

Quantificação dos serviços ecossistêmicos providos pela cobertura vegetal urbana e periurbana de Juiz de Fora (Minas Gerais, Brasil)

Julia Guedes da Cruz ¹, Helder Marcos Nunes Candido ², Thales Castilhos de Freitas ³, Marcelly de Souza Ventura ⁴, Fabrício Alvim Carvalho ^{5*}

¹Graduada em Ciências Biológicas, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.

²Doutor em Biodiversidade e Conservação da Natureza, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.

³Doutor em Biodiversidade e Conservação da Natureza, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.

⁴Doutoranda em Biodiversidade e Conservação da Natureza, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.

⁵Doutor em Ecologia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil. (*Autor correspondente: fabricio.alvim@gmail.com)

Histórico do Artigo: Submetido em: 28/10/2024 – Revisado em: 03/01/2025 – Aceito em: 12/05/2025

RESUMO

As florestas urbanas desempenham importante papel na manutenção da biodiversidade, qualidade do ar e ciclo hidrológico, fornecendo diversos serviços ecossistêmicos. Devido à proximidade com o ambiente urbano, esses ecossistemas são vulneráveis às perturbações antrópicas. Assim sendo, objetivou-se estimar os serviços ecossistêmicos promovidos pela vegetação das áreas urbanas e periurbanas do município de Juiz de Fora. Realizou-se um levantamento de dados de cobertura de solo utilizando o *software i-Tree Canopy* e posteriormente foram geradas as estimativas de sequestro e estoque de poluentes. O cálculo financeiro associado a esses serviços foi determinado através da valoração das toneladas de carbono equivalente (CO₂ Equiv.), em dólares. Os resultados revelaram valores de 220,55kt (US\$ 20,9 milhões) de sequestro anual de e estoque de 4.556,13kt (US\$ 433,6 milhões) de CO₂ Equiv. na área urbana. Na área periurbana estimou-se um sequestro anual de 628,82kt (US\$ 59,8 milhões) e estoque de 13.514,12kt (US\$ 1,3 bilhão) de CO₂ Equiv. Estes resultados enfatizam a relevância das florestas urbanas e periurbanas, tanto ambiental quanto econômica. Mesmo considerando o estágio inicial da comercialização de créditos de carbono no Brasil, este estudo destaca a importância de considerações monetárias como base para o desenvolvimento de políticas voltadas para a conservação e preservação desses ecossistemas.

Palavras-Chaves: Crédito de carbono; Florestas urbanas; i-Tree Canopy; Sequestro de carbono.

Quantification of ecosystem services provided by urban and peri-urban vegetation in Juiz de Fora (Minas Gerais, Brazil)

ABSTRACT

Urban forests play a crucial role in maintaining biodiversity, air quality, and the hydrological cycle by providing various ecosystem services. Due to their proximity to urban environments, these ecosystems are vulnerable to anthropogenic disturbances. Therefore, this study aimed to estimate the ecosystem services provided by the vegetation in the urban and peri-urban areas of Juiz de Fora (Minas Gerais, Brazil). A land cover data survey was conducted using the *i-Tree Canopy* software, and subsequent estimates of pollutant sequestration and storage were generated. The financial calculation associated with these services was determined by valuing the equivalent tons of carbon (CO₂ Equiv.) in dollars. The results revealed values of 220.55 kt (USD 20.9 million) of annual sequestration and 4,556.13 kt (USD 433.6 million) of CO₂ Equiv. storage in the urban area. In the peri-urban area, an annual sequestration of 628.82 kt (USD 59.8 million) and storage of 13,514.12 kt (USD 1.3 billion) of CO₂ Equiv. were estimated. Our results emphasize the environmental and economic relevance of urban and peri-urban forests. Even considering the initial stage of carbon credit trading in Brazil, this study highlights the importance of monetary considerations as a basis for the development of policies aimed at conserving and preserving these ecosystems.

Keywords: Carbon credit; Carbon sequestration; i-Tree Canopy; Urban forests.

Cruz, J. G., Candido, H. M. N., Freitas, T. C., Ventura, M. S., Carvalho, F. A. (2025). Quantificação dos serviços ecossistêmicos providos pela cobertura vegetal urbana e periurbana de Juiz de Fora (Minas Gerais, Brasil). *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.13, n.2, p.03-14.



Cuantificación de los servicios ecosistémicos proporcionados por la vegetación urbana y periurbana en Juiz de Fora (Minas Gerais, Brasil)

RESUMEN

Los bosques urbanos desempeñan un papel importante en el mantenimiento de la biodiversidad, la calidad del aire y el ciclo hidrológico, proporcionando diversos servicios ecosistémicos. Debido a la proximidad con el entorno urbano, estos ecosistemas son vulnerables a las perturbaciones antrópicas. Por lo tanto, se objetivó estimar los servicios ecosistémicos proporcionados por la vegetación en las áreas urbanas y periurbanas del municipio de Juiz de Fora (Minas Gerais, Brasil). Se realizó una recopilación de datos de cobertura del suelo utilizando el software i-Tree Canopy y posteriormente se generaron estimaciones de secuestro y almacenamiento de contaminantes. El cálculo financiero asociado a estos servicios se determinó a través de la valoración de toneladas equivalentes de carbono (CO₂ Equiv.), en dólares. Los resultados revelaron valores de 220,55 kt (USD 20,9 millones) de secuestro anual y 4.556,13 kt (USD 433,6 millones) de CO₂ Equiv. almacenamiento en el área urbana. En el área periurbana, se estimó un secuestro anual de 628,82 kt (USD 59,8 millones) y almacenamiento de 13.514,12 kt (USD 1,3 mil millones) de CO₂ Equiv. Estos resultados enfatizan la relevancia ambiental y económica de los bosques urbanos y periurbanos. Incluso considerando la etapa inicial del comercio de créditos de carbono en Brasil, este estudio destaca la importancia de consideraciones monetarias como base para el desarrollo de políticas dirigidas a la conservación y preservación de estos ecosistemas.

Palabras clave: Bosques urbanos; Crédito de carbono; i-Tree Canopy; Secuestro de carbono; Bosques urbanos.

