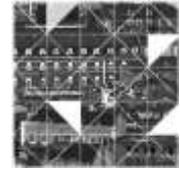

CIDADES, Comunidades e Territórios



Bases para o planejamento territorial urbano: Uso de imagens hiperespectrais para a identificação de áreas geradoras de funções ecológicas de suporte

Rubens Amaral¹, Universidade de Brasília, Brasil.

Maria do Carmo de Lima Bezerra², Universidade de Brasília, Brasil.

Gustavo Macedo de Mello Baptista³, Universidade de Brasília, Brasil.

Rômulo José da Costa Ribeiro⁴, Universidade de Brasília, Brasil.

Aline da Nóbrega Oliveira⁵, Universidade de Brasília, Brasil.

Resumo

A consideração dos serviços ecossistêmicos no planejamento territorial tanto previne quanto mitiga impactos ambientais, objetivo que se alcança por meio dos serviços que se relacionam a provisão de recursos e regulação do ambiente propiciando bem estar sociocultural. Mas tais serviços estão ancorados na integridade do ecossistema que é alcançada pelas funções ecológicas de suporte que, por sua vez, possuem na presença da vegetação e na capacidade de seqüestro de carbono na paisagem sua melhor expressão. Esse entendimento demanda que o planejamento do território considere e disponha de meios de mensurar a presença dessas funções para subsidiar suas decisões sobre o uso e ocupação do solo. O presente trabalho objetiva identificar sumidouros de carbono na paisagem territorial do Distrito Federal, com o uso de ferramentas de sensoriamento remoto para subsidiar um planejamento territorial baseado na promoção e proteção de funções ecológicas de suporte e, por decorrência, dos serviços ecossistêmicos (regulação, provisão e cultura). Visando identificar áreas com comportamento de sumidouro de carbono, foram aplicados, em um trecho da paisagem do Distrito Federal, os índices ICO_2 e CO_2flux , um vinculado à presença de CO_2 na coluna atmosférica e outro, à eficácia fotossintética da vegetação. Na análise dos resultados uma relação entre os índices foi observada, na identificação de sumidouros de carbono e forneceram-se evidências do desempenho da vegetação na prestação de serviços ecossistêmicos de suporte, apontando a relevância dos índices hiperespectrais para subsidiar o planejamento territorial.

Palavras-chave: Serviços ecossistêmicos, território, planejamento urbano, sensoriamento remoto, sumidouros de carbono.

¹amaral.arqbr@gmail.com

²mdclbezerra@gmail.com

³gmbaptista@gmail.com

⁴rjcribeiro@unb.br

⁵aline.no@hotmail.com

Introdução

Serviços ecossistêmicos compreendem todos os benefícios e bens providos pela natureza para o suporte das atividades humanas em um dado território. Sua integridade depende do grau de pressão dessas atividades e/ou do tipo de manejo da paisagem que determinada sociedade desenvolve. Os efeitos negativos de pressões que exerçam substanciais alterações no ecossistema podem vir na forma de consequências para o suprimento de tais serviços, resultando no surgimento de doenças, escassez de água e alimentos, modificações na frequência e magnitude de inundações e secas decorrentes de alterações do clima, tanto na escala local (microclima) quanto na regional e global. Assim, mudanças na disponibilidade dos serviços ecossistêmicos podem afetar o bem-estar humano⁶ no âmbito econômico, da saúde e da segurança de vida com impactos até na prevalência e persistência da pobreza (MEA, 2005; Bokalders e Block, 2016; Belanger, 2017; Almenar et al., 2018)

Diante disso, a proteção e, sobretudo, promoção dos serviços ecossistêmicos tem se tornado cada vez mais necessária para a prática do planejamento territorial. Mas como mensurar sua integridade? Como empreender ações assertivas na promoção dessa integridade? Essas são questões que muitos pesquisadores estão debruçados, dado que são de aparente difícil resolução.

Um melhor entendimento sobre os diferentes tipos de serviços ecossistêmicos se faz necessário e pode ser retomado a partir da categorização apresentada na Avaliação Ecossistêmica do Milênio - *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA) que desenvolveu a seguinte classificação: (i) serviços de provisão, como disponibilidade de alimentos, água doce, madeira e combustíveis; (ii) serviços de regulação, como drenagem natural, regulação do clima, polinização, controle de erosões, diminuição de ilhas de calor; (iii) serviços culturais, como recreação, valores espirituais, turismo, sensação de pertencimento e bem-estar psicológico; (iv) serviços de suporte: garantidores das demais categorias, que se referem à produção primária, ao ciclo de nutrientes e à formação e estruturação dos solos, sendo estes imbricados entre si e com as dinâmicas de sequestro de carbono na natureza (MEA, 2005; Bonam, 2008).

O tema dos serviços de suporte tem levado a discussões que questionam se esses seriam realmente `serviços`, dado que se enquadrariam como funções inerentes aos ecossistemas, diversos das demais categorias, estas então compreendidas como serviços ecossistêmicos (Mader et al., 2011; Bokalders e Block, 2014; Díaz et al., 2015; Potschin e Haines-Young, 2017; XU et al., 2019).

Contudo, mesmo que existam divergências, os diferentes autores emprestam relevância para o estudo das funções ou processos ecológicos que promovem interações biofísicas das quais se originam os serviços de regulação, provisão ou cultura (Mader et al., 2011; Colding, 2013; Díaz et al., 2015; Potschin e Haines-Young, 2017; Xu et al., 2019). Decorre desse entendimento certo consenso conceitual com o enquadramento do conceito de serviços ecossistêmicos de suporte como funções ecológicas de suporte, em consonância com a Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (CICES, versão 5.1) que vem sendo adotada na contemporaneidade pela Agência Europeia do Meio Ambiente – EEA. (Potschin e Haines-Young, 2016, 2018).

Perante essa contextualização, este estudo ressalta que, independente da categorização adotada, desconsiderar o encadeamento proposto pela MEA (2005) entre os processos de produção primária, ciclo de nutrientes e formação do solo pode resultar em inconsistências na operacionalização das estratégias territoriais para promoção e proteção de serviços ecossistêmicos. Primeiro, por serem as funções ecológicas de suporte aquelas que podem efetivamente impulsionar o fluxo de matéria e energia entre as várias camadas da paisagem – vertical

⁶Presume-se que o bem-estar humano possui múltiplos constituintes, incluindo os elementos necessários para o que se chamaria de uma boa vida. Envolve ter meios de subsistência seguros e adequados, comida suficiente em todos os momentos, abrigo, roupas e acesso a bens. Ter saúde, incluindo se sentir bem e possuir um ambiente físico saudável, com ar limpo e acesso a água limpa; boas relações sociais, incluindo coesão social, respeito mútuo e capacidade de ajudar os outros e prover filhos; segurança, incluindo acesso seguro a recursos naturais, segurança pessoal e proteção contra desastres naturais e causados pelo homem. Além disso, liberdade de escolha e ação, incluindo a oportunidade de alcançar o que um indivíduo valoriza fazer e ser. A liberdade de escolha e ação é influenciada por outros constituintes do bem-estar (bem como por outros fatores, principalmente a educação) e também é uma condição prévia para se alcançar outros componentes, principalmente no que diz respeito à equidade e justiça (MA, 2005).

e horizontalmente, movimento constante que garante e qualifica os serviços ecossistêmicos (Wolman, 1965; Mcharg, 1969; Delpoux, 1972; Odum 1973; Mooney e Elrich, 1997; Gower, 2003; Lal, 2004, Hoobs, 2007; Bélanger, 2017). Segundo, pelo fato da categoria de suporte ser claramente aquela capaz de responder à demanda por aprofundamentos no manejo das bases biofísicas que sustentam os serviços ecossistêmicos (MEA, 2005; Potschin e Haines-Young, 2016, 2018)

Decorre daí o entendimento de que estudos para análise, qualificação, monitoramento e valorização dos serviços ecossistêmicos que estruturam a paisagem encontra amparo na priorização das funções de suporte de modo que o planejamento territorial conte, quando de suas estratégias de uso e ocupação, de estudos para integrar formas de proteção e promoção de tais processos às suas práticas. (MEA, 2005; Hobbs, 2007; Bonam, 2008; Lovell e Taylor, 2013; Bélanger, 2017).

Apesar da necessidade de maior conhecimento sobre a dinâmica dos serviços ecossistêmicos, se sabe que as funções de suporte – produção primária, ciclo de nutrientes e formação do solo – estão entrelaçados com a presença de vegetação no território, especialmente o tipo arbóreo e seu desempenho no sequestro de carbono, que, quando efetivo, configura sumidouros de carbono (*carbonsinks*). (MEA, 2005; Bonam, 2008; Firehock e Walker, 2019). Em suma, uma forma de identificar uma área com integridade em relação às funções ecológicas de suporte pode ser obtida a partir da avaliação de sua capacidade de atuar como sumidouro de carbono, referente ao grau de implantação do ciclo biológico desse elemento.

Assim, existirão áreas no território que de fato desempenham a função do sequestro de carbono na paisagem, por meio da integridade de suas funções ecológicas de suporte, sendo relevante a quantificação e qualificação para que possam apoiar as decisões futuras de intervenção de modo a garantir tais funções e incorporá-las nas tomadas de decisão relativas ao planejamento territorial.

A partir dessa contextualização o presente trabalho explora o potencial dos sumidouros de carbono no território do Distrito Federal, Brasil, como subsídio a ações de planejamento da paisagem baseado na promoção e proteção de serviços de ecossistêmicos, por meio do uso de ferramentas de sensoriamento remoto, em particular as relacionadas ao ciclo do carbono, com ganhos importantes para a mitigação dos riscos climáticos e aumento da resiliência urbana.

