas 5.6 e praças arborizadas 6,1 tCO_2/ha/ano [28].

O potencial de remoção de **telhados e paredes verdes** é altamente variável, oscilando entre 0,5 e 23,8 tCO_2/ha/ano, em função do tipo de vegetação, clima e sistema de gestão [29,30]. Sistemas intensivos ou com espécies como *Sedum* e musgo, registaram os valores mais elevados [31]. Adicionalmente, as poupanças energéticas resultantes da regulação térmica dos edifícios por estas estruturas podem representar até 43 tCO_2/ha/ano [32]. No entanto, observam-se flutuações significativas, como em Berlim, onde as taxas variaram entre -5,2 e 3,1 tCO_2/ha/ano, refletindo a sensibilidade às condições meteorológicas [33,34].

Por fim, as **hortas urbanas**, embora apresentem taxas de remoção mais modestas, cerca de 0,80 tCO_2e/ha/ano, oferecem co-benefícios relevantes, como produção local e a promoção da educação ambiental, reforçando o seu papel na transição ecológica das cidades [35].

QUAIS AS PRINCIPAIS BARREIRAS À IMPLEMENTAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE REMOÇÃO DE CO_2?

As SbN, como a vegetação urbana e a gestão dos solos, têm ganho destaque como estratégias eficazes para a remoção de carbono em contextos urbanos, oferecendo simultaneamente benefícios adicionais para a biodiversidade, o bem-estar humano e a adaptação às alterações climáticas. No entanto, a sua implementação enfrenta diversas barreiras, desde limitações técnicas e espaciais, até desafios sociais, económicos e de governança.

Nesta secção, analisamos essas barreiras no contexto das SbN, comparando-as com os obstáculos associados a outras estratégias de remoção de carbono tecnológicas, como o uso de materiais de construção de base biológica, o biocarvão, estratégias integradas no ambiente construído e a captura direta de carbono (DAC). Esta comparação permite identificar sinergias e limitações específicas de cada abordagem, contribuindo para decisões mais informadas sobre a sua viabilidade e complementaridade nos esforços de neutralidade carbónica urbana.

Tabela 1. Barreiras identificadas à implementação das quatro opções de captura e armazenamento de carbono (vegetação, solo, ambiente construído, ambientes interiores). A coluna referente aos "efeitos adversos" refere-se a potenciais impactos negativos que podem enfraquecer os co-benefícios de mitigação e adaptação associados a cada opção de remoção de carbono em contexto urbano. Tabela adaptada de [6].

Estratégia	Incertezas	Efeitos adversos	Barreiras económicas	Governança
Vegetação	Impacto das alterações climáticas no potencial de armazenamento a longo prazo Variação da remoção de CO_2 consoante o bioma e tipo de vegetação Medição precisa do CO_2 removido	Emissões associadas à manutenção e rega Aumento do consumo de água Elevado potencial alergénico Redução da circulação de ar	Grande variabilidade de custos consoante a estratégia adotada Cidades densas com pouco espaço disponível podem não priorizar espaços verdes	Potencial limitado em bairros de elevada densidade Falta de protocolos para contabilização de emissões de gases de efeito de estufa