1. Introdução

As florestas urbanas são ecossistemas imprescindíveis para a manutenção da biodiversidade, por serem lar de uma vasta diversidade taxonômica, funcional (Pyles et al., 2020) e filogenética (Borges et al., 2020). Além disso, as florestas atuam no sequestro de carbono (Speak et al., 2020; Yilma & Derero, 2020) e de outros poluentes atmosféricos (Nowak et al., 2013), contribuindo para a retirada de gases do efeito estufa da atmosfera. Conseqüentemente, as florestas participam da regulação do efeito estufa e da temperatura, têm papel no ciclo hidrológico municipal ao regular taxas de precipitação através da evapotranspiração (Asbjornsen et al., 2011; Andrade et al., 2020) e contribuem na prevenção do assoreamento de corpos d'água e de processos erosivos. Os serviços ecosistêmicos são os benefícios que os ecossistemas proporcionam aos seres humanos, de forma direta ou indireta, abrangendo desde funções essenciais para a manutenção da vida, como a regulação do clima e da qualidade do ar, até a oferta de bens materiais, como alimentos, energia e medicamentos, além de benefícios culturais, espirituais e recreativos (TEEB, 2010; IPBES, 2019). Os serviços ecosistêmicos provém recursos importantes para a paisagem urbana, destacando-se em um país de expressiva biodiversidade como o Brasil (Zappi et al., 2015), visto que a conservação das florestas no ambiente urbano e periurbano contribui para a manutenção da riqueza de espécies (Pyles et al., 2020), além de estarem relacionados à mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e à qualidade de vida (Edreny et al., 2017), auxiliando a construção de cidades resilientes.

Em uma conjuntura econômica global altamente insustentável em termos de recursos e danos ao ambiente, as florestas urbanas se tornam alvos vulneráveis à constante perturbação antrópica das cidades. Além disso, as florestas periurbanas enfrentam desafios por estarem inseridas em uma área de atividades econômicas destinadas aos municípios. Dessa maneira, da mesma forma que a presença desses ecossistemas auxilia na contenção dos efeitos de mudanças climáticas, que estão intimamente relacionados à atividade humana, tais efeitos ameaçam o estabelecimento desses ecossistemas. Como resultado, em outros países já há relatos de uma crescente homogeneização da biodiversidade devido aos obstáculos enfrentados por esses ecossistemas na sucessão florestal (Alvey, 2006; Mckinney, 2006), visto que os fatores socioeconômicos e os processos de expansão urbana têm forte relação com a diminuição da vegetação e seus serviços (Baines, 2020; Bonilla-Bedoya et al., 2020; Chen, 2020). Apesar de sua importância e alta vulnerabilidade, as florestas urbanas ainda não recebem o destaque proporcional e suas análises ainda apresentam lacunas quanto às aplicabilidades no viés da ecologia (Marris, 2009), na legislação, em mecanismos de geração de energia renovável e sob o ponto de vista financeiro. Portanto, destaca-se a atual necessidade de estudos multidisciplinares a respeito da importância desses valiosos ecossistemas, valoração econômica e implicações de políticas públicas que visem sua conservação e preservação.

Em áreas urbanas no município de Juiz de Fora, foram realizados estudos de inventário da vegetação desde 2010 que permitiram análises de diversidade taxonômica, funcional e filogenética e que destacaram os importantes serviços ecossistêmicos providos pelas florestas urbanas (Borges et al., 2020; Pyles et al., 2020). No entanto, persiste um déficit em relação ao potencial de sequestro e estoque de carbono, bem como a remoção de poluentes atmosféricos desses ecossistemas, tópicos que estão diretamente relacionados à saúde e qualidade de vida da população (Guttikunda & Goel, 2013). Aliada a isso, há também uma carência de estudos acerca das potencialidades ecossistêmicas da vegetação periurbana, tanto sob o ponto de vista do sequestro e estoque de carbono, quanto em relação a outros serviços.

Desta maneira, os Sistemas de Informação Geográfica (GIS) contribuem para o levantamento e para a análise de dados ambientais, sendo grandes aliados na aplicação de políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável (Akbari et al., 2021; Tahri et al., 2021). Assim, nas ciências naturais, esses sistemas são importantes ferramentas para estudar o papel das florestas, uma vez que atuam na captura e análise de dados espaciais e geográficos. Dentre os diversos recursos e aplicabilidade dos GIS, destaca-se o conjunto de *softwares i-Tree* (I-TREE, 2021), que é relevante na análise e quantificação dos serviços ecossistêmicos promovidos pela vegetação. Estas ferramentas são fundamentais para validar os benefícios monetários gerados pelas florestas urbanas e periurbanas (Tan et al., 2021).

Nesse contexto de conservação da cobertura vegetal urbana e periurbana, além do destaque aos benefícios gerados por esses ecossistemas sob o ponto de vista ecológico, o crédito de carbono surge como um aliado no incentivo à preservação das florestas. O compromisso assumido por países desenvolvidos a respeito da redução dos gases do efeito estufa (GEE), no Protocolo de Quioto, incluiu a concessão de permissões de quantidade máxima de emissão de carbono (UNFCCC, 2008). Assim, fatores como a não utilização do limite máximo de emissões e a compensação através do investimento em restauração ecológica, geram créditos de carbono que podem ser comercializados (Alves et al., 2013; da Silveira & de Oliveira, 2021).

O Brasil tem parte no ato de flexibilização, criado durante o Protocolo de Quioto, denominado Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), que visa a redução dos gases do efeito estufa (GEEs) na atmosfera e que implica na participação do país no mercado de carbono (Alves et al., 2013). Por essa razão, é imperativo o investimento em pesquisas que se propõem a desvendar as potencialidades da cobertura vegetal do país para o mercado de carbono e para o controle das concentrações de GEE na atmosfera e, consequentemente, para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. No entanto, é importante ter em mente que, apesar de ser uma ferramenta de incentivo ao reflorestamento e preservação, esse mercado pode contribuir para a desapropriação de terras de povos tradicionais por parte de empresas que têm o interesse de gerar crédito de carbono, fato que deve ser objeto de atenção na regulação da comercialização de créditos de carbono no Brasil.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivos a realização da estimativa dos serviços ecossistêmicos promovidos pelas florestas nas áreas urbanas e periurbanas (rurais), além da classificação das classes de cobertura do solo e a quantificação do sequestro anual de poluentes atmosféricos e do estoque de carbono pela vegetação.

