

Fluxos de serviços ecossistêmicos e redes complexas: uma proposta

Eliane Gonçalves Gomes

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico 1024, Jardim Botânico, 22460-000, Rio de Janeiro – RJ

eliane.gomes@embrapa.br

Daniel Marques de Abreu

Mestrando em Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Rua São Francisco Xavier 524, RJ, Brasil

daniel.abreu1501@gmail.com

Vitoria Ramos de Oliveira Moraes

Graduanda em Geografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Rua São Francisco Xavier, 524, RJ, Brasil

vitoriaramos.uerj@gmail.com

Ana Paula Dias Turetta

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico 1024, Jardim Botânico, 22460-000, Rio de Janeiro – RJ

ana.turetta@embrapa.br

RESUMO

Serviços ecossistêmicos (SEs) são os benefícios obtidos dos ecossistemas, essenciais para o desenvolvimento sustentável. O movimento e a interação dos SEs entre os ecossistemas e as sociedades humanas em determinada região podem ser modelados como fluxos em redes complexas. Neste artigo é estudado o fluxo do SE de regulação hídrica em municípios da região serrana do estado do Rio de Janeiro. Tal região é a maior produtora de alimentos frescos do Estado e tem alta vulnerabilidade a desastres climáticos. Para este estudo, propõe-se avaliar o fluxo deste SE por meio de métricas de centralidade em redes complexas, que permitem identificar as bacias mais relevantes nestes municípios. A avaliação de fluxos de SEs pode subsidiar a criação de políticas públicas e a tomada de decisão sobre o uso da terra, em especial em áreas propensas a eventos climáticos extremos.

PALAVRAS CHAVE. Regulação hídrica. Redes complexas. Centralidade.

Tópico: AG&MA – PO na Agricultura, Meio Ambiente e Sustentabilidade

ABSTRACT

Ecosystem services (ES) are the benefits that people obtain from ecosystems, which are essential for sustainable development. The movement and interaction of ES between ecosystems and human societies in a region can be modeled as flows in complex networks. In this paper we study the flow of water regulation ES in municipalities in the mountainous region of the state of Rio de Janeiro. This region is the largest producer of fresh food in the state and is highly vulnerable to climate disasters. We evaluate the flow of this ES using centrality metrics in complex networks, which allow identifying the most relevant basins in these municipalities. Evaluating SE flows can support public policies and decision-making on land use, especially in areas prone to extreme weather events.

KEYWORDS. Water regulation. Complex networks. Centrality.

Paper topics: AG&MA – OR in Agriculture, Environment and Sustainability

1. Introdução

O desafio posto pelo aumento da demanda por alimentos e decorrente pressão sobre os sistemas agrícolas é amplificado pelas mudanças climáticas. Eventos extremos, como ondas de calor, secas e chuvas intensas, afetam a produção agrícola e, consequentemente, a disponibilidade de alimentos e a segurança alimentar. Práticas agrícolas não sustentáveis ocasionam degradação do solo, perda de biodiversidade e contaminação da água, o que compromete a capacidade dos ecossistemas de fornecerem esses serviços essenciais.

Serviços ecossistêmicos (SEs) são definidos como os benefícios que os ecossistemas fornecem à sociedade humana, essenciais para sustentar a vida e melhorar o bem-estar [Millennium Ecosystem Assessment, 2005]. Com o papel crescente que as mudanças climáticas tendem a exercer sobre os ecossistemas, o estudo dos SEs desloca-se da contabilização de valores para a resposta espacial e temporal relacionada aos padrões da paisagem, e passa a incorporar sinergias e compensações entre SEs e os sistemas sociais e econômicos [Xia e Zhang, 2024]. Compreender e medir os fluxos de SEs pode revelar diferenças multifacetadas ou desencontros entre os pontos de oferta e de demanda desses serviços [Serna-Chavez et al., 2014; Felipe-Lucia et al., 2015; Vergara et al., 2021], o que é relevante para o planejamento de uso da terra como estratégia para adaptação aos impactos das mudanças climáticas.

Propõe-se aqui a modelagem do fluxo do SE de regulação hídrica em três municípios da região serrana do estado do Rio de Janeiro. Tal região é a principal produtora e fornecedora de alimentos frescos do Estado e é altamente vulnerável a desastres causados por eventos climáticos extremos, especialmente processos hidrogeomorfológicos, como inundações e deslizamentos. A unidade de observação em cada município é a bacia hidrográfica. Para quantificar a relevância de cada bacia foi usada uma métrica de centralidade em redes complexas.

2. Material e método

A área de estudo abrange os municípios de Nova Friburgo, Petrópolis e Teresópolis, localizados na região serrana do estado do Rio de Janeiro. Estes municípios são alguns dos principais produtores e fornecedores de alimentos frescos do Estado e abastecem, em grande parte, a região metropolitana. Localizada no bioma Mata Atlântica e com topografia montanhosa, a região serrana é muito vulnerável a eventos climáticos extremos. Dada a intensificação e a frequência dessas ocorrências nessa região, são exigidas medidas de adaptação e de mitigação de impactos.