		Diminuição do albedo		Inclusão dos atores no desenho de áreas verdes multifuncionais Gentrificação verde
Solo	Variabilidade do teor de carbono no biocarvão conforme biomassa Estabilidade do biocarvão em diferentes solos urbanos Efeitos de longo prazo do biocarvão em condições reais de solo	Risco de contaminação de águas superficiais e subterrâneas Uso direto e indireto do solo na produção de biocarvão Emissões ao longo do ciclo de vida	Custos variáveis conforme biomassa e transporte Necessidade de estabilizar preço do biocarvão Ausência de incentivos para implementação	Conhecimento e esforço exigido na instalação e manutenção de solos com biocarvão Falta de conhecimento sobre benefícios e aplicações Implementação com múltiplos objetivos Apoio político reduzido
Ambiente construído	Divergências metodológicas na contabilização e emissões do ciclo de vida Parâmetros de simulação como número de novas habitações e área per capita Falta de testes a larga escala e longo prazo	Impactos negativos na biodiversidade Competição pelo uso de solo e madeira para diferentes finalidades Maior utilização de produtos adesivos	Ativos obsoletos da construção mineral convencional Benefícios económicos específicos consoante localização Falta de incentivos para escalar materiais alternativos de base biológica	Garantir práticas sustentáveis de gestão florestal Requalificação da força de trabalho
Ambientes interiores	Baixa maturidade tecnológica Testes da tecnologia DAC em diferentes locais e climas Disponibilidade de energia verde Impacto da adaptação de DAC no espaço e desempenho de torres de arrefecimento	Aumento do consumo energético Outros impactos na qualidade do ar Desafios no aprovisionamento e fabrico em larga escala de sorventes	Custos e transporte de armazenamento de CO_2 capturado Maior consumo energético para liquefação/transporte de CO_2 Necessidade de sorventes acessíveis e duradouros Receitas associadas à utilização do CO_2 capturado	Mecanismos de mercado de CO_2 inexistentes/pouco desenvolvidos Localização estratégica de centrais DAC para aproveitar recursos partilhados e transporte Metodologia de contabilização para tecnologias DAC

BIBLIOTECA

Bibliografia citada

[1] European Commission DG-Research. (2015). *The EU and nature-based solutions.*

[2] IUCN, I. (2020). Global standard for nature-based solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS. *Gland, Switzerland*.

[3] UNEP. (2022). *Kunming-Montreal Global biodiversity framework*. Annex Section A, in CBD/COP/15/L.25, D.d.s.b.t. President, Editor.

[4] UNEA. (2022). *Resolution 5/5 on Nature-based solutions for supporting sustainable development.* UNEP/EA.5/Res.5.

[5] Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., Fady, B., Grube, M., Keune, H., Lamarque, P., Reuter, K., Smith, M., van Ham, C., Weisser, W. W., & Le Roux, X. (2015). Nature-based solutions: new influence for environmental management and research in Europe. *GAIA-Ecological perspectives for science and society*, *24*(4), 243-248.

[6] Rodriguez Mendez, Q., Fuss, S., Lück, S., & Creutzig, F. (2024). Assessing global urban CO2 removal. *Nature Cities*, *1*(6), 413-423.

[7] Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. (2017). *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas: Linkages between science, policy and practice*. Springer Nature.

[8] Oral, H. V., Carvalho, P., Gajewska, M., Ursino, N., Masi, F., Hullebusch, E. D. V., Kazak, J. K., Exposito, A., Cipolletta, G., Andersen, T. R., Finger, D. C., Simperler, L., Regelsberger, M., Rous, V., Radinja, M., Buttiglieri, G., Krzeminski, P., Rizzo, A., Dehghanian, K., Nikolova, M., & Zimmermann, M. (2020). A review of nature-based solutions for urban water management in European circular cities: a critical assessment based on case studies and literature. *Blue-Green Systems*, *2*(1), 112-136.

[9] Xie, L., & Bulkeley, H. (2020). Nature-based solutions for urban biodiversity governance. *Environmental Science & Policy*, *110*, 77-87.

[10] Vujcic, M., Tomicevic-Dubljevic, J., Grbic, M., Lecic-Tosevski, D., Vukovic, O., & Toskovic, O. (2017). Nature based solution for improving mental health and well-being in urban areas. *Environmental research*, *158*, 385-392.

[11] Kiss, B., Sekulova, F., Hörschelmann, K., Salk, C. F., Takahashi, W., & Wamsler, C. (2022). Citizen participation in the governance of nature-based solutions. *Environmental Policy and Governance*, *32*(3), 247-272.