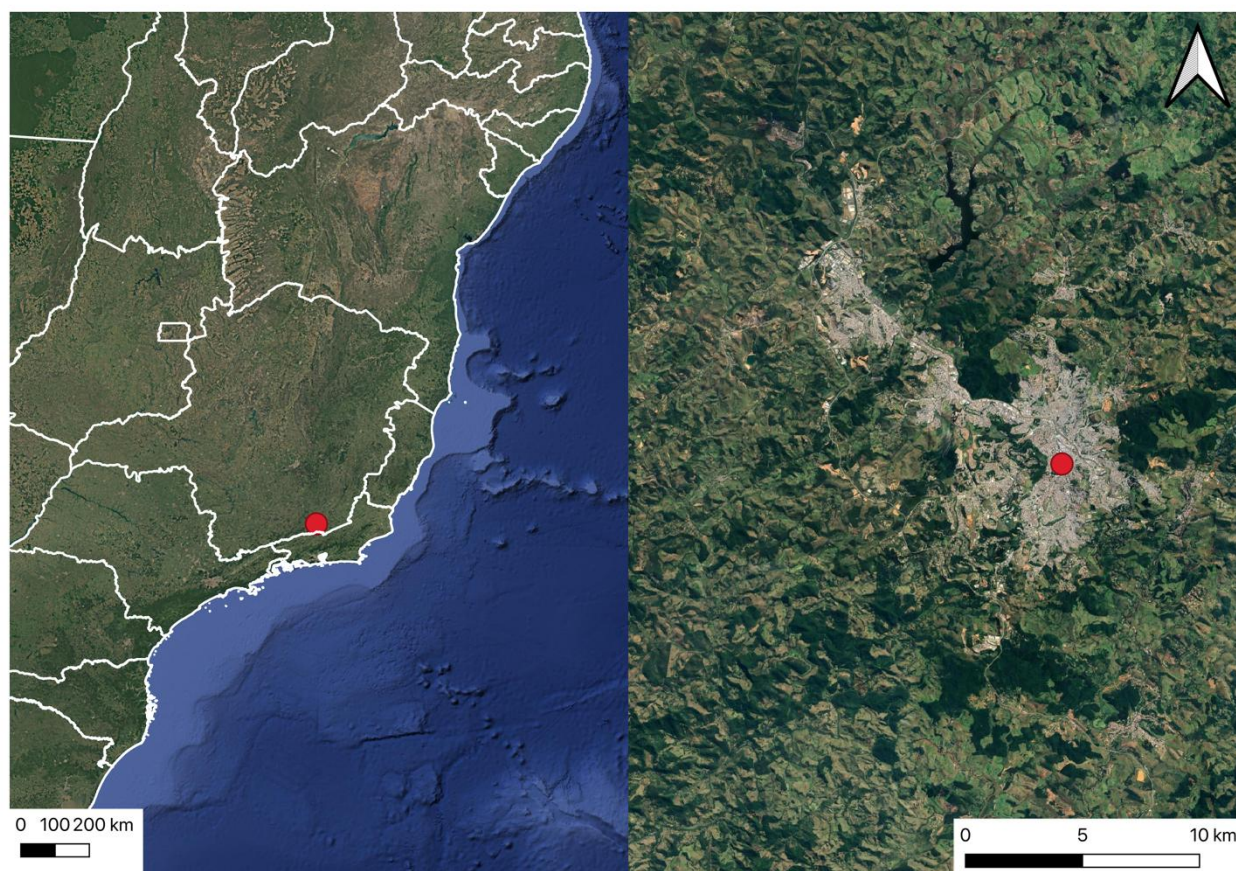
2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

O município de Juiz de Fora (21°45'51" S e 43°20'59" O) está localizado na Zona da Mata, na região Sudeste do estado de Minas Gerais, Brasil, em um tipo de relevo denominado Mar de Morros – em que ocorreu uma formação geológica caracterizada pela presença marcante de montanhas e vales que oscilam entre 600m e 1.000m de altitude (Figura 1). A precipitação anual do município é de 1500mm, com uma temperatura média anual de 19°C (CESAMA, 2020), sendo o clima classificado como Subtropical de Altitude (Cwa) (Alvares et al., 2013).

Figura 1- Localização do município de Juiz de Fora, Minas Gerais.

Figure 1- Location of the city of Juiz de Fora, Minas Gerais.



Fonte: Preparado pelo autor (2025).

Source: Prepared by the author (2025).

A fitofisionomia predominante na região é a Floresta Estacional Semidecidual (IBGE, 2012). O município abriga uma variedade de fragmentos florestais, caracterizados por diferentes tamanhos e estágios de sucessão ecológica, incluindo áreas protegidas em unidades de conservação (Borges et al. 2020; Pyles et al. 2020).

2.2 Levantamento de dados

Para a coleta de dados, foi utilizado o *software i-Tree Canopy v.7.1* (I-TREE, 2021), desenvolvido pelo Serviço Florestal do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e com acesso gratuito. As áreas urbanas e periurbanas de Juiz de Fora foram delimitadas em *shapefiles* disponibilizados pela Prefeitura de Juiz de Fora (PJF) e através do *software* ESRI® ArcMap. Foram utilizados dois *shapefiles*: um para a área urbana da cidade e outro para a região rural, ou periurbana (Figura 2). Essa última região engloba distritos adjacentes à cidade de Juiz de Fora, em áreas não urbanizadas. Ambas as florestas urbanas e periurbanas foram conceituadas segundo o documento das Nações Unidas denominado “*Guidelines on urban and periurban forestry*” (FAO, 2016).

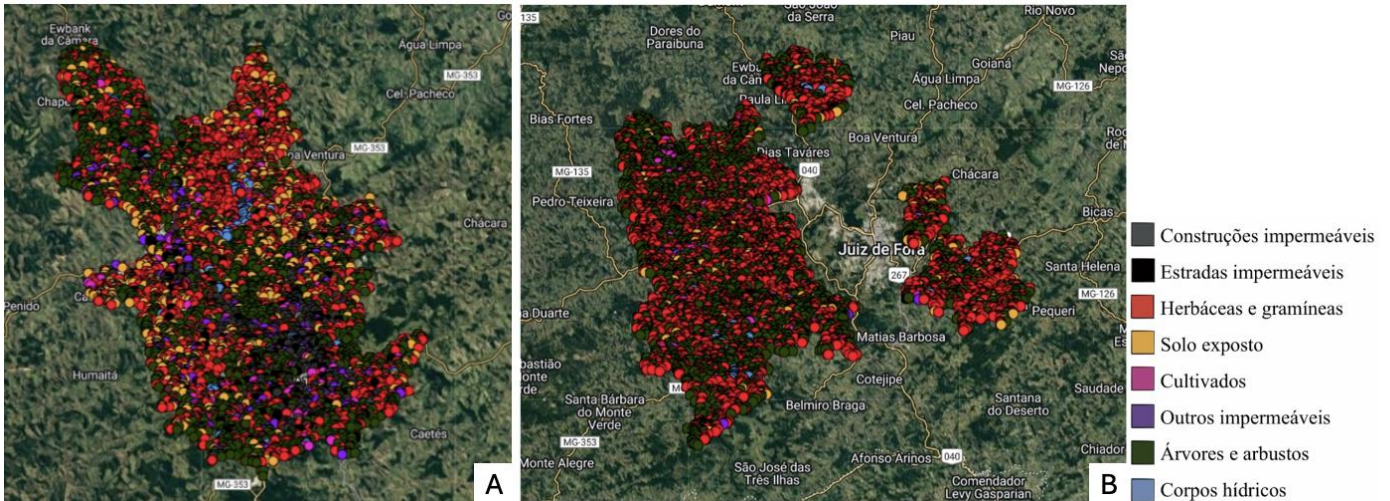
As delimitações foram posteriormente importadas para o *software i-Tree Canopy v.7.1* (I-TREE, 2021), que gera automaticamente pontos aleatórios dentro do arquivo importado em *shapefile* das áreas urbanas e periurbanas do município. Gerados os pontos, o *software* dispõe de um sistema de classificação que foi

utilizado para, através das imagens de alta resolução fornecidas pelos satélites do *Centre National d'Etudes Spatiales/Airbus* e disponibilizadas pelo *Google Earth*, categorizar os pontos de acordo com a classe de cobertura do solo.