1. Proteção dos serviços ecossistêmicos e planejamento do território

A relevância dos serviços ecossistêmicos para a mitigação de impactos ambientais sobre o território e na melhoria do bem-estar humano tem sido objeto, relativamente recente, de estudo no âmbito do planejamento da paisagem urbana. No entanto, existe, há algum tempo, certo consenso sobre a importância da sinergia entre a presença dos espaços vegetados com a integridade dos ecossistemas e de suas funções para fazer frente às pressões da urbanização sobre o território (Waldheim, 2016; Danish Nature Agency, 2015; Bélanger, 2017; Bonzi, 2017; Bunster-Ossa, 2017; Oliveira, 2017; Pellegrino, 2017; Firehock e Walker, 2019).

Desde a época da revolução industrial as áreas verdes começaram a ser introduzidas nas cidades, como elementos de separação de atividades e/ou conexão de áreas da cidade ou com suas expansões. Tais iniciativas de caráter intra-urbano tinham uma preocupação comum: trazer sol, ar fresco e o verde para dentro do meio urbano de modo a minimizar a insalubridade (Citte, 1889; Howard, 1902; Oliveira, 2017).

Ao longo do século XX, a lógica desse modelo foi expandida para a escala do planejamento regional, pois surgiu a necessidade de se organizar o território, permitindo a expansão das ocupações, mas mantendo a conexão das cidades com eixos verdes a serem articulados em diversas escalas. Esses foram estudos desenvolvidos, sobretudo, pelo planejamento urbano ambiental, a partir da década de 1960, quando se destaca a preocupação com as bacias hidrográficas no âmbito do planejamento territorial (McHarg, 1969; Danish Nature Agency, 2015; Bélanger, 2017; Bunster-Ossa, 2017; Oliveira, 2017). Como resultado, nas localidades onde foi adotado, se

identifica uma estrutura de ocupações urbanas entrelaçada com espaços vegetados que, mesmo não decorrente de preocupações ambientais explícitas, possibilitou vantagens relacionadas ao aumento da resiliência urbana.

Mais recentemente, a partir dos anos de 1990, a infraestrutura verde⁷ tem sido um dos campos disciplinares que, de forma mais abrangente, tem articulado estudos precusores, consolidando tanto trabalhos teóricos, como experiências de projetos e planejamento da paisagem. Esse campo de estudo avança sobre as preocupações de integridade ecossistêmica, apresentando como um de seus principais objetivos a proteção e promoção dos serviços ecossistêmicos em diferentes complexidades, para garantia de uma paisagem natural e/ou construída capaz de integrar o maior número de funções possíveis, por meio dos princípios da multiescalaridade e da multifuncionalidade (Sant'anna, 2020). Contudo, cabe ressaltar que se trata de um campo em construção, com correntes voltadas para sistemas tecnológicos e outras para configurações de sistemas biofísicos, mas sempre com intervenções que abrangem desde a escala micro a estruturas macro territoriais (MEA, 2005; Lovell e Taylor, 2013; Bélanger, 2017; Bonzi, 2017; Oliveira, 2017; Meneguetti, 2017; Pellegrino, 2017; Firehock e Walker, 2019). Diante de tal abordagem, onde fica explicitada a importância dos serviços ecossistêmicos no âmbito qualitativo, se faz necessária para maior assertividade uma avaliação quantitativa e com métricas padronizadas aplicadas no território.

Ao encontro dessas métricas, estudos apontam que a eficácia fotossintética, sobretudo em aglomerados de vegetação arbórea, pode ser associada a diversos serviços ecossistêmicos decorrentes das modificações químicas e estruturais promovidas pelas funções de suporte na paisagem. São evidenciados serviços de regulação como melhoria do ciclo hidrológico, aumento da drenagem natural, fertilidade e estabilização do solo e imobilização de poluentes, bem como de provisão com o aumento da produtividade de plantações e da disponibilidade de água potável (Lal et al, 2004; Trevisan et al., 2010; Lange et al., 2011; Decocq et al., 2016; Amaral et al., 2017; Gallagher et al., 2018), ambos relacionados aos fluxos biológicos de carbono e aos paralelos de nutrientes ao longo dos ecossistemas terrestres (Gower, 2003; Bonam, 2008).

Assim, a identificação de sumidouros de carbono e das características responsáveis pela sua existência pode subsidiar estratégias para o planejamento territorial, criando uma base propícia – e necessária – para a proteção e promoção de serviços ecossistêmicos, sejam de regulação, provisão ou mesmo cultura – afinal o bem-estar proporcionado por áreas com excepcional beleza natural se apóia também nas funções ecológicas de suporte que lhes são específicas. Visando ao aprofundamento dessas especificidades, o sensoriamento remoto tem desenvolvido diversas análises das dinâmicas de sequestro de carbono pela paisagem e ferramentas aptas à identificação e qualificação de sumidouros de carbono (Rahman et al., 2001; Baptista, 2004; Galvão et al., 2005; Schramm, 2007; Vibrans, 2007, Silva e Baptista, 2015; Baptista, 2019). Cabe, contudo, contextualizá-lo como ferramenta de análise para este estudo.

2. Metodologia e método

O sensoriamento remoto é o arranjo disciplinar que permite gerar e analisar imagens da superfície terrestre a partir da interação entre a energia eletromagnética e a matéria, por meio de sensores instalados em fontes sem contato direto com o alvo, como satélites, radares, ou mesmo drones (Meneses et al., 2019). Conforme variam os alvos, varia a medida da troca de energia resultante dessa interação, o que possibilita a identificação de diferentes materiais terrestres (solos, corpos d'água, edificações, rochas, vegetação) e suas propriedades (Meneses e Madeira Netto, 2001). Essa gama de possibilidades de análise configura o potencial do sensoriamento remoto como ferramenta de apoio ao planejamento do território. Permite a realização de diversos diagnósticos em variadas escalas espaciais e temporais a custos relativamente pequenos: diversas imagens de satélites cobrem a

⁷ Recentemente, a partir do foco nos valores e benefícios combinados de redes de espaços vegetados intercaladas com a ocupação urbana, tanto para a natureza, quanto ao bem-estar humano, compreendeu-se o que seria referenciado como infraestrutura-verde: uma rede de espaços vegetados (sistema biofísico), projetada ou não, podendo ser associada a sistemas tecnológicos, capaz de prover serviços ecossistêmicos em diversos graus de complexidade, observada a natureza multiescalar, multifuncional e sinérgica de tais serviços (MA, 2005; Lovell e Taylor, 2013; Bélanger; Bonzi; Cordeiro; Meneguetti; Pellegrino; 2017; Firehock e Walker, 2019).

superfície terrestre como um todo, disponibilizadas em bases gratuitas como a *United States Geological Survey - USGS* (USGS, 2020).

Entre as ferramentas de sensoriamento remoto com maior potencial para identificar sumidouros de carbono, figuram os sensores hiperespectrais, que possuem centenas de bandas que cobrem o espectro eletromagnético em intervalos finos de comprimento de onda, fornecendo uma diversidade de informações sobre a vegetação e seu desempenho. Isso ocorre porque, com essa quantidade de bandas, é possível identificar as principais feições espectrais que permitem avaliar a dinâmica fotossintética, bem como os conteúdos de dióxido de carbono atmosféricos (Meneses et al., 2019). Dentro dessa abordagem, foram utilizadas duas ferramentas de sensoriamento remoto: os índices ICO_2 , relacionado à variação de dióxido de carbono na coluna atmosférica, e CO_2flux , com as variações do desempenho da vegetação no sequestro de carbono e sua consequente eficácia fotossintética.

A análise inicia-se pela aplicação do índice hiperespectral ICO_2 , em um trecho da paisagem do Distrito Federal, onde foram buscadas variações de CO_2 na coluna de ar atmosférico de áreas que se comportam como sumidouros de carbono, observadas possíveis relações com o uso e ocupação territorial. Posteriormente, foi aplicado outro índice - CO_2flux - no mesmo trecho, mas em uma abordagem diferente, utilizando variações do desempenho da vegetação no sequestro de carbono (eficácia fotossintética). Este último índice por sua vez foi separado em classes de comportamento espectral da paisagem, visando contextualizar possíveis engates entre os diversos desempenhos fotossintéticos da vegetação e as políticas territoriais.

Em sequência procedeu-se à verificação da relação entre os índices espectrais supracitados: se as variações de dióxido de carbono, na coluna de ar atmosférico, mudam conforme a presença e distribuição da vegetação no território, bem como sua eficiência no sequestro de carbono. É importante ressaltar que os dois índices foram previamente validados por torres micrometeorológicas do projeto LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*) na Floresta Amazônica, nos contextos de floresta primária, floresta secundária, pastagem e cerrado de transição (Silva e Baptista, 2015a, 2015b), assim como o CO_2flux foi também validado no contexto de caatinga⁸ preservada e degradada, no semi-árido pernambucano (Santos, 2017).

Por fim, foi discutida a potencialidade da incorporação de estratos de vegetação com desempenho fotossintético significativo no planejamento da paisagem visando a proteção e promoção de serviços ecossistêmicos.