O estudo dos fluxos de SEs [Serna et al., 2014; Felipe-Lucia et al., 2015; Li e Wang, 2022; Wang et al., 2023] pode apoiar o entendimento do processo de produção (geração de SEs a partir de processos naturais), entrega (transferência desses SEs para usuários) e utilização desses serviços (uso real dos SEs pelos indivíduos ou comunidades). Apesar da importância, Li e Wang (2022) afirmam que quantificar ou medir fluxos de SEs continua sendo um desafio da pesquisa. A proposta de Sonderegger et al. (2020) e Felipe-Lucia et al. (2022) é configurar uma rede socioecológica, na qual os SEs assumem o papel das conexões da rede. Dessa forma, entende-se aqui que a partir da designação de vértices, arestas e direções dos fluxos da rede é possível aplicar as definições de teoria de grafos e métricas clássicas de análise de redes complexas [Newman, 2003; Souza da Mata, 2020] para identificar, por exemplo, vértices mais bem conectados ou mais influentes, como os vértices se conectam pela rede, distância entre vértices, entre outros descritores da rede.

O interesse neste artigo é estudar o fluxo do SE de regulação hídrica (fornecimento de água doce e regulação de enchentes) nos três municípios já citados e indicar os vértices mais importantes. Para cada município, a rede é definida por um grafo direcionado não ponderado, no qual os vértices são as bacias hidrográficas e as arestas são definidas pela relação doador-receptor entre pares de bacias (fluxo hídrico entre bacias hidrográficas; da bacia prestadora de serviço para a bacia receptora de benefício do serviço). Tal representação oferece uma visualização mais precisa das interdependências entre as bacias. Permite identificar as bacias “fornecedoras” de maior relevância, uma vez que diferentes atividades nessas bacias podem impactar não só elas, mas todas aquelas que estão em sua “rede”. Os dados das bacias hidrográficas de nível 7 são oriundos da base de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico [Agência Nacional de Águas, 2017],

assim como os cursos hídricos utilizados para compor o sistema. A localização geográfica de cada bacia foi calculada a partir dos seus centroides, ou seja, o centro geométrico de cada bacia, calculado pelo centro médio ponderado pelas coordenadas dos vértices de um polígono. O cálculo das coordenadas pelo centroide é uma forma padronizada de localização, que facilita a aplicação em modelos computacionais que utilizam entradas pontuais ao invés de áreas

A partir do grafo, a importância de cada bacia pode ser definida por métricas de centralidade em redes complexas. Conforme Sousa da Mata (2020), a métrica a ser calculada depende do que se entende por importância de um vértice. Aqui, importância é a capacidade de uma bacia em se “relacionar” com as demais, ou seja, como seria o impacto no caso de a bacia de origem ficar inoperante e comprometer a regulação hídrica das bacias a ela conectadas e da rede como um todo. Optou-se, assim, pela métrica centralidade de intermediação (*betweenness centrality*), que expressa quantas vezes um vértice atua como uma ponte que conecta outros dois vértices da rede ao longo do caminho mais curto entre eles [Sousa da Mata, 2020]. Ou seja, expressa o quanto um vértice é capaz de atuar como intermediário entre outros vértices. A centralidade de intermediação do vértice i , $b(i)$, é dada por $b(i) = \sum_{k \neq i \neq j} \sigma(kij) / \sigma(kj)$, onde $\sigma(kj)$ é o número de caminhos mais curtos de k para j , $\sigma(kij)$ é o total desses caminhos que passam pelo vértice i .

3. Resultados e discussão

A Figura 1 traz a representação dos grafos das redes de bacias de cada município, com a localização geográfica individual. São 117 bacias em Nova Friburgo, 29 em Petrópolis e 58 em Teresópolis. Além de vértices isolados, as redes são compostas por sub-redes independentes. Nesse contexto, a centralidade de intermediação foi calculada para cada sub-rede. A Tabela 1 traz a identificação dos vértices mais relevantes em cada sub-rede, segundo a métrica escolhida.

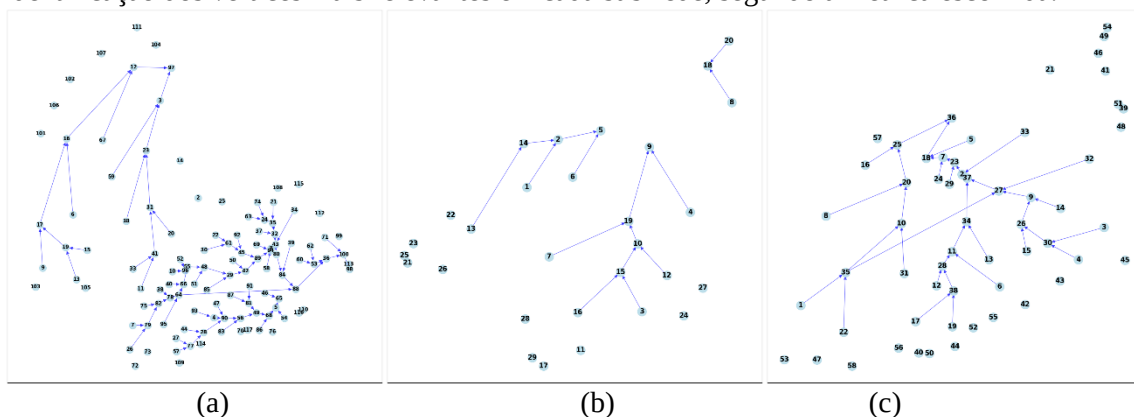


Figura 1: Redes de bacias hidrográficas de Nova Friburgo (a), Petrópolis (b) e Teresópolis.