Foram gerados 5.000 pontos aleatórios no *shapefile* da área urbana e 5.000 pontos no *shapefile* da área periurbana, totalizando 10.000 pontos (Figura 2). Os pontos foram denominados, segundo a classe de cobertura do solo em: herbáceas/gramíneas (H); construções impermeáveis (IB); estradas impermeáveis (IR); outros impermeáveis (IO); cultivados (P); solo/solo exposto (S); árvores/arbustos (T); e água (W).

Figura 2- Pontos gerados para classificação da cobertura do solo das regiões urbana (A) e periurbana (B) de Juiz de Fora.

Figure 2- Points generated for classification of land cover in the urban (A) and periurban (B) regions of Juiz de Fora.



Fonte: i-Tree Canopy

Source: i-Tree Canopy

2.3 Serviços ecossistêmicos

Através dos dados, o *software* gerou um gráfico com a área, em km², de cada categoria de cobertura do solo, contendo as porcentagens e o erro padrão. Através do próprio *i-Tree Canopy* foram quantificados os serviços ecossistêmicos providos pelas árvores através do sequestro de poluentes atmosféricos realizado por elas, sendo eles: dióxido de carbono equivalente (CO₂ Equiv.); monóxido de carbono (CO); dióxido de nitrogênio (NO₂); ozônio (O₃); dióxido de enxofre (SO₂); material particulado menor que 2,5 micrômetros (PM_{2,5}); e material particulado entre 2,5-10 micrômetros (PM₁₀). Somente as estimativas de carbono e dióxido de carbono serão apresentadas em quilo toneladas (kt), as demais estarão em toneladas (t) (Nowak et al., 2013).

Após feitas as estimativas dos serviços ecossistêmicos providos pelas árvores e suas implicações qualitativas na Ecologia, foram estimados os benefícios monetários que a preservação dessa cobertura do solo por florestas teria o potencial de promover, por meio da estimativa dos valores de tonelada de carbono equivalente (CO₂ Equiv.) sequestrado anualmente e estocado, convertido em dólar (US\$). A conversão foi feita de acordo com o valor indicado no mercado de créditos de carbono futuro na bolsa de valores de Londres (CFI2H5) (<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>) do dia 28 de junho de 2023 (1 crédito de carbono= € 88,37).

3. Resultados

A área total coletada na região urbana foi de 432,33km² e na periurbana de 1012,25km². No que diz respeito à cobertura do solo, para ambas as regiões, as maiores porcentagens em representatividade foram de “árvores e arbustos” (37,4% ± 0,68 urbana e 47,38% ± 0,71 periurbana) e “herbáceas e gramíneas” (32,46% ± 0,66 urbana e 45,50% ± 0,70 periurbana) (Tabela 1; Figuras 3 e 4). Em relação às menos representativas, destacam-se os de “cultivados” na área urbana (2,02%±0,2) e “outros impermeáveis” na área periurbana (0,18%±0,06) (Tabela 1; Figuras 3 e 4).

Tabela 1 – Área em km² e porcentagem da área total das diferentes classes de cobertura do solo nas áreas urbana e periurbana de Juiz de Fora, Minas Gerais.

Table 1- Area in km² and percentage of the total area of the different land cover classes in the urban and peri-urban areas of Juiz de Fora, Minas Gerais.

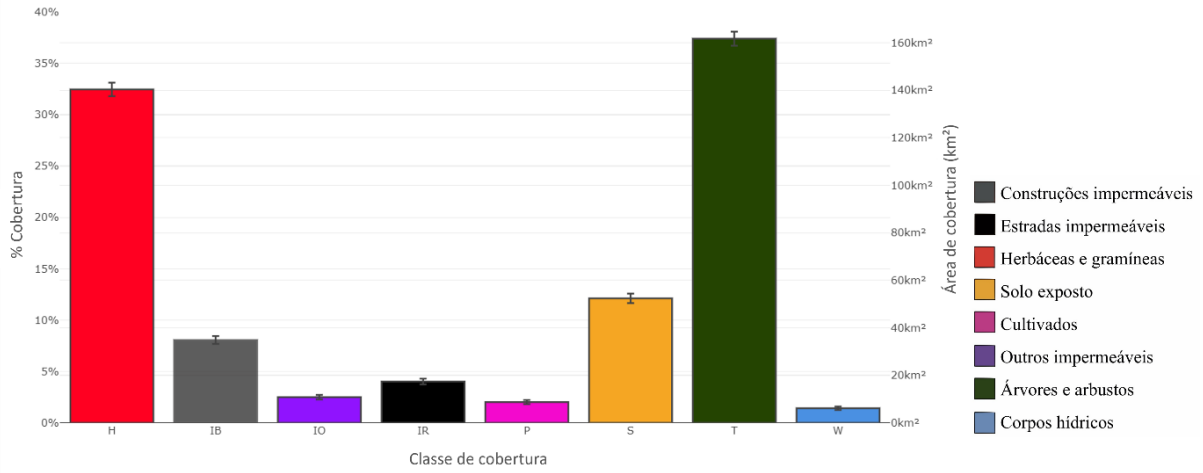
Classe de Cobertura	Área Urbana		Área Periurbana	
	Área (km ² ±EP)	Porcentagem da área total (%±EP)	Área (km ² ±EP)	Porcentagem da área total (%±EP)
Herbáceas e Gramíneas (H)	140,34km ² ±2,86	32,46%±0,66	460,57km ² ±7,13	45,50%±0,70
Construções Impermeáveis (IB)	34,85km ² ±1,66	8,06%±0,38	3,04km ² ±0,78	0,30%±0,08
Outros Impermeáveis (IO)	10,81km ² ±0,95	2,5%±0,22	1,82km ² ±0,61	0,18%±0,06
Estradas Impermeáveis (IR)	17,38km ² ±1,20	4,02%±0,28	8,30km ² ±1,29	0,82%±0,13
Cultivados (P)	8,73km ² ±0,86	2,02%±0,2	8,71km ² ±1,32	0,86%±0,13
Solo Exposto (S)	52,40km ² ±2,00	12,12%±0,46	42,51km ² ±2,87	4,20%±0,28
Árvores e Arbustos (T)	161,69km ² ±2,96	37,4%±0,68	479,60km ² ±7,15	47,38%±0,71
Corpos Hídricos (W)	6,14km ² ±0,72	1,42%±0,17	7,69km ² ±1,24	0,76%±0,12

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Source: Prepared by the author (2023).