3. Estudo de caso: identificação de sumidouros de carbono no Distrito Federal

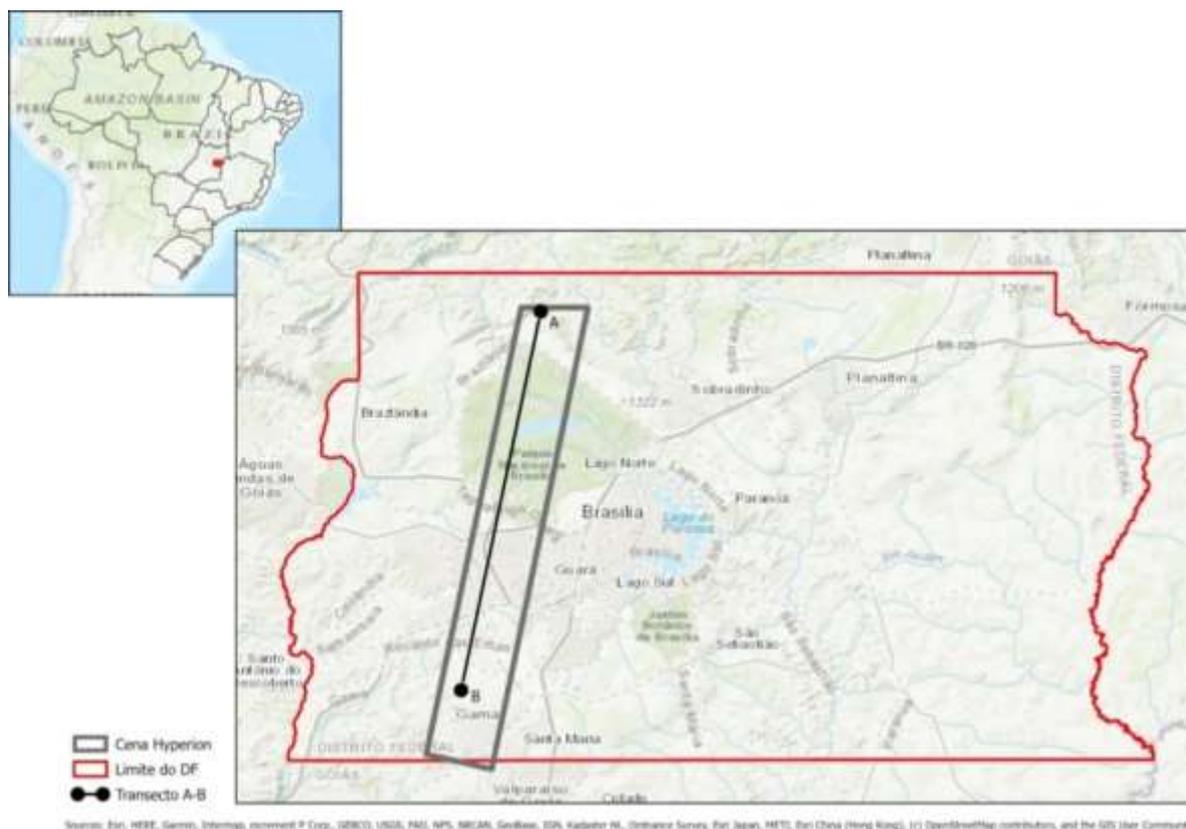
O estudo de caso foi procedido em um trecho da paisagem do território do Distrito Federal-DF, uma unidade federativa do Brasil, que abriga sua capital, Brasília, na região Centro-Oeste do país, totalizando uma área de 5.779.997 km² (IBGE, 2019). No DF há uma infinidade de tipos de uso e ocupação do solo, entrelaçados com uma gama de vegetações nativas e exógenas, que podem apresentar uma variação significativa na prestação das funções ecológicas de suporte, com diferentes desempenhos na absorção de carbono.

Para análise e simulação foi selecionada a cena Hyperion⁹ E01H2210172014119110KF_L1GST, de outubro de 2014: um período no final da estação seca, na região Centro-Oeste - sem precipitações significativas ou eventos climáticos extremos como *la niña* ou *el niño*. Na figura 1, é apresentada a localização da cena no Distrito Federal e o traçado de um transecto, denominado transecto A-B, ao longo do qual foram investigadas as dinâmicas relacionadas à presença e absorção de CO_2 pela paisagem.

⁸Biotoma que cobre a maior parte da área com clima semiárido da região Nordeste do Brasil, caracterizada pelo predomínio de espécies adaptadas à deficiência hídrica (Giulietti et al., 2004)

⁹O Hyperion é um sensor hiperespectral instalado em um satélite EO1, com imagens visíveis e infravermelhas, composto por 220 bandas que cobrem o espectro refletido com 16 bits de resolução radiométrica. Possui 30 metros de resolução espacial e uma largura de banda de 10 nm (Baptista; 2019)

Figura 1. Localização da Cena Hyperion E01H2210172014119110KF_L1GST, no Distrito Federal e do transecto de estudo A-B



Fonte: Elaboração Rômulo José Costa Ribeiro (2020)

O transecto A-B perpassa por 1.506 pixels¹⁰, com resolução espacial de 30 m, interceptando diversas formas de uso e ocupação do solo, proporcionando uma amostra de alvos para a averiguação, tanto das concentrações de CO₂ na coluna de ar atmosférico, quanto da capacidade de sequestro desse gás, ao longo do território. Cruza as três Macrozonas do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal – PDOT: Urbana, Rural e de Proteção Integral, além de interceptar a Unidade de Conservação Parque Nacional de Brasília (PARNA Brasília), pertencente à Macrozona de Proteção Integral. Essa macrozona, por sua vez, integra a Reserva da Biosfera do Cerrado – RBC¹¹, objeto de estratégias regionais e internacionais para a preservação do Bioma Cerrado¹². Nesse contexto, o parque foi escolhido como área de referência¹³, para o presente estudo, para balizar a análise de potenciais sumidouros de carbono aptos a prestar de forma significativa funções ecológicas de suporte, com possíveis reflexos para a preservação da integridade dos ecossistemas vinculados a área de estudo, inclusive os urbanos. A figura 2 apresenta a área e o transecto do estudo em relação ao macrozonamento distrital, à poligonal do PARNA e à Faixa Tampão da Reserva da Biosfera do Cerrado.

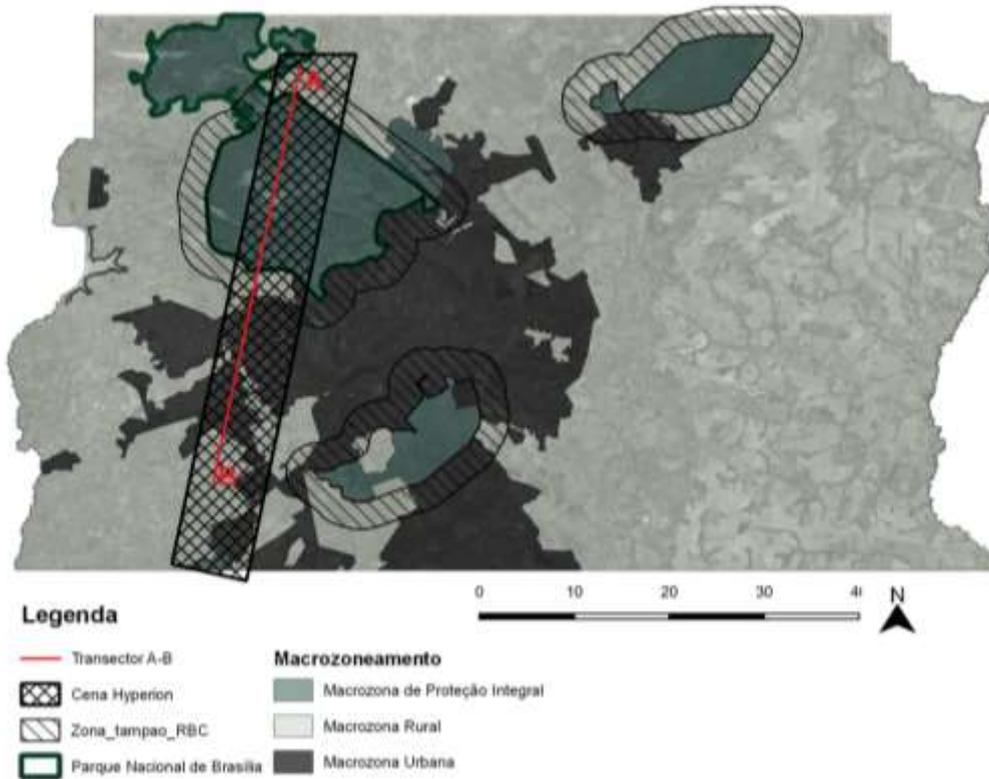
¹⁰No sensoriamento remoto hiperespectral, para cada pixel, existe um espectro medido de energia eletromagnética que atinge o sensor. Como cada pixel possui um valor de reflectância ou brilho para cada uma das 220 bandas, é possível obter um espectro contínuo, que pode ser usado para derivar uma infinidade de informações sobre o território, com base na assinatura espectral dos alvos e nas relações entre matéria e energia (Baptista, 2004; 2019).

¹¹As Reservas da Biosfera integram o Programa “O Homem e a Biosfera” da UNESCO, direcionado à conservação da diversidade biológica e cultural do Planeta (MAB,2020).

¹²Segundo maior bioma do Brasil, é composto pelas formações campestres (predomínio de espécies herbáceas, algumas arbustivas, sem ocorrência de árvores); savânicas (arbustos e árvores sem dossel contínuo espalhados sobre gramíneas) e florestais, com predomínio de espécies arbóreas e formação de dossel contínuo. Configura um biossistema subcontinental, com expressões na América Central, África e Austrália (Sano et al., 2007)

¹³De acordo com Hobbs (2007) áreas de referência são aquelas que apresentam desempenho ambiental apto para se medir o sucesso de ações de recuperação ecológica. Podem assim espelhar o funcionamento de um ecossistema antes de ser modificado ou degradado, visando a instalação de seus processos essenciais, balizando o grau de comprometimento de serviços ecossistêmicos em áreas analisadas, bem como o traçado de metas objetivas de recuperação ecológica.