[12] Sekulova, F., Anguelovski, I., Kiss, B., Kotsila, P., Baró, F., Palgan, Y. V., & Connolly, J. (2021). The governance of nature-based solutions in the city at the intersection of justice and equity. *Cities*, *112*, 103136.

[13] Pearlmutter, D., Theochari, D., Nehls, T., Pinho, P., Piro, P., Korolova, A., Papaefthimiou, S., Mateo, M.C.G., Calheiros, C., Zluwa, I., Pitha, U., Schosseler, P., Florentin, Y., Ouannou, S., Gal, E., Aicher, A., Arnold, K., Igondová, E., & Pucher, B. (2020). Enhancing the circular economy with nature-based solutions in the built urban environment: Green building materials, systems and sites. Blue-Green Systems, 2(1), 46-72.

[14] Pan, H., Page, J., Shi, R., Cong, C., Cai, Z., Barthel, S., Thollander, P., Colding, J., & Kalantari, Z. (2023). Contribution of prioritized urban nature-based solutions allocation to carbon neutrality. *Nature Climate Change*, *13*(8), 862-870.

[15] Yan, J., Wang, L., Hu, Y., Tsang, Y. F., Zhang, Y., Wu, J., Fu, X., & Sun, Y. (2018). Plant litter composition selects different soil microbial structures and in turn drives different litter decomposition pattern and soil carbon sequestration capability. *Geoderma*, *319*, 194-203.

[16] Sykes, A. J., Macleod, M., Eory, V., Rees, R. M., Payen, F., Myrgiotis, V., Williams, M., Sohi, S., Hillier, J., Moran, D., Manning, D. A. C., Goglio, P., Seghetta, M., Williams, A., Harris, J., Dondini, M., Walton, J., House, J., & Smith, P. (2020). Characterising the biophysical, economic and social impacts of soil carbon sequestration as a greenhouse gas removal technology. *Global Change Biology*, *26*(3), 1085-1108.

[17] Board of Water and Soil Resources, (2025). https://bwsr.state.mn.us/carbon-sequestration-forests.

[18] Zhang, X., Huang, H., Tu, K., Li, R., Zhang, X., Wang, P., Li, Y., Yang, Q., Acerman, A. C., Guo, N., & Liu, Y. (2024). Effects of plant community structural characteristics on carbon sequestration in urban green spaces. *Scientific Reports*, *14*(1), 7382.

[19] Othman, R., Suid, S., Mohd Noor, N. F., Baharuddin, Z. M., Hashim, K. S. H. Y., & Lukman Hakim Mahamod, L. H. (2019). The influence of urban park green spaces, plant material specifications and spatial design organization and pattern towards carbon sequestration rate. *Appl. Ecol. Environ. Res*, *17*(4), 8079-8088.

[20] Kayranli, B., Scholz, M., Mustafa, A., & Hedmark, Å. (2010). Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review. *Wetlands*, *30*, 111-124.

[21] Jo, H. K., Kim, J. Y., & Park, H. M. (2019). Carbon reduction and planning strategies for urban parks in Seoul. *Urban Forestry & Urban Greening*, *41*, 48-54.

[22] Muñoz, M. E., Vásquez, E., & Portilla, F. (2021). Estimates of the carbon capture potential in urban parks and vehicle CO2 emissions in Cuenca, Ecuador. In *Communication, Smart Technologies and Innovation for Society: Proceedings of CITIS 2021* (pp. 405-417). Singapore: Springer Singapore.

[23] Park, H. M., & Jo, H. K. (2021). Ecological design and construction strategies through life cycle assessment of carbon budget for urban parks in Korea. *Forests*, *12*(10), 1399.

[24] Chen, M., Jia, W., Du, C., Shi, M., Henebry, G. M., & Wang, K. (2023). Carbon saving potential of urban parks due to heat mitigation in Yangtze River Economic Belt. *Journal of Cleaner Production*, *385*, 135713.