Figura 3 – Porcentagem da área total e área (km²) das diferentes classes de cobertura do solo na região urbana de Juiz de Fora.

Figure 3 – Percentage of total area and area (km²) of different land cover classes in the urban region of Juiz de Fora.

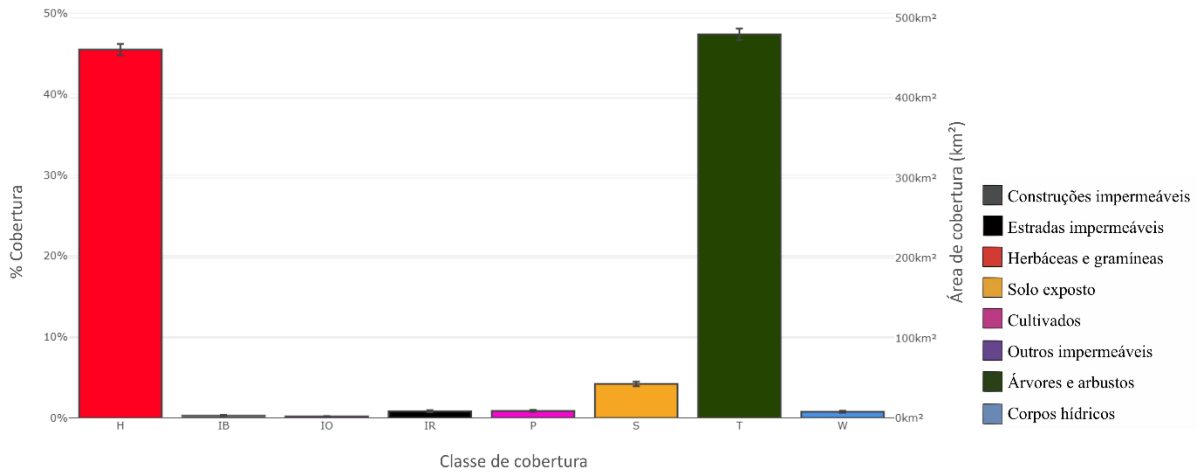


Fonte: i-Tree Canopy

Source: i-Tree Canopy

Figura 4 – Porcentagem da área total e área (km²) das diferentes classes de cobertura do solo na região periurbana de Juiz de Fora.

Figure 4 – Percentage of total area and area (km²) of different land cover classes in the peri-urban region of Juiz de Fora.



Fonte: i-Tree Canopy

Source: i-Tree Canopy

Na área urbana foram estimadas 60,15kt em carbono sequestrado anualmente e 1.242,58kt em carbono estocado, além do sequestro anual de dióxido de carbono equivalente e o dióxido de carbono equivalente armazenado (CO₂ Equiv.). Já para a área periurbana, os valores foram de 171,50kt em carbono sequestrado anualmente e 3.685,67kt em carbono estocado (Tabela 2).

No aspecto monetário, segundo o mercado de créditos de carbono da bolsa de valores, foram conferidos os valores de US\$ 20.990.184.60,00 em dióxido de carbono equivalente sequestrado anualmente e de US\$ 433.616.004,00 em dióxido de carbono equivalente estocado, aproximadamente, na área urbana (Tabela 3).

Para a região periurbana foram conferidos os valores de US\$ 59.846.057,00 em dióxido de carbono equivalente sequestrado anualmente e de US\$ 1.286.165.828,64 em dióxido de carbono equivalente estocado (Tabela 2).

Tabela 2 – Estimativas de sequestro e estoque de carbono pelas árvores nas áreas urbana e periurbana de Juiz de Fora e seus respectivos valores em dólar no mercado de crédito de carbono.

Table 2- Estimates of carbon sequestration and storage by trees in urban and peri-urban areas of Juiz de Fora and their respective dollar values in the carbon credit market.

	Área Urbana		±	Área Periurbana	
	Sequestrado	Estocado		Sequestrado	Estocado
Carbono (kt ± Erro Padrão)	60,15kt ± 1,10	1.242,58kt 22,73		171,50 ± 2,56	3.685,67 ± 54,93
CO ₂ Equivalente (kt ± Erro Padrão)	220,55kt ± 4,04	4.556,13kt 83,36		628,82 ± 9,37	13.514,12 ± 201,41
Valor (US\$ ± Erro Padrão)	20.990.184,60 384.494,88	± 433.616.004,00 7.933.537,92	±	59.846.057,00 ± 891.761,64	1.286.165.828,64 ± 19.168.592,52

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Source: Prepared by the author (2023).

Quanto ao sequestro anual dos demais poluentes atmosféricos pelas árvores para a área urbana as estimativas foram de 26,10t de monóxido de carbono (CO) e 100,73t de dióxido de nitrogênio (NO₂). Para a área periurbana os valores foram de 67,94t de monóxido de carbono (CO) e 285,34t de dióxido de nitrogênio (NO₂) além do ozônio, dióxido de enxofre e dos materiais particulados apresentados na Tabela 3.

Ao analisar a tabela abaixo, observa-se que a área periurbana apresenta um sequestro consideravelmente maior para todos os poluentes analisados em comparação à área urbana. O ozônio (O₃) é o poluente mais removido, com um total estimado de 2.876,15 toneladas na área periurbana, contra 966,28 toneladas na área urbana. Outros poluentes também seguem essa tendência, como o NO₂, cuja remoção na área periurbana (285,34 t) é quase três vezes maior que na área urbana (100,73 t).

Tabela 3 – Estimativas de sequestro de poluentes atmosféricos pelas árvores nas regiões urbana e periurbana de Juiz de Fora (CO – monóxido de carbono; NO₂ – dióxido de nitrogênio; O₃ – ozônio; SO₂ – dióxido de enxofre; PM_{2,5} – material particulado menor que 2,5 micrômetros; PM₁₀ – material particulado entre 2,5 e 10 micrômetros).

Table 3- Estimates of atmospheric pollutant sequestration by trees in the urban and peri-urban regions of Juiz de Fora (CO – carbon monoxide; NO₂ – nitrogen dioxide; O₃ – ozone; SO₂ – sulfur dioxide; PM_{2.5} – particulate matter smaller than 2.5 micrometers; PM₁₀ – particulate matter between 2.5 and 10 micrometers).