Figura 2. Área e transecto do estudo em relação ao Macrozonamento Distrital e à poligonal do Parque Nacional de Brasília - PARNA

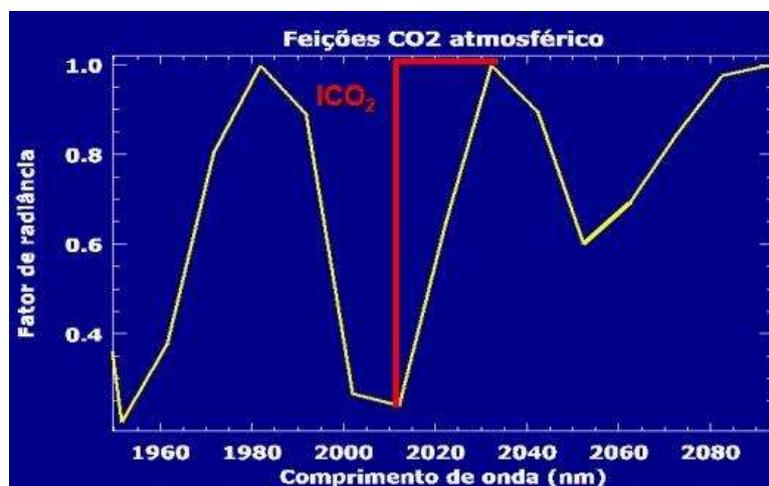


Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

3.1 Determinando o ICO_2 com índices espectrais

Para a determinação do teor de CO_2 na coluna de ar adjacente ao longo do transecto A-B, utilizou-se um índice espectral ICO_2 (Baptista, 2003; 2004) que, conforme ilustrado da figura 3, baseia-se na profundidade da feição de absorção do dióxido de carbono centrada no comprimento de onda de 2000 nm.

Figura 3. Intensidade da feição espectral do CO_2 obtida em uma cena Hyperion, relativa ao índice ICO_2



Fonte: Baptista (2003)

O procedimento de cálculo foi realizado determinando a intensidade de absorção da feição do gás, subtraindo-se o ponto máximo do ponto mínimo de radiância, localizados, respectivamente, nos comprimentos de onda de 2037 e 2007 nm, respectivamente, utilizando-se a seguinte equação, no módulo *Band Math* (Equação 1):

$$ICO_2 = L_{2037} - L_{2007} \quad (1)$$

Onde R2037 corresponde à radiância no nível do sensor da banda 111 e R2007 corresponde a radiância no nível do sensor da banda 108, ambas do sensor Hyperion. As bandas correspondem aos valores máximo e mínimo de radiância, respectivamente.

3.2 Determinando o CO_2flux com índices espectrais

Por sua vez, para estudar o seqüestro de carbono pela vegetação ao longo do transecto A-B, utilizou-se o índice CO_2flux . Para sua determinação foi necessária a integração do NDVI (Índice de Vegetação de Diferenças Normalizadas) e sPRI (Índice de Reflexão Fotoquímico Reescalonado para valores positivos). O NDVI usa as bandas vermelha e infravermelha no processo de diferença com soma normalizada, que visa a exibir uma relação percentual entre uma banda e outra. Esta operação aritmética permite uma distinção clara das áreas de vegetação devido à taxa de absorção na faixa do vermelho e ao pico de refletividade na faixa do infravermelho próximo. O índice NDVI (Equação 2) consiste na diferença de refletância entre a absorção do vermelho (660 nm) e o aumento do albedo que ocorre nos espectros da vegetação após o início do infravermelho (800 nm), em que R é o valor da refletância em cada comprimento de onda, ajustado para dados Hyperion (Rahman et al., 2001; Silva e Baptista, 2015a)

$$NDVI = \frac{R_{800} - R_{660}}{R_{800} + R_{660}} \quad (2)$$

O Índice de Reflexão Fotoquímica - PRI (Equação 3) é uma razão da diferença entre a feição de absorção azul (531 nm) e o pico de refletância do verde (570 nm) e pode ser correlacionado com a eficiência da luz na fotossíntese (Gamon et al., 1997).

$$PRI = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}} \quad (3)$$

No entanto, o PRI exige que seus valores sejam reescalonados, evitando dados negativos, sendo denominado sPRI (Equação 4). O reescalonamento para valores positivos é necessário para normalizar os dados “verdes” da vegetação. O sPRI foi obtido por meio do PRI adicionando uma unidade e dividindo o resultado por duas.

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2} \quad (4)$$

Por fim, o índice CO_2flux foi determinado pela multiplicação dos planos de informação NDVI e sPRI (Equação 5) usando o software ENVI®, versão 5.1, e seu módulo *BandMath*.

$$CO_2flux = NDVI \times sPRI \quad (5)$$

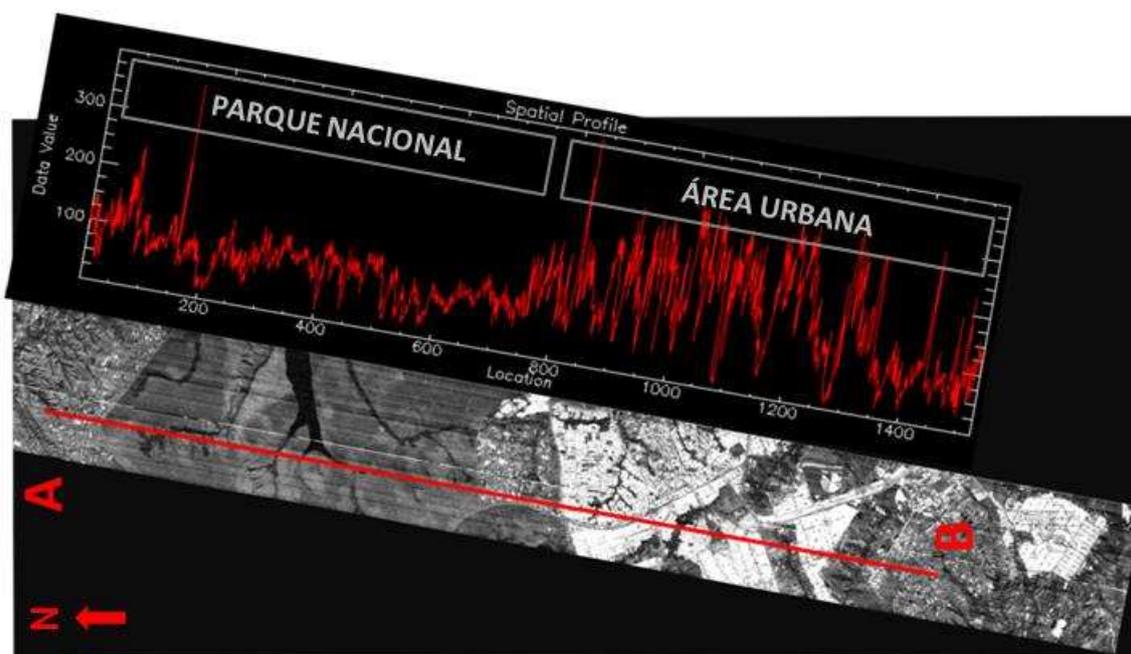
4. Interpretação dos padrões espaciais

A partir da aplicação dos índices supracitados, na área de estudo, se obtiveram as dinâmicas relacionadas à presença e absorção de CO₂ na paisagem, levando a algumas reflexões sobre suas potencialidades para tomada de decisões sobre planejamento do território e preservação e promoção das funções ecológicas de suporte.

Por meio dos resultados referentes à aplicação do ICO₂, identificaram-se as variações na concentração de CO₂ na coluna de ar sobre a área de estudo, agregando um maior grau de objetividade ao planejamento territorial. Não se trata da visualização da imagem do uso e ocupação do solo coberta pela cena Hyperion, mas das concentrações de dióxido de carbono sobre o território, que, por sua vez espelham a configuração territorial apresentada pela cena e interceptada pelo transecto, ilustrada na figura 4.

As áreas mais claras corresponderam às maiores concentrações de dióxido de carbono na coluna de ar atmosférico, coincidentes com as manchas de ocupação urbana e/ou com solo exposto – quanto mais brilhantes, maiores as concentrações de emissões de CO₂. As áreas graduadas em cinza corresponderam às com menores concentrações do gás, quanto mais escuras, menores a quantidades de CO₂ na coluna de ar.

Figura 4. Índice ICO₂ aplicado ao longo do transecto A-B



Fonte: Elaboração própria (2020)

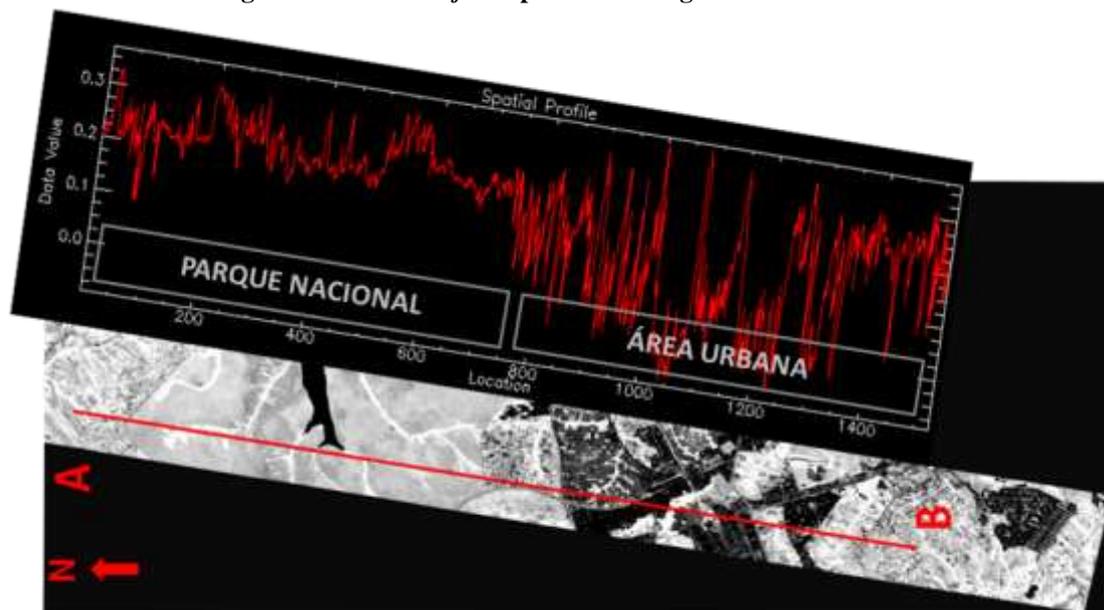
Como a cena Hyperion percorre uma área que corta o Parque Nacional de Brasília (área de referência) e vários núcleos urbanos do Distrito Federal, foi possível identificar um fenômeno que são os domos urbanos de CO₂ nas cidades. Esses domos configuram-se pela alta concentração de CO₂ atmosférico nas colunas de ar adjacentes a alvos urbanos (Baptista, 2003; 2004). Assim, observaram-se no transecto do estudo altas concentrações de gás relacionadas às áreas urbanas, com baixas significativas correspondentes ao Parque Nacional de Brasília.