[25] Fares, S., Conte, A., Alivernini, A., Chianucci, F., Grotti, M., Zappitelli, I., Petrella, F., & Corona, P. (2020). Testing removal of carbon dioxide, ozone, and atmospheric particles by urban parks in Italy. *Environmental Science & Technology*, *54*(23), 14910-14922.

[26] McPherson, E. G. (1998). Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture. 24 (4): 215-223.*, *24*(4), 215-223.

[27] Vaccari, F. P., Gioli, B., Toscano, P., & Perrone, C. (2013). Carbon dioxide balance assessment of the city of Florence (Italy), and implications for urban planning. *Landscape and Urban Planning*, *120*, 138-146.

[28] Russo, A., J Escobedo, F., & Zerbe, S. (2016). Quantifying the local-scale ecosystem services provided by urban treed streetscapes in Bolzano, Italy. *AIMS Environmental Science*, *3*(1), 58-76.

[29] Seo, Y. B., Dinh, T. V., Kim, S., Baek, D. H., Jung, K., & Kim, J. C. (2023). CO2 removal characteristics of a novel type of moss and its potential for urban green roof applications. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, *17*(1), 22.

[30] Chhabra, J., & Rakha, T. (2020). Building-integrated carbon sequestration techniques: Towards mitigating climate change. In *AIA/ACSA Intersections Research Conference: CARBON*.

[31] Cai, L., Feng, X. P., Yu, J. Y., Xiang, Q. C., & Chen, R. (2019). Reduction in carbon dioxide emission and energy savings obtained by using a green roof. *Aerosol and Air Quality Research*, *19*(11), 2432-2445.

[32] Yang, S., Kong, F., Yin, H., Zhang, N., Tan, T., Middel, A., & Liu, H. (2023). Carbon dioxide reduction from an intensive green roof through carbon flux observations and energy consumption simulations. *Sustainable Cities and Society*, *99*, 104913.

[33] Konopka, J., Heusinger, J., & Weber, S. (2021). Extensive urban green roof shows consistent annual net uptake of carbon as documented by 5 years of eddy-covariance flux measurements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *126*(2), e2020JG005879.

[34] Heusinger, J., & Weber, S. (2017). Extensive green roof CO2 exchange and its seasonal variation quantified by eddy covariance measurements. *Science of the Total Environment*, *607*, 623-632.

[35] De la Sota, C., Ruffato-Ferreira, V. J., Ruiz-García, L., & Alvarez, S. (2019). Urban green infrastructure as a strategy of climate change mitigation. A case study in northern Spain. *Urban Forestry & Urban Greening*, *40*, 145-151.

Para saber mais

Artigos científicos

Abegg, M., Clulow, Z., Nava, L., & Reiner, D. M. (2024). Expert insights into future trajectories: assessing cost reductions and scalability of carbon dioxide removal technologies. *Frontiers in Climate*, *6*, 1331901.

Ciais, P., Dolman, A. J., Bombelli, A., Duren, R., Peregon, A., Rayner, P. J., Miller, C., Gobron, N., Kinderman, G., Marland, G., & Gruber, N. (2014). Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system. *Biogeosciences 11*(13), 3547-3602.

Mohareb, E., & Kennedy, C. (2012). Gross direct and embodied carbon sinks for urban inventories. *Journal of Industrial Ecology*, *16*(3), 302-316.

Paul, K. I., & Roxburgh, S. H. (2020). Predicting carbon sequestration of woody biomass following land restoration. *Forest Ecology and Management*, *460*, 117838.

Projetos e plataformas online

Oppla: https://oppla.eu/
Plataforma aberta europeia que funciona como um mercado de conhecimento para SbN, reunindo ciência, políticas e prática. Facilita o acesso a dados, ferramentas, estudos de caso e promove a interação entre investigadores, decisores, empresas e sociedade civil. Disponibiliza serviços como "Ask Oppla" para perguntas colaborativas e "Oppla Marketplace" para recursos especializados.