Poluente Atmosférico	Quantidade (t ± Erro Padrão)	
	Área Urbana	Área Periurbana
CO	26,10 ± 0,48	67,94t ± 1,01
NO ₂	100,73 ± 1,84	285,34t ± 4,25
O ₃	966,28 ± 17,68	2.876,15t ± 42,87
SO ₂	54,73 ± 1,00	179,95t ± 2,68
PM _{2,5}	51,07 ± 0,93	155,71t ± 2,32
PM ₁₀	268,29 ± 4,91	891,18t ± 13,28

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Source: Prepared by the author (2023).

4. Discussão

Os resultados apontam para um importante serviço de sequestro e estoque de poluentes atmosféricos pelas florestas urbanas e periurbanas de Juiz de Fora. As classes de cobertura do solo dominantes nessas áreas foram os referentes à vegetação (herbáceas e árvores), um padrão que merece destaque se tratando de um município com mais de 500.000 habitantes (IBGE, 2021). A classe de “árvores e arbustos” (T), que tem maior relevância em termos de sequestro e estoque de carbono e demais gases estufa e poluentes, apresentou altas porcentagens, sendo de 37,4% na área urbana e 47,38% na área periurbana, o que deve ser objeto de atenção quanto ao potencial de serviços ecossistêmicos que as árvores representam nessa área de estudo.

Em uma pesquisa recente que se utilizou do *i-Tree* para a estimativa de serviços ecossistêmicos da vegetação do município de Tbilisi (Geórgia, Europa Oriental) foi observado um padrão diferente no que tange a cobertura de solo, sendo a classe de “árvores e arbustos” correspondente a apenas 28% da área total (Alpaidze & Salukvadze, 2023). Assim, é possível traçar um comparativo e observar a singularidade de Juiz de Fora, que apresentou uma vasta extensão total de florestas nos ambientes urbano e periurbano.

Sabe-se que a cobertura de solo por vegetação é um fator chave na regulação climática, tendo significativo papel das árvores no sequestro de carbono atmosférico (Köhl et al., 2015). Essa questão se torna ainda mais representativa se tratando de áreas próximas às cidades, onde a ação antrópica é potencializada. Dessa forma, uma expressiva cobertura do solo por vegetação, responsável pelo sequestro de aproximadamente 850 quilotoneladas de dióxido de carbono equivalente por ano, como foi observado em Juiz de Fora, é capaz de auxiliar na mitigação de fenômenos climáticos nocivos ligados ao ambiente urbanizado, como as ilhas de calor nas cidades (Yang et al., 2022).

Acompanhados da questão climática, outros serviços providos pelas florestas requerem destaque em sua abordagem. As plantas ocupam um papel determinante no ciclo hidrológico, exercendo influência direta nos padrões de precipitação, através da evapotranspiração (Asbjornsen et al., 2011), e atuando na redução do escoamento superficial e de processos erosivos (Andrade et al., 2020). Assim, a significativa cobertura vegetal – tanto de “gramíneas e herbáceas” (H), quanto de “árvores e arbustos” (T) – do município de Juiz de Fora torna-se um importante aliado na manutenção das relações ec hidrológicas das áreas urbana e periurbana e,

consequentemente, contribui para o próprio potencial de sequestro de carbono e controle climático promovido pelas árvores.

Ademais, questões que envolvem a qualidade do ar e suas implicações na saúde pública também ganham destaque. No presente estudo, os poluentes tidos como sequestrados pelas árvores apresentam valores representativos quanto ao sequestro do carbono, que é, de fato, realizado ativamente pela cobertura florestal. Dito isto, o crescente aumento de material particulado já foi advertido pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (WHO, 2016), e há comprovação de que o PM₁₀ apresenta efeitos negativos na saúde humana (Anjos et al., 2018). Guttikunda & Goel (2013) indicaram que, devido ao menor tamanho e consequente maior facilidade em adentrar o organismo, o PM_{2,5} representa ainda maior ameaça à saúde cardiorrespiratória. Dessa forma, as florestas urbanas e periurbanas de Juiz de Fora apresentam um grande potencial na manutenção da qualidade do ar e nos serviços à saúde ao observarmos as quantidades de material particulado removido através da compensação pelo sequestro de carbono pelas árvores anualmente em Juiz de Fora – cerca de 1,36 quilotoneladas (sempre considerando a soma dos valores das áreas urbana e periurbana).

Em relação às diferenças entre a região urbana e periurbana do município, foi possível observar que os parâmetros dos valores de sequestro e estoque de carbono e suas implicações na remoção dos demais poluentes foram superiores na região periurbana. Tal fato pode estar relacionado à maior área da região, mas também pode chamar atenção para o uso do solo na porção periurbana, que dispõe de maiores áreas florestadas. No entanto, observou-se uma significativa porcentagem de área tomada por “herbáceas e gramíneas” na região periurbana (45,50%), que pode ser explicada pela presença de atividades econômicas, como a pecuária, configurando áreas de pastagem.

Outro fator que chama a atenção é a porcentagem de solo exposto ser consideravelmente maior na área urbana (cerca de 12,12%) quando comparado a periurbana (cerca de 4,20%). Possivelmente, estes valores estão relacionados com a grande expansão imobiliária que a cidade está sofrendo, através de construções de condomínios de luxo e áreas extremamente degradadas, principalmente em encostas de morros ou áreas íngremes.

Essa constatação pode ser interessante do ponto de vista do crédito de carbono. Há um potencial maior de crédito no ambiente urbano, devido à maior área de solo passível de ser plantado e gerar crédito de carbono, segundo a abordagem do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (Mudrovitsch et al., 2018). Por outro lado, há um ambiente periurbano em que os serviços ecossistêmicos providos pelas florestas, em termos quantitativos e qualitativos, se destacam, devido a uma cobertura de solo de cerca de 47,38% de árvores e arbustos e apenas 4,20% de solo exposto. Além disso, o município lida com perspectivas otimistas na geração de crédito, apresentando uma região urbana com uma porção considerável de solo disponível para o plantio e uma área periurbana com um alto percentual de cobertura vegetal responsável por grande parte da regulação da temperatura, remoção de carbono e demais serviços.