Uma leitura mais acurada permitiu identificar que esse comportamento se repete dentro das áreas urbanas consolidadas com a concentração de dióxido de carbono caindo ao longo do transecto quando esse cortou áreas vegetadas, inseridas nos núcleos urbanos, pois o comportamento se assemelhou ao das faixas com vegetação florestal da área de referência. Observou-se também que as maiores quedas ocorrem quando se tem vegetação

arbórea, pois as áreas cobertas com gramíneas, em cinza mais claro, apresentam concentrações significativamente maiores do gás em relação às áreas florestadas na área de referência o que demonstrou muito menos efetividade na diminuição da concentração de CO₂ na atmosfera. Com uma gradação de cinza e comportamento intermediários apresentaram-se as áreas de savana.

Por sua vez, a atividade fotossintética demonstrada pela aplicação do índice CO₂flux sobre o Parque Nacional foi significativamente mais expressiva do que nas áreas com ocupações urbanas, corroborando com o fenômeno de domos de CO₂ urbano identificado quando da aplicação do índice de ICO₂ ao longo do transecto A-B, figura 5.

Figura 5. Índice CO₂flux aplicado ao longo do transecto A-B

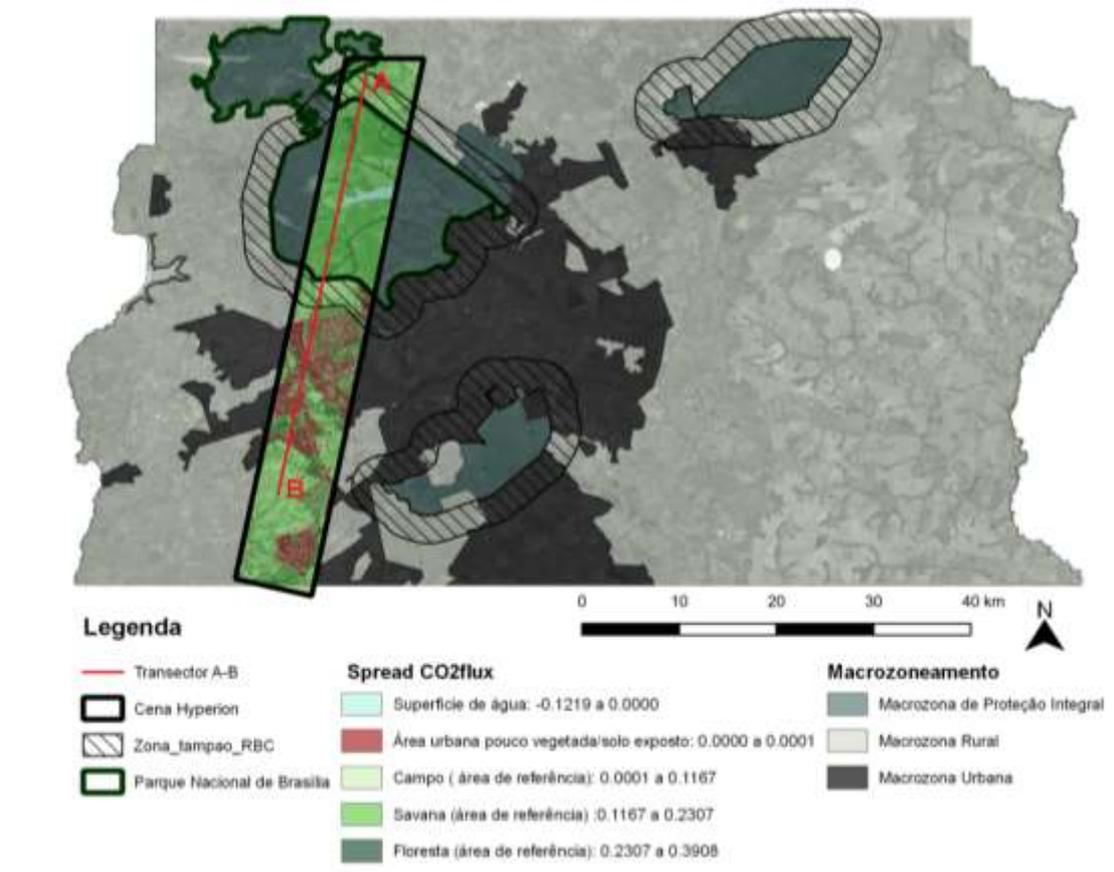


Fonte: Elaboração própria

Foram identificados aglomerados de vegetação arbórea em sítios urbanos com desempenho semelhante ao da área de referência que correspondem aos pontos e faixas mais brilhantes intercaladas com os tecidos urbanos ou áreas com o solo exposto. Observou-se, também, a associação entre a intensidade fotossintética com as variações na formação vegetal a partir da área de referência do estudo. Formações mais complexas como as florestais foram as que apresentam maior intensidade fotossintética, seguidas pelas savânicas, com desempenho intermediário e, em sequência, pelas campestres.

Foi possível também associar as variações de intensidade fotossintética, a partir da área de referência do estudo, não só à identificação de cinco classes de paisagem agrupadas pelo comportamento espectral dos alvos em relação ao CO₂flux, como da distribuição dessas classes perante o zoneamento territorial. A primeira classe, composta por formações vegetais mais complexas, como as florestais, apresentaram valores de CO₂flux entre 0,3908 e 0,2307; em sequência, as savânicas, entre 0,2307 e 0,1167 e as campestres, entre 0,1167 e 0,0001. Verificou-se o intervalo entre 0,0001 e 0,0000 para solos expostos ou mesmo áreas urbanizadas sem presença significativa de vegetação. Por fim chega-se às superfícies de água, que, por seu comportamento espectral atípico, apresentou valores entre 0,0000 e -0,1219. Fora as superfícies de água, tais comportamentos espectrais foram observados em todas as macrozonas do PDOT, bem como na Zona Tampão da Reserva Biosfera do Cerrado - RBC referente ao PARNA. A figura 6 apresenta as classes de paisagem identificadas na área de estudo, conforme o spread do CO₂flux, sobrepostas ao macrozoneamento do D.F. e à Zona Tampão da RBC.

Figura 6. Classes de paisagem, conforme o spread do CO_2flux , sobrepostas ao macrozoneamento do D.F. e à Zona Tampão da RBC



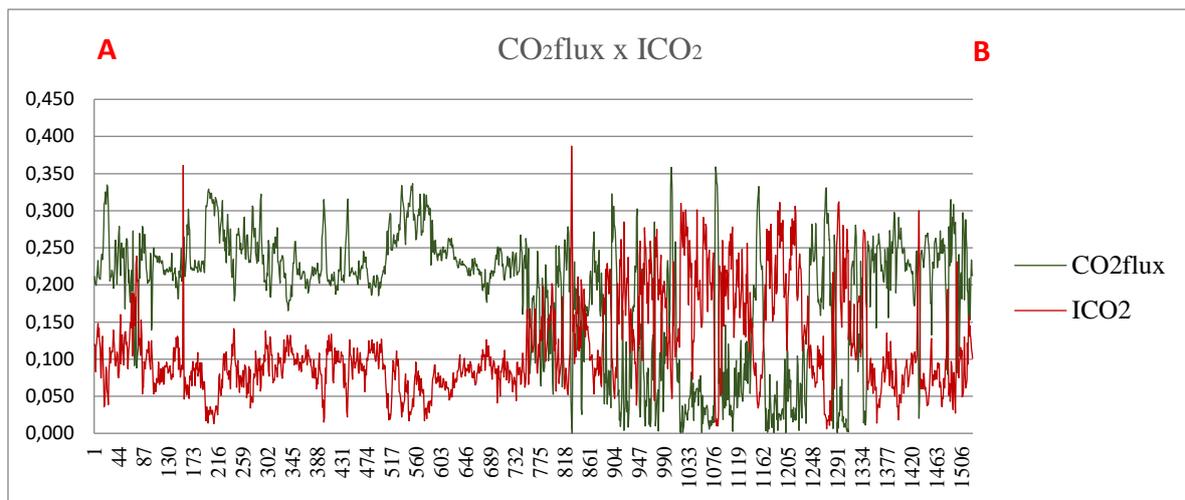
Fonte: Elaboração própria.

Essa leitura permite dizer que ambos os índices não só apresentaram variações de comportamento decorrentes da presença de vegetação no território, como também gradientes diferenciados entre áreas urbanas, rurais e de preservação ambiental. Nesse contexto, os efeitos das variações de uso e ocupação do solo sobre o desempenho conjunto dos índices, necessitam ser explicitados. Faz-se necessário avaliar a modelagem estatística dos padrões espaciais encontrados, esclarecendo o grau de influência da vegetação sobre as emissões de carbono, sobretudo nos domos urbanos de CO_2 .

