

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ATIVAÇÃO DE RIO INTERMITENTE TRIPLICA A REDE DE DRENAGEM CONECTADA

*Ewerthon Cezar Schiavo Bernardi¹; Luiz Felipe Pereira de Brito²; Carmen Matioli-Rocha³;
Fernando Grison⁴ & Pedro Luiz Borges Chaffe⁵*

Abstract: Drainage network expands according to catchment characteristics, influencing surface water flow, and nutrients and sediment transport. However, it is still necessary to understand how topography, landscape and antecedent moisture drive intermittent streams activation. This study analyzes the influence of the activation of intermittent streams on active and connected drainage network at a small headwater subtropical catchment. The study area is a 0.16 km² hillslope sub-catchment of the Peri Lake Watershed, in Florianópolis – SC. This region is characterized by subtropical forest, with mean annual rainfall of 1,500 mm. The active drainage was mapped across 213 segments spaced by two meters along both perennial e non-perennial streams in different antecedent moisture conditions, totalizing six surveys. The active and connected drainage network were related to slope, contribution area and antecedent precipitation index. A 38% increase in activated drainage network resulted in a 272% increase in connected drainage network. In the steep intermittent segment with boulders presence, activation is controlled by both antecedent rainfall and slope. The results highlight the importance of streams intermittency in activated and connected drainage network, emphasizing the need to evaluate the temporal activation frequency.

Resumo: A rede de drenagem conectada expande em função de características da bacia e influencia no fluxo da água superficial, bem como no transporte de sedimentos e nutrientes. Entretanto ainda é preciso saber como topografia, paisagem e umidade antecedente atuam na ativação de rios intermitentes. O objetivo deste trabalho é analisar a influência da ativação de rios intermitentes na rede de drenagem ativa e conectada em uma pequena bacia subtropical de cabeceira. A área de estudo é uma sub-bacia de encosta (0,16 km²) da Bacia Hidrográfica da Lagoa do Peri, em Florianópolis – SC. Essa região é caracterizada por floresta ombrófila densa e chuva média anual de 1.500 mm. A rede de drenagem ativa foi mapeada em 213 trechos espaçados a cada dois metros ao longo dos rios perenes e intermitentes em diferentes condições de umidade antecedente, totalizando seis campanhas. As redes de drenagem ativa e conectada foram relacionadas com declividade, área de contribuição e índice de precipitação antecedente. O incremento de 38% da rede de drenagem ativa aumentou a rede de drenagem conectada em 272%. A declividade e a chuva antecedente controlam a ativação dos trechos intermitentes íngremes e com presença de matacão. Os resultados destacam a importância de considerar a intermitência de rede de drenagem ativa e conectada enfatizando a necessidade de avaliar a frequência temporal de ativação.

Palavras-Chave – Expansão longitudinal; conectividade hidrológica; rios não perenes.

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, ewerthon.bernardi@gmail.com

2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, britofelipe85@gmail.com

3) Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, carmenmatiolirocha@gmail.com

4) Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, fernando.grison@uffs.edu.br

5) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, pedro.chaffe@gmail.com

INTRODUÇÃO

Rios não perenes somam mais da metade do comprimento da rede de drenagem mundial (Raymond *et al.*, 2013) e sua ativação aumenta o comprimento a rede de drenagem ativa e conectada ao exutório da bacia. Em rios de cabeceira, a importância deste processo de ativação de rios não perenes está na determinação de áreas de preservação permanente (de Souza *et al.*, 2019), mudança no tempo de concentração da bacia hidrográfica (Meerveld *et al.*, 2019), alteração área superficial da água nos rios (Allen *et al.*, 2018), bem como no transporte de sedimentos e nutrientes (Zimmermann *et al.*, 2014).

Rios intermitentes possuem considerável conexão com a água subterrânea, apresentam ciclos sazonais de umidade e fluxo além do evento de chuva (Busch *et al.*, 2020). Estes rios são controlados por características topográficas como declividade e área de drenagem (Prancevic & Kirchner, 2019), umidade antecedente e elementos da paisagem, como presença de rochas, matacão (Ilja Van Meerveld *et al.*, 2019) e fragmentos de madeira (Wohl *et al.*, 2012). A rede de drenagem de uma bacia hidrográfica pode expandir a partir da ativação em um ciclo sazonal (Godsey & Kirchner, 2014; Noto *et al.*, 2024) ou frente a um evento de chuva (Barefoot *et al.*, 2019; Botter *et al.*, 2024).

Normalmente a ativação e conexão destes canais acontece na cabeceira do rio (Godsey & Kirchner, 2014; Kaplan *et al.*, 2022; Noto *et al.*, 2024; Zimmermann *et al.*, 2014). Entretanto, não se sabe como ocorrem as mudanças nas redes de drenagem ativa e conectada em bacias subtropicais com presença de trechos intermitentes próximos ao exutório. Além disso, é necessário mapear rios não perenes em alta escala espacial (Kaplan *et al.*, 2022) e entender como a topografia e a umidade antecedente atuam na ativação destes rios.

Assim, o objetivo deste trabalho é analisar a influência da ativação de rios intermitentes na rede de drenagem ativa e conectada em uma pequena bacia subtropical de cabeceira e como características topográficas e umidade antecedente atuam neste processo de ativação destes rios.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica da Lagoa do Peri está localizada na Região Sul da Ilha de Santa Catarina, mais precisamente no município de Florianópolis, nas coordenadas 27,73° latitude Sul e 48,52° de longitude Oeste. No período entre 1981 e 1982 foi regulamentado o Parque Municipal da Lagoa do Peri e, em 2019, que passou a ser considerado monumento natural (FLORAM, 2019).