Segundo os cálculos de equivalência monetária do carbono sequestrado e estocado anualmente, segundo o Mercado de Crédito de Carbono da bolsa de valores de Londres, os valores expressivos de aproximadamente 80 milhões de dólares em carbono sequestrado anualmente e 1,7 bilhão de dólares em carbono estocado exigem atenção. Observou-se equivalentes monetárias expressivamente maiores na área periurbana, com aproximadamente 60 milhões de dólares em carbono equivalente sequestrado anualmente e 1,3 bilhão de dólares em carbono estocado. Tais valores se devem à maior cobertura florestal da região comparada a área urbana. No entanto, uma área urbana com uma cobertura florestal que representa 37,4% da região pode ter sido responsável por uma também expressiva taxa de sequestro de poluentes e de estoque de carbono na área urbana de Juiz de Fora.

Costemalle e colaboradores (2023) utilizaram uma metodologia similar à do presente trabalho para estimar os valores monetários do sequestro e estoque de carbono na área urbana e periurbana de Juiz de Fora. Entretanto, observou-se uma discrepância significativa entre os valores calculados nos dois estudos, refletindo a volatilidade do mercado de crédito de carbono e a necessidade de regulamentação mais robusta. O estudo anterior estimou um sequestro anual de carbono equivalente a cerca de 31 milhões de dólares e um estoque de 771 milhões de dólares. Já o presente estudo, utilizando dados mais recentes encontrou um sequestro anual avaliado em aproximadamente 20 milhões de dólares e um estoque de cerca de 433 milhões de dólares. A diferença entre os valores pode ser explicada por diversos fatores, incluindo a flutuação dos preços do carbono

no mercado internacional. Além disso, o estudo de Costemalle e colaboradores (2023) analisou a vegetação urbana e periurbana como um todo, realizando uma análise em conjunto. Já a metodologia do presente trabalho realizou uma análise para a área urbana e outra para a periurbana. Além disso, a área de cobertura florestal e a taxa de crescimento da vegetação também podem ter impactado os cálculos, uma vez que o estoque e o sequestro de carbono são diretamente influenciados pela dinâmica florestal local.

No caso de Tbilisi, observou-se que as árvores do município europeu representaram cerca de 8 milhões de dólares em carbono sequestrado anualmente e 206 milhões de dólares em carbono estocado (Alpaidze & Salukvadze, 2023), equivalentes monetárias menores quando comparadas às de Juiz de Fora. Os valores encontrados no presente trabalho, ainda que não correspondam à realidade exata dos valores devido à ausência de regulação, podem significar um potencial do município mineiro no mercado de crédito de carbono, incentivando a produção científica com ênfase nessa pauta e chamando a atenção para a preservação das florestas do município.

É importante destacar que os valores estimados neste estudo são relativos e não absolutos, pois derivam de modelos baseados em geoprocessamento, os quais fornecem aproximações próximas à realidade, mas não medições exatas. A ausência de uma regulamentação consolidada do mercado de crédito de carbono no Brasil contribui para incertezas nas estimativas, tornando essencial a adoção de parâmetros padronizados. Ainda assim, reforça-se que os resultados indicam um potencial significativo para o município de Juiz de Fora no mercado de crédito de carbono.

5. Conclusão

Há uma importante cobertura florestal do município de Juiz de Fora, Minas Gerais, com destaque para a região periurbana, que apresentou todos os parâmetros maiores do que a região urbana. Dessa forma, o presente estudo pode representar um avanço no que tange o conhecimento de serviços ecossistêmicos providos por florestas urbanas e periurbanas. Também com relação à cobertura de solo, evidenciou-se uma alta porcentagem de herbáceas e gramíneas na área periurbana, o que deve ser objeto de atenção do governo municipal a respeito da predominância e sustentabilidade de atividades econômicas do município.

Quanto ao sequestro e estoque de poluentes, Juiz de Fora merece destaque em seus valores. As quantidades de carbono sequestrado e estocado foram superiores às constatadas em estudos em Tbilisi, Geórgia, em que foi utilizada uma metodologia semelhante. Assim, tais valores corresponderam a notáveis equivalentes monetárias, porém, ainda que não correspondam à realidade dos valores devido à falta de legislação e regulamentação do mercado no Brasil, se destacam pelo potencial de geração de crédito de carbono da região, segundo o MDL. Além disso, os valores de sequestro e estoque de carbono observados fazem alusão aos diversos serviços ecossistêmicos providos pelas florestas do município, como a regulação climática, manutenção das relações eco hidrológicas e da qualidade do ar.

Diante disso, o estudo cumpre com a função de salientar, através de resultados quantitativos e suas respectivas implicações qualitativas, a necessidade do investimento público em iniciativas de conservação e restauração ecológica da cobertura vegetal do município de Juiz de Fora, através de políticas ambientais que objetivem a reestruturação vegetal, estendendo-se a outros municípios brasileiros. Outrossim, é também um impacto desejável a movimentação de discussões acerca das competências do país dentro do mercado de crédito de carbono, o incentivo a regulamentação e a elaboração da legislação desse mercado no Brasil e estudos posteriores que tenham como foco as aplicabilidades econômicas e ambientais da vegetação urbana e periurbana no país, bem como ações práticas que explorem tais potencialidades.

6. Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio de bolsa de Iniciação Científica concedida à J.G. Cruz. junto ao Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Juiz de Fora. H.M. Nunes Candido e T.C. Freitas agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de Doutorado. F.A. Carvalho agradece ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa. Todos os autores agradecem ao Programa de Biodiversidade

e Conservação da Natureza da UFJF pelo apoio logístico e de infraestrutura.