4.1. Modelo Estatístico

Em uma abordagem comparativa, os parâmetros estudados, demonstraram-se inversamente proporcionais, pois quanto maior a atividade fotossintética da vegetação, menos CO_2 atmosférico foi encontrado na coluna acima do alvo. O gráfico 1 apresenta comparação das medições encontradas dos índices ICO_2 e CO_2flux ao longo do transecto A-B. Pode-se observar que o transecto de análise do índice CO_2flux apresenta comportamentos opostos ao transecto de estudo do índice ICO_2 , em conformidade com as variações de concentração de áreas vegetadas e de ocupações urbanas no território, de acordo com o transecto estudado.

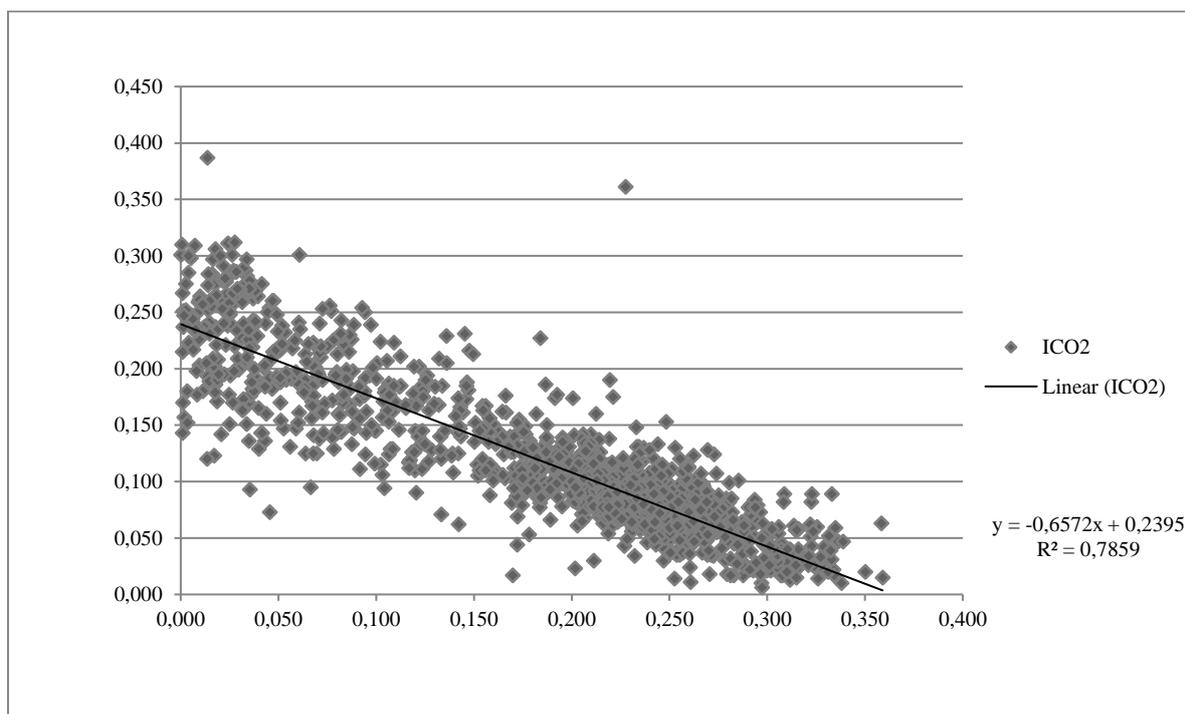
Gráfico 1. Comparação das variações entre os índices ICO₂ e CO₂flux aplicado ao longo do transecto A-B



Fonte: Elaboração própria (2020).

Esse fato foi confirmado pela análise de regressão linear entre os resultados, descrevendo função negativa com alto coeficiente de determinação ($R^2=0,785$), conforme apresentado no gráfico 2. Isso indica que cerca de 80% do sequestro de carbono nos 1.506 pixels interceptados pelo transecto A-B, correspondem a diminuições de concentração de CO₂ na coluna de ar atmosférico, suportando estatisticamente os padrões espaciais encontrados nos resultados anteriores.

Gráfico 2. Regressão linear entre os resultados da aplicação do índices ICO₂ e CO₂flux ao longo do transecto A-B



Fonte: Elaboração própria (2020).

Discussão

A internalização dos serviços ecossistêmicos no planejamento e projeto da paisagem responde às demandas por ocupações territoriais mais adaptáveis e resilientes aos impactos ambientais e antrópicos contemporâneos. Como visto, se encontram ancorados nas funções ecológicas de suporte, que, por sua vez, possuem na presença da vegetação e no fluxo de carbono na paisagem expressão de integridade.

A busca por responder à necessidade de mensuração por meio dos índices espectrais estudados possibilitou a identificação das variações do sequestro de carbono e da atividade fotossintética ao longo de variados padrões de ocupação territorial, como também evidenciaram áreas com maior integridade no desempenho das funções ecológicas de suporte, configurando sumidouros de carbono. Essa percepção vai ao encontro do coeficiente de determinação entre os índices (0,785), que comprova que ambos apontam para espacialidades muito semelhantes e complementares. Demonstram que baixos níveis de dióxido de carbono na coluna de ar atmosférico correspondem à eficácia da vegetação no sequestro de carbono e a uma atividade fotossintética mais intensa. Se por um lado as áreas urbanas configuram domos de CO₂ sobre os assentamentos, a área de referência do Parque Nacional de Brasília evidencia o papel da vegetação na mitigação desses efeitos, da escala regional à local.

Surpreendentemente, em certos aglomerados de vegetação arbórea, no interior dos tecidos urbanos ou a eles circundantes, observamos picos de atividade fotossintética e vales de concentração de carbono na coluna de ar maior ou próxima aos observados no Parque Nacional de Brasília. O esperado era que, nas áreas cobertas por domos de CO₂, a diminuição do teor de carbono na coluna de ar atmosférico fosse mais moderada se comparada com o desempenho da vegetação na área de referência. Esse comportamento poderia ser associado à implantação do ciclo biológico de carbono e paralelo de nutrientes, expressos pelas funções ecológicas suporte nessas localidades. Tais funções influenciam positivamente a formação de tecidos vegetais e húmus, que além de serem significativamente relacionados com a fertilidade e produtividade de um ecossistema, configuram os principais e mais efetivos pontos de sequestro de carbono nos ecossistemas terrestre (Lal et al, 2004; Bonam, 2008), influenciando a eficácia fotossintética da vegetação e a captura de carbono no ar (Gower, 2003; Lal, 2004; Adani e Spagnol, 2006 ; Bonam, 2008).

O estudo das funções ecológicas de suporte nesses maciços arbóreos poderia subsidiar a replicação e qualificação do provimento de serviços ecossistêmicos em outros tecidos urbanos e melhoria do bem-estar humano nas cidades, verificando quais formas de implantação urbanas são mais propícias à sua promoção ou propondo requalificação de novos tecidos urbanos.

Tais achados qualificam tanto o ICO₂, quanto o CO₂flux como índices aptos não só para medir e avaliar a integridade das funções ecológicas de suporte no território, como para subsidiar e valorizar a incorporação dessas funções no planejamento territorial. A partir da proteção ou promoção dessa integridade, os sumidouros de carbono revelados pelo estudo podem atuar como potenciais *hotspots* de multifuncionalidade, com maiores concentrações e performances de serviços ecossistêmicos, com benefícios *in-situ* ou externos aos seus limites (Timilsina et al., 2012; Liu et al, 2019; Sant'anna, 2020). Essa perspectiva permite a valorização dessas áreas perante as estratégias territoriais, cuja proteção decorreria da sua integração com as ocupações urbanas e, a partir daí, da percepção de sua importância para o bem-estar humano e a resiliência e adaptabilidade de sítios urbanos (Colding, 2013; Zaid; Pelling, 2013; Beiling; Wilkinson, 2015). A partir dessa ótica, a decorrente valorização econômica dos serviços prestados pelos *hotspots* não seria um fim em si, mas a comunicação de sua importância para os processos de produção e governança de uma ocupação territorial (La Notte et al., 2017; Méral, 2017; Paasgard et. al 2017). Nesse sentido, com incentivos para agentes institucionais ou privados, sumidouros de carbono podem configurar também áreas de pesquisa e aprimoramento de práticas voltadas para a promoção de serviços ecossistêmicos e proteção da vegetação nativa, como as zonas de tamponamento da Reserva da Biosfera do Cerrado (Distrito Federal, 1994).

Os benefícios dessas práticas para o bem-estar humano podem ser associados às variações de concentração de dióxido de carbono sobre a coluna de ar nas cidades, observadas pela aplicação do ICO₂. A leitura permitida pelo índice corrobora a efetividade de áreas com caráter florestal ou com concentrações de vegetação arbórea na

diminuição das concentrações do gás sobre os núcleos urbanos. Resultados compatíveis foram encontrados, em modelagens pontuais de sequestro florestal de carbono para áreas naturais e antrópicas de caráter rural, por meio de medições em torres micrometeorológicas. Em conformidade com o estudo de caso, áreas com maiores densidades florestais apresentaram menores concentrações de CO₂ e tendência negativa de fluxo na camada atmosférica (Fuentes et al., 2006, Silva e Baptista, 2015a, 2015b; Santos, 2017).