Tabela 1: Vértices mais relevantes, segundo a centralidade de intermediação.

		Vértice	Métrica			Vértice	Métrica
Nova Friburgo	Sub-rede I	N016	0,039	Petrópolis	Sub-rede I	P002	0,150
		N017	0,039		Sub-rede II	P010	0,143
		N023	0,039			P015	0,107
		N031	0,039			P019	0,107
	Sub-rede II	N049	0,111	Teresópolis	Sub-rede I	T037	0,081
		N056	0,105			T002	0,071
		N090	0,105			T023	0,057
		N089	0,070			T027	0,050
	Sub-rede III	N080	0,067				
		N094	0,065				

A análise das redes hidrográficas por meio da métrica de centralidade contribui na identificação de pontos que se apresentam como estratégicos para fluxos de água, sedimentos e

poluentes. Uma alta centralidade de intermediação representa um ponto forte de conexão entre bacias hidrográficas, ou seja, um gargalo natural que funciona como ponto de controle de fluxos e área de grande influência para o funcionamento das bacias ao redor [Freeman, 1977].

4. Considerações finais

Apresentou-se aqui uma primeira proposta para a modelagem de fluxos de SEs por meio da análise de redes complexas. A métrica escolhida é aderente ao objeto de estudo e toma por base um grafo direcionado não ponderado. Em desenvolvimentos futuros podem ser modelados grafos ponderados, considerando-se distância entre vértices, por exemplo, e calculando-se métricas adicionais, como de distância e de caminho mínimo.

Ao identificar, modelar e quantificar os fluxos dos SEs torna-se possível propor sistemas alimentares mais resilientes e sustentáveis, capazes de enfrentar os desafios das mudanças climáticas e garantir a segurança alimentar para as futuras gerações. Esta abordagem é extremamente útil no suporte à tomada de decisões, auxiliando na elaboração de estratégias que promovam a manutenção desses SEs, especialmente em um contexto de crescente frequência de eventos climáticos extremos.

Referências

- Agência Nacional de Águas (2017). Conjunto de Dados. <https://dadosabertos.ana.gov.br/> Acessado: março 2025.
- Felipe-Lucia, M.R., Guerrero, A.M., Alexander, S.M., Ashander, J., Baggio, J.A., Barnes, M.L., Bodin, Ö., Bonn, A., Fortin, M.-J., Friedman, R.S., Gephart, J.A., Helmstedt, K.J., Keyes, A.A., Kroetz, K., Massol, F., Pocock, M.J.O., Sayles, J., Thompson, R.M., Wood, S.A. e Dee, L.E. (2022). Conceptualizing ecosystem services using social–ecological networks. *Trends in Ecology & Evolution* 37 (3):211–222.
- Felipe-Lucia, M.R., Martín-López, B., Lavorel, S., Berraquero-Díaz, L., Escalera-Reyes, J. e Comín, F.A. (2015). Ecosystem services flows: why stakeholders' power relationships matter. *PLoS One* 10(7):e0132232.
- Freeman, L.C. (1977). A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry* 40(1):35–41.
- Li, J. e Wang, Y. (2022). Ecosystem services assessment from capacity to flow: A review. *Transactions in Earth, Environment, and Sustainability* 1(1):80–93.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). Ecosystems and human well-being: synthesis. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf> Acessado: abril 2025.
- Newman, M.E.J. (2003). The structure and function of complex networks. *SIAM Review* 45:167–256.
- Serna-Chavez, H.H.M., Schulp, C.J.E., van Bodegom, P.M., Bouten, W., Verburg, P.H. e Davidson, M.D. (2014). A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators* 39:24–33.
- Sonderegger, G., Oberlack, C., Løp, J. C., Verburg, P. H. e Heinemann, A. (2020). Telecoupling visualizations through a network lens: a systematic review. *Ecology and Society* 25(4):47.
- Sousa da Mata, A. (2020). Complex Networks: a mini-review. *Brazilian Journal of Physics* 50:658–672.
- Vergara, X., Carmona, A., e Nahuelhual, L. (2021). Spatial coupling and decoupling between ecosystem services provisioning and benefiting areas: Implications to marine spatial planning. *Ocean & Coastal Management* 203:105455.
- Wang, L., Wu, T., Zheng, H., Li, R., Hu, X. e Ouyang, Z. (2023). A comprehensive framework for quantifying ecosystem service flow focusing on social-ecological processes. *Transactions in Earth, Environment, and Sustainability* 1(1):20–34.
- Xia, L. e Zhang, P. (2024). Progress in ecosystem services research. *International Journal of Social Sciences and Public Administration* 3(3):294–297.