7. Referências

- Akbari, M., Zahmatkesh, H., & Eftekhari, M. (2021). A GIS-Based System for Real-Time Air Pollution Monitoring and Alerting Based on OGC Sensors Web Enablement Standards. *Pollution*, 7(1), 25-41. <https://doi.org/10.22059/poll.2020.296938.741>.
- Alpaidze, L., & Salukvadze, J. (2023). Green in the City: Estimating the Ecosystem Services Provided by Urban and Peri-Urban Forests of Tbilisi Municipality, Georgia. *Forests*, 14(1), 121.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, 22(6), 711-728.
- Alves, R. S., de Oliveira, L. A., & de Lavor Lopes, P. (2013). CRÉDITO DE CARBONO: O mercado de crédito de carbono no Brasil. *X Simpósio Excel. em Gestão e Tecnol.*
- Alvey, A. A. (2006). Promoting and preserving biodiversity in the urban forest. *Urban forestry & Urban Greening*, 5(4), 195-201.
- Andrade, E. M., Guerreiro, M. J. S., Palácio, H. A. Q., & Campos, D. A. (2020). Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. *Journal of Hydrology: regional studies*, 27, 100649.
- Anjos, M., Lopes, A., & Alves, E. (2018). Uso dos modelos CAL3QHC e I-Tree Canopy na avaliação da qualidade do ar em Aracaju: estimativas das concentrações de PM10 nas vias de tráfego intenso de automóveis. *GEOSP Espaço e Tempo (Online)*, 22(3), 707-728.
- Asbjornsen, H., Goldsmith, G. R., Alvarado-Barrientos, M. S., Rebel, K., Van Osch, F. P., Rietkerk, M., ... & Dawson, T. E. (2011). Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: a review. *Journal of Plant Ecology*, 4(1-2), 3-22.
- Baines, O., Wilkes, P., & Disney, M. (2020). Quantifying urban forest structure with open-access remote sensing data sets. *Urban Forestry & Urban Greening*, 50, 126653.
- Bittencourt, S. R. M. D., Busch, S. E., & Cruz, M. R. D. (2018). O mecanismo de desenvolvimento limpo no Brasil. In Frangetto, F. W. O., Veiga, A. P. B. O., & Luedemann, G. O. (Eds.) *Legado do MDL: impactos e lições aprendidas a partir da implementação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Brasil como subsídios para novos mecanismos*. (p. 43-58). Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada: Brasília.
- Bonilla-Bedoya, S., Mora, A., Vaca, A., Estrella, A., & Herrera, M. Á. (2020). Modelling the relationship between urban expansion processes and urban forest characteristics: An application to the Metropolitan District of Quito. *Computers, Environment and Urban Systems*, 79, 101420.
- Borges, E. R., Dexter, K. G., Bueno, M. L., Pontara, V., & Carvalho, F. A. (2020). The evolutionary diversity of urban forests depends on their land-use history. *Urban Ecosystems*, 23, 631-643.
- CESAMA. *Hidrografia em Juiz de Fora*. Companhia de Saneamento Municipal, Juiz de Fora, 02, Dez, 2020. <https://www.cesama.com.br/pesquisaescolar/hidrografia-em-juiz-de-fora>.
- Chen, B. (2020). Urbanization and Decline of Old Growth Windbreak Trees on Private Homesteads: A Case Study in Ryukyu Island Villages, Japan. *Forests*, 11(9), 990.
- Costemalle, V. B., Candido, H. M. N., & Carvalho, F. A. (2022). An estimation of ecosystem services provided by urban and peri-urban forests: a case study in Juiz de Fora, Brazil. *Ciência Rural*, 53, e20210208.

- da Silveira, C. S., & de Oliveira, L. (2021). Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. *Novos Cadernos NAEA*, 24(3).
- Endreny, T., Santagata, R., Perna, A., De Stefano, C., Rallo, R. F., & Ulgiati, S. (2017). Implementing and managing urban forests: A much needed conservation strategy to increase ecosystem services and urban wellbeing. *Ecological Modelling*, 360, 328-335.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2016) *Guidelines on urban and peri-urban forestry - FAO Forestry Paper* (vol. 178). Rome: Food and Agriculture organization of the United Nations,
- Guttikunda, S. K., & Goel, R. (2013). Health impacts of particulate pollution in a megacity—Delhi, India. *Environmental Development* 6, 8–20.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2021). *Cidades e Estados do Brasil - Minas Gerais - Juiz de Fora*. Recuperado em 18 de maio de 2023, de <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/juiz-de-fora.html>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2012). *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. Rio de Janeiro: IBGE. Recuperado em 13 de março de 2023, de <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=263011>.
- IPBES (2019). *Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, Brondízio, E. S., Settele, J., Díaz, S., Ngo, H. T. (eds). IPBES secretariat, Bonn, Germany, ISBN: 978-3-947851-20-1
- i-Tree-Canopy. *i-Tree Software Suite v 7.1*. (2021). <https://www.itreetools.org/>. Recuperado em 2 de fevereiro de 2023, de <https://canopy.itreetools.org/>.
- Köhl, M., Lasco, R., Cifuentes, M., Jonsson, Ö., Korhonen, K. T., Mundhenk, P., ... & Stinson, G. (2015). Changes in forest production, biomass and carbon: Results from the 2015 UN FAO Global Forest Resource Assessment. *Forest Ecology and Management*, 352, 21-34.
- Marris, E. (2009). Ragamuffin earth: a small group of ecologists is looking beyond the pristine to study the scrubby, feral and untended. Emma Marris learns to appreciate 'novel ecosystems'. *Nature*, 460(7254), 450-454.
- McKinney, M. L. (2006). Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological Conservation*, 127(3), 247-260.
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., & Lapoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution*, 178, 229-236.
- Pyles, M. V., Magnago, L. F., Borges, E. R., van den Berg, E., & Carvalho, F. A. (2020). Land use history drives differences in functional composition and losses in functional diversity and stability of Neotropical urban forests. *Urban Forestry & Urban Greening*, 49, 126608.
- Speak, A., Escobedo, F. J., Russo, A., & Zerbe, S. (2020). Total urban tree carbon storage and waste management emissions estimated using a combination of LiDAR, field measurements and an end-of-life wood approach. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120420.
- Tahri, M., Kaspar, J., Vacik, H., & Marusak, R. (2021). Multi-attribute decision making and geographic information systems: Potential tools for evaluating forest ecosystem services. *Annals of Forest Science*, 78(2), 1-19.
- Tan, X., Hirabayashi, S., & Shibata, S. (2021). Estimation of ecosystem services provided by street trees in

Kyoto, Japan. *Forests*, 12(3), 311.

TEEB (2010). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB*. Recuperado em 1º de março de 2025, de <https://www.teebweb.org/wp-content/uploads/Study%20and%20Reports/Reports/Synthesis%20report/TEEB%20Synthesis%20Report%202010.pdf>

United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC (2008). *Kyoto protocol reference manual on accounting of emissions and assigned amount*. Climate Change Secretariat: UNFCCC.

World Health Organization – WHO (2016). *WHO's Urban Ambient Air Pollution database - Update 2016, v.0.2*. World Health Organization: Switzerland. Recuperado em 18 de maio de 2023, de https://cdn.who.int/media/docs/default-source/air-quality-database/aqd-2016/aap_database_summary_results_2016_v02.pdf?sfvrsn=384beb23_3

Yang, Y., Song, F., Ma, J., Wei, Z., Song, L., & Cao, W. (2022). Spatial and temporal variation of heat islands in the main urban area of Zhengzhou under the two-way influence of urbanization and urban forestry. *PLOS one*, 17(8), e0272626.

Yilma, G., & Derero, A. (2020). Carbon stock and woody species diversity patterns in church forests along church age gradient in Addis Ababa, Ethiopia. *Urban Ecosystems*, 23(5), 971-983.

Zappi, D. C., Filardi, F. L. R., Leitman, P., Souza, V. C., Walter, B. M., Pirani, J. R., ... & Gomes-Klein, V. L. (2015). Growing knowledge: an overview of seed plant diversity in Brazil. *Rodriguésia*, 66, 1085-1113.