Por sua vez, a aplicação do CO₂*flux* na área de estudo não apenas correlaciona variações no desempenho fotossintético da vegetação em diferentes formações vegetais como possibilita a identificação daquelas com maior eficácia fotossintética. O que o estudo demonstra é que a atividade fotossintética muda, conforme aumenta o gradiente de vegetação arbórea, com impactos positivos para a prestação de funções de suporte. Essa gradação ampara-se em estudos que apontam que a vegetação arbórea, comparada com arbustos e gramíneas, assimila carbono e nutrientes em escala muito maior, gerando, a partir da fotossíntese, uma maior quantidade e complexidade de biomassa (Gower, 2003; Lal, 2004; Adani e Spagnol, 2006; Bonam, 2008; Amaral et al., 2017). Essa biomassa, uma vez absorvida pelo solo, regula sua estrutura física e química, propiciando o aumento da biodiversidade na rizosfera, promovendo a estabilização biológica dos ecossistemas terrestres (Amaral et al., 2017).

Um dos pontos não explorados pelo estudo foi a quantificação do comportamento inverso dos índices por meio de levantamentos *in-situ*. Embora a relação entre as concentrações de carbono medidas em campo e o fluxo de carbono evidenciado pelos índices tenha sido comprovada por Silva e Baptista (2015a, 2015b), a quantificação do sequestro de carbono com apoio de torres micrometeorológicas agregariam maior complexidade ao estudo. Provavelmente somariam especificidades sobre o funcionamento da vegetação no trecho estudado, nos contextos do Bioma Cerrado e do ecossistema urbano.

Podem-se, assim, pela aplicação conjunta dos índices, subsidiar diversas pesquisas, especificamente as relacionadas ao comportamento e configuração de sumidouros de carbono entrelaçados com aglomerações e tecidos urbanos. O entendimento dessa relação poderia oferecer indícios sobre como aprimorar o desempenho das funções ecológicas de suporte, a prestação de serviços ecossistêmicos e a melhoria do bem-estar humano, a partir do embricamento de vegetação na estrutura urbana.

Assim, existe a possibilidade de uma efetiva mensuração dos benefícios advindos de tal proposição, ou seja, configurar uma matriz de sumidouros de carbono, que, uma vez inseridos no planejamento da paisagem urbana e/ou regional estruturam uma rede de sistemas verdes urbanos em articulação e sinergia entre serviços ecossistêmicos. Para Firehock e Walker (2019) a compreensão da interdependência entre os ecossistemas ressalta a importância de planos de infraestrutura verde de múltipla escala. Essa articulação, instrumentalizada pelo CO₂*flux*, ocorreria nas diferentes escalas do território (frações urbanas, bairros, cidade e região) gerando enlances entre os sistemas biofísicos e construídos configurados pela proposição de um sistema de infraestruturas verdes integradas ao planejamento territorial.

Áreas, existentes ou projetadas, de porte urbano ou municipal, poderiam ser integradas com manchas e corredores de escala regional, evitando o isolamento dessas áreas e possibilitando a proteção dos serviços ecossistêmicos existentes. Tal articulação também promoveria uma gama de serviços ecossistêmicos nas cidades, decorrentes da suposta cooperação e interdependência entre tais serviços.

A multifuncionalidade da paisagem, um dos mais relevantes princípios da infraestrutura verde, poderia ser agregado às ações de projeto e planejamento da paisagem. Intervenções capazes de alavancar, conforme Oliveira (2017), uma integração sistêmica de serviços ecossistêmicos. No caso, apoiada na aferição, proteção e promoção das funções ecológicas de suporte.

Conclusão

Os resultados fornecem indícios da correlação entre aspectos relacionados ao desempenho da vegetação na prestação de funções ecológicas de suporte na paisagem. Por sua vez, as variações do desempenho da vegetação no sequestro de carbono encontradas apontam para potencialidades para operacionalizar, a partir dessas funções ecológicas, políticas, planos e projetos territoriais não apenas na perspectiva do isolamento de áreas ambientalmente sensíveis, mas também pela sua articulação com os núcleos urbanos e a valorização, junto à população, dos benefícios decorrentes dessa integração.

Os estudos permitiram observar que, tanto as concentrações de CO₂ na coluna de ar atmosférico, quanto a absorção do gás pela vegetação, na paisagem, variam conforme o uso e ocupação do território. Por sua vez, a presença de vegetação, especificamente a arbórea, comparece como elemento chave para diminuição das concentrações do gás na coluna de ar, bem como para aumento de sua absorção na paisagem, ratificando sua importância para a formação de sumidouros de carbono. Por outro lado, as gramíneas podem ser associadas a maiores concentrações do gás e menor provimento de funções ecológicas de suporte.

A compreensão fornecida pelas ferramentas estudadas em relação à estruturação e funcionamento dessas funções ecológicas, dada a dependência das categorias de serviços ecossistêmicos (regulação, provimento e cultural), possui potencial para subsidiar as intervenções de projeto e planejamento da paisagem utilizando a abordagem da infraestrutura verde de forma mais assertiva. Criando assim, uma rede apta a prover uma expressiva gama de serviços ecossistêmicos e prestar várias funções em um mesmo lugar, evidenciando a natureza multiescalar, multifuncional e sinérgica de tais serviços. Esse enfoque permitiria ir além do aumento quantitativo de áreas vegetadas para a prestação dos serviços, direcionando propostas de qualificação à sua eficiência, considerando inclusive a mitigação de eventuais conflitos entre diferentes serviços (eg. à radiação solar, reduzida por muita sombra).

De forma complementar o estudo aponta os ganhos da articulação entre os campos disciplinares do sensoriamento remoto, da arquitetura da paisagem e da ecologia para o aperfeiçoamento constante do conhecimento dos serviços ecossistêmicos conforme aponta o *Quadro de Avaliação Ecossistêmica do Milênio - Millennium Ecosystem Assessment Board*.

Por fim, fica evidenciada a necessidade de ampliação da abordagem para a aplicação e desenvolvimento de ferramentas de sensoriamento remoto aptas a apoiar estudos entre funções ecológicas de suporte e a biodiversidade. O aprofundamento dessa relação levantaria não apenas uma infinidade de benefícios para o bem-estar humano derivados da saúde dos ecossistemas, mas também novas perspectivas para o planejamento e desenho urbano. Tais ferramentas poderiam ofertar subsídios para novas formas de projeto da paisagem, nos quais os ecossistemas e seus componentes poderiam atuar ativamente (*workingnature*) na paisagem antrópica, provendo os diversos gamas de serviços ecossistêmicos necessários (suporte, provimento, regulação e cultural), na sua articulação com a forma urbana, da escala territorial à local e na definição de áreas preferenciais para a concentração das populações.

Referências

- Adani, F., Spagnol, M. (2006) “Biochemical origin and refractory properties of humic acid extracted from maize plants: the contribution of lignin”, *Biogeochemistry*, 82, pp. 55-85, 2006. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-006-9052-4>
- Almenar, J.B, Rugani, B., Geneletti, D., Brewer, T. (2018) “Integration of ecosystem services into a conceptual spatial planning framework based on a landscape ecology perspective”, *Landscape Ecol*, 33, pp. 2047–2059. Disponível em: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/13703>

- Amaral R., Costa, S., Muzzi, M. R. (2017) “O sequestro de carbono em trechos da floresta urbana de Belo Horizonte: por um sistema de espaços livres mais eficiente no provimento de serviços ecossistêmicos urbanos”, *Paisagem e Ambiente*, 39, pp. 163-179. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/paam/article/view/109272>
- Baptista, G. M. M. (2003) “Validação da Modelagem de Sequestro de Carbono para Ambientes Tropicais de Cerrado, por meio dos dados AVIRIS e HYPERION” Trabalho apresentado no XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, SBSR, 1037-1044, abril 2003, Belo Horizonte.
- Baptista, G. M. M. (2004) “Mapeamento do sequestro de carbono e de domos urbanos de CO₂ em ambientes tropicais, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral”, *Geografia*, 29(2), pp. 189-202. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1078802>
- Baptista, G. M. M. (2019) *Sensoriamento remoto hiperespectral*, Rio de Janeiro: Editora Interciência.
- Beilin, R., Wilkinson, C. (2015) “Introduction: Governing for urban resilience”, *Urban Studies*, 52(7), 1205–1217. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0042098015574955>
- Bélanger, P. (2017) *Landscape as infrastructure*, New York: Routledge.
- Bokalders, V., Block, M. (2016) *Urban ecosystem services: let nature do the work*, Estocolmo: c/o city. Disponível em: https://www.cocity.se/wp-content/uploads/2019/11/cocity_urban_ecosystem_services_summary.pdf
- Bonam, G. (2008) *Ecological climatology: concepts and applications*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Bonzi, R.S. (2017) “Paisagem como infraestrutura”, in P. Pellegrino, N. B. Moura (Eds.), *Estratégias para uma infraestrutura verde*, Barueri: Manole, pp. 1-24.
- Bunster-Ossa, I. F. (2014) *Reconsidering Ian McHarg: the future of urban ecology*, Londres e Nova Iorque: Routledge.
- Cherso, F. P. (1953) *A cidade feliz*, Campinas: Editora da Unicamp.
- Colding, J. (2013) “Local Assessment of Stockholm: Revisiting the Stockholm Urban Assessment”, in T. Elmqvist, et al (Eds.), *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities*, Dordrecht: New York, London: Springer, pp. 313-336. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-7088-1>
- Danish Nature Agency, (2015) *The finger plan*. Copenhagen: The Danish Nature Agency. Disponível em: https://danishbusinessauthority.dk/sites/default/files/fp-eng_31_13052015.pdf
- Decocq, G., et al. (2016) “Ecosystem services from small forest patches in agricultural landscapes”, *Current Forestry Reports*, 2(1), pp. 30-44. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0028-x>
- Delpoux, M. (1972) “Ecosystème et paysage”, *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, 43(2), pp. 157-174. Disponível em: https://www.persee.fr/doc/rgpso_0035-3221_1972_num_43_2_3327
- Díaz, S., et al. (2015) “The IPBES Conceptual Framework – connecting nature and people”, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, pp. 1-16. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>
- Firehock, K., Walker, R.A. (2019) *Green infrastructure: map and plan the natural world with GIS*, Redlands: Esri press.
- Forman, R. T. T., Godron, M. (1986) *Landscape Ecology*, New York: John Wiley & Sons.