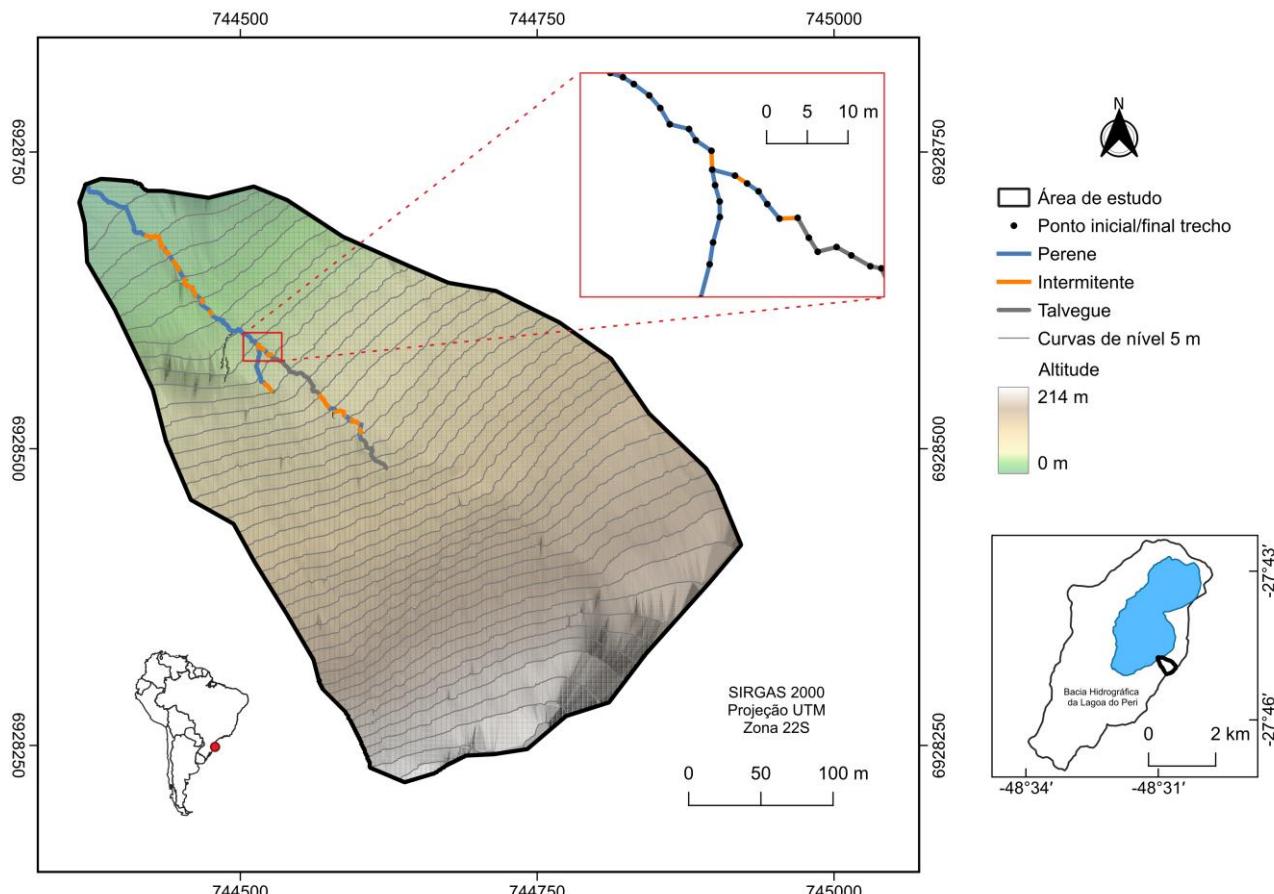
A área de estudo é uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica da Lagoa do Peri (Figura 1). Sua cobertura é predominantemente Floresta Ombrófila Densa, com altitudes variando entre 0 e 214 metros, área de contribuição de 0,16 km² e declividade média do talvegue principal de 0,16 m/m. A chuva total anual média é de aproximadamente 1.500 mm com baixa sazonalidade (Chaffe *et al.*, 2021). A geologia da bacia é Granito (UFSC, 2018) e o tipo de solo é Cambissolo Argiloso (EMBRAPA, 2004).

Monitoramento da rede de drenagem

Foi monitorada a presença ou ausência de fluxo de água em 213 trechos ao longo dos talvegues do rio principal e de seu afluente durante condições de escoamento de base e de eventos de chuva. Ao total, foram realizadas seis campanhas em campo com duração de aproximadamente 4 horas cada. Os trechos foram definidos com uma trena e apresentaram comprimento variando de 0,67 a 5,85 m,

com mediana igual a 1,96 m. O início e final de cada trecho foi demarcado e identificado com uma bandeira de plástico, de modo que todas as campanhas avaliaram os mesmos trechos.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo e detalhamento dos trechos monitorados.



As campanhas ocorreram entre o dia 18 de setembro de 2024 e 07 de fevereiro de 2025 e abrangeram vazões com probabilidade de excedência de 89% a 1%, de acordo com uma curva de permanência com dois anos de dados. Para esta curva de permanência foram utilizados dados da para curva-chave correspondem a outra sub-bacia da Bacia Hidrográfica da Lagoa do Peri com 2,04 km² de área de contribuição e localizada a 2,50 km do exutório da área de estudo. A vazão específica desta bacia hidrográfica foi utilizada para determinar a condição de umidade da bacia em cada campanha de coleta de dados