NetworkNature: https://networknature.eu/

Projeto financiado pela Comissão Europeia (Horizon 2020) que fortalece a comunidade SbN na Europa, promovendo cooperação local, regional e internacional. Consolida evidências científicas, conecta stakeholders, promove eventos e apoia a transposição da ciência para políticas públicas. Oferece hubs regionais, formação e uma base de dados de casos de sucesso e recursos multimédia.

Biodiversa+: https://www.biodiversa.org/
Parceria europeia cofinanciada que apoia investigação e inovação em biodiversidade, com foco na monitorização harmonizada dos serviços dos ecossistemas, incluindo o sequestro de carbono. Reúne diversas organizações de dezenas de países para promover ciência aplicada à formulação de políticas ambientais e valorização da biodiversidade no setor privado.

BISE (Biodiversity Information System for Europe): https://biodiversity.europa.eu/
Portal oficial da UE que centraliza dados, políticas, estatísticas e pesquisas sobre biodiversidade europeia. Facilita o acesso a informações sobre espécies, habitats, impactos da perda de biodiversidade e políticas de conservação, sendo uma ferramenta essencial para apoiar decisões baseadas em evidências científicas.

Think Nature: https://www.think-nature.eu/
Projeto europeu que visa acelerar a implementação de SbN em contextos urbanos e regionais, promovendo a disseminação de boas práticas, ferramentas de avaliação e capacitação para decisores e técnicos.

Climate-ADAPT (European Climate Adaptation Platform): https://climate-adapt.eea.europa.eu/
Plataforma da Agência Europeia do Ambiente que apoia decisores na adaptação climática, oferecendo dados, ferramentas e exemplos de políticas, incluindo o papel das SbN na mitigação e adaptação às alterações climáticas.

NWRM (Natural Water Retention Measures): http://nwrm.eu/
Iniciativa focada em medidas naturais para retenção de água, que se sobrepõem às SbN para melhorar a gestão hídrica e promover o sequestro de carbono em ecossistemas aquáticos e terrestres.

DRMKC (Disaster Risk Management Knowledge Centre): https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/
Centro da Comissão Europeia que integra conhecimento sobre gestão de riscos de desastres, destacando a resiliência proporcionada pelas SbN em contextos de eventos extremos.

REGREEN: https://www.regreen-project.eu/
Projeto europeu que investiga o potencial das infraestruturas verdes urbanas para mitigar as alterações climáticas, melhorar a qualidade de vida e promover o sequestro de carbono em ambientes urbanos.

Outros documentos e relatórios internacionais

IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. **Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 896 pp.** https://doi.org/10.1017/9781009157988 .
Relatório do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas que destaca o papel fundamental das SbN, como restauração florestal, agricultura sustentável e conservação de solos, para a mitigação do carbono e adaptação climática.

FAO. 2022. The State of the World's Forests 2022. Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies. Rome, FAO. https://doi.org/10.4060/cb9360en**.**
Relatório que detalha o papel das florestas e das SbN na captura de carbono, destacando práticas de manejo sustentável e restauração florestal como estratégias-chave para a mitigação climática.

United Nations Environment Programme and International Union for Conservation of Nature (2021). Nature-based solutions for climate change mitigation. Nairobi and Gland. Guia técnico da União Internacional para a Conservação da Natureza que define conceitos, benefícios e desafios das SbN, com foco em políticas e práticas para maximizar o sequestro de carbono. https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/37318/NBSCCM.pdf

European Environment Agency, Castellari, S., Zandersen, M., Davis, M., Veerkamp, C. et al., Nature-based solutions in Europe policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction, Publications Office, 2021. https://data.europa.eu/doi/10.2800/919315.
Relatório que avalia a eficácia, custos e benefícios das SbN na Europa, incluindo estudos de caso e recomendações para integração em políticas climáticas e urbanas.