Fuentes, D.A., et al.(2006)“Mapping carbon and water vapor fluxes in a chaparral ecosystem using vegetation indices derived from AVIRIS”, *Remote Sensing of Environment*, 103, pp. 312-323.Disponível em: https://specnet.info/SpecNet_Articles/Fuentes_2006.pdf

Gallagher, F.et al. (2018) “Urban Re-Greening: A Case Study in Multi-Trophic Biodiversity and Ecosystem Functioning in a Post-Industrial Landscape”, *Diversity*, 10, 119, pp. 1-15. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-2818/10/4/119>

Galvão, L. S.et al. (2005) “Discriminação de variedades de cana-de-açúcar com dados hiperespectrais do sensor Hyperion/EO-1”, *Revista Brasileira de Cartografia*, 57(1), pp. 7-14.Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44957>

Gamon, J. A.et al. (1997) “The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels”, *Oecologica*, 112, pp. 492-501.Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s004420050337>

Gao, B.C., Goetz, A.F.H. (1993)“Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data”, *Remote Sensing of Environment*, 44, pp. 165-178.Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425793900140>

Giulietti, A. M. et al.(2004)*Diagnóstico da vegetação nativa do bioma Caatinga. Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação*, Brasília: Embrapa. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/18267/1/Biodiversidade_Caatinga_parte2.pdf

Gower, S. T. (2003) “Patterns and mechanisms of the forest carbon cycle”, Madison: Department of Forest Ecology and Management. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.energy.28.050302.105515>

Haines-Young, R., Potschin-Young, M. (2018) “Revision of the common international classification for ecosystem services (CICES V5. 1): a policy brief”, *One Ecosystem*, 3, e27108. Disponível em: <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>

Hobbs, R.J., (2007) “Setting effective and realistic restoration goals: key directions for research”, *Restoration Ecology*,15, pp. 354-357.Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00225.x>

Howard, E. (1902) *Garden cities of to-morrow*, Londres: Swan Sonnenschein& CO., Ltd.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, (2019) Distrito Federal: História & Fotos. São Paulo: IBGE- Cidades.Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/brasil/panorama>

La Notte et al.(2017) “Ecosystem services classification: A systems ecology perspective of the cascade framework”, *Ecological indicators*, 74, pp. 392-402. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.030>

Lal, R. (2004) “Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security”, *Science*, 304, pp. 1623-1627. Disponível em: <https://science.sciencemag.org/content/304/5677/1623>

Lange, C.A., Böcker, L., Katur, J. (2011) “Revegetation of a uranium mine dump by using fertilizer treated sessile oaks”,*Int J Phytoremediation*, 13(1), pp. 18-34. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21598765/>

Liu, L. et al.(2019) “Hotspot identification and interaction analyses of the provisioning of multiple ecosystem services: Case study of Shaanxi Province, China”, *Ecological Indicators*, 107, 105566. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105566>.

Lovell, S. T., Taylor, J. R. (2013) “Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the united states”, *Landscape Ecology in Review*, 28, pp. 1447-1463. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10980-013-9912-y>.

Mader, A. et al.(2011)*TEEB manual for cities: Ecosystem services in urban management. Geneva: The Economics of Ecosystems and Biodiversity*, UN Environment. Disponível em <http://www.teebweb.org/publication/teeb-manual-for-cities-ecosystem-services-in-urban-management/>

Man and Biosphere Program – MAB, (2020)*Marco estatutário*. São Paulo: Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica. Disponível em: <http://rbma.org.br/n/mab-unesco/o-programa/>

McHarg, I. L. (1969)*Design with nature*, New York: American Museum of Natural History.

Meneguetti, K. S. (2017) “Antes da infraestrutura verde: o plano de Maringá”, in P. Pellegrino, N. B. Moura (Eds.) *Estratégias para uma infraestrutura verde*, Barueri: Manole, pp. 63-78

Meneses, P. R., Madeira Netto, J. D. S. (2001)*Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais*. Planaltina: Embrapa Cerrados. Disponível em <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGB.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=203614>

Meneses, P.R., Almeida, T, Baptista, G.M.M. (2019)*Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação*, São Paulo: Oficina de Textos.

Méral, P. (2012) “Le concept de service écosystémique en économie: origine et tendances récentes”, *Natures Sciences Sociétés*, 20(1), pp. 3-15. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/nss/2012002>

Millennium Ecosystem Assessment Board – MA (2005) “Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment”, London: Island Press. Disponível em: <https://www.cifor.org/knowledge/publication/1866/>

Mooney, H. A., Ehrlich, P. R. (1997) “Ecosystem services: fragmentary history”, in G.C. Daily, (Ed.), *Nature’s services: Societal dependence on natural ecosystems*, Washington/Covelo: Island Press, pp. 11-19.

More, T. (1516)*A utopia*, Brasília: Editora UNB.

Odum, H.T. (1973) “Energy, ecology and economics” *MBIO* 2, 6, pp. 220–227.

Pasgaard, M. et al.(2017) “Unfolding scientific expertise and security in the changing governance of Ecosystem Services”, *Geoforum*, 84, 354-367. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.02.001>

Pellegrino, P. (2017) “Paisagem como infraestrutura ecológica: a floresta urbana”, in P. Pellegrino, N. B. Moura (Eds.) *Estratégias para uma infraestrutura verde*, Barueri: Manole, pp. 63-78

Potschin, M., & Haines-Young, R. (2017) “Categorisation systems: The classification challenge”. In B. Burkhardt, J. Maes (Eds.), *Mapping ecosystem services*, Sofia: Pensoft Publishers, pp. 42-45. Disponível em: <https://ab.pensoft.net/articles.php?id=12837>

Potschin, M., Haines-Young, R. (2016) *Conceptual frameworks and the cascade model. OpenNESS Ecosystem Services Reference Book*. European Centre for Nature Conservation, Tilburg: The Netherlands (online). Disponível em: <http://www.openness-project.eu/library/reference-book/cascade-model>.

Rahman, A. F., Gamon, J. A., Fuentes, D. A., Roberts, D. A., Prentiss, D. (2001) “Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery”, *Journal of Geophysical Research*, 106(D24), pp. 33.579-33.591. Disponível em: http://www.geog.ucsb.edu/viper/viper_pubs/rahman_et_al_2001.pdf

Sano, E. E., Rosa, R., Brito, J. L. S., Ferreira, L. G. (2007) *Mapeamento de Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado: estratégias e resultados*, Planaltina: Embrapa Cerrados. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/570887/mapeamento-de-cobertura-vegetal-do-bioma-cerrado-estrategias-e-resultados>

Sant'anna, C.G. (2020) A Infraestrutura Verde e sua Contribuição Para o Desenho da Paisagem da Cidade. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Brasília – UNB.

Santos, C. V. B. (2017) Modelagem Espectral para Determinação de Fluxo de CO₂ em Áreas de Caatinga Preservada e em Regeneração. Dissertação de Mestrado em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Feira de Santana – UEFS.

Schifman, L.A., Prues, A., Gilkey, K., Shuster, W.D. (2018) “Realizing the opportunities of black carbon in urban soils: Implications for water quality management with green infrastructure”, *Sci Total Environ*, 644, pp. 1027-1035. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30743816/>

Schramm, V. F., Vibrans, A. C. (2007) “Uso de imagens hiperespectrais (EO-1 Hyperion) para detalhamento da detecção das formações florestais na bacia do Itajaí”, *Dynamics Revista Tecnocientífica*, 13(1), pp. 59-69. Disponível em: <https://bu.furb.br/ojs/index.php/dynamis/article/view/371>

Silva, S. C. P., Baptista, G. M. M., (2015a) “Modelagens de Sequestro Florestal de Carbono e dos Conteúdos de CO₂ Atmosférico com Dados Hyperion em Diferentes Ambientes na Amazônia Brasileira”. *RBC. Revista Brasileira de Cartografia*, 67, pp. 1509-1521. Disponível em: <http://200.19.146.79/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/49195>

Silva, S. C. P., Baptista, G. M. M., (2015b) “Análises espectrais da vegetação com dados hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de em diferentes ambientes na amazônia brasileira”, *Boletim de Ciências Geodésicas*, 21(2), pp. 354-370. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/41949>

Sitte, C. (1889) *City planning according to artistic principles*, Nova Iorque: Random House.

Timilsina, N. et al. (2013) “A framework for identifying carbon hotspots and forest management drivers”, *Journal of Environmental Management*, 114, pp. 293–302. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/45033>

Trevisan S, et al.(2010) “Humic substances biological activity at the plant-soil interface: from environmental aspects to molecular factors”, *Plant Signal Behav*, 5(6), pp. 635-643. Disponível: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3001551/>

United States Geological Survey – UGS: science for a changing world (2020) *Earth Explorer*. Washington: USGS. Disponível: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Waldheim, C., (2016) *Landscape as urbanism: a general theory*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Wolman, A. (1965) “The metabolism of cities”, *Scientific American*, 213(3), 178-193. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/24931120>

Xu, X., Yang, G., Tan, Y. (2019) “Identifying ecological red lines in China’s Yangtze River Economic Belt: A regional approach”, *Ecological Indicators*, 96, pp. 635-646. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.052>

Zaidi, R. Z., Pelling, M. (2015) “Institutionally configured risk: Assessing urban resilience and disaster risk reduction to heat wave risk in London”, *Urban Studies*, 52(7), pp. 1218-1233. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0042098013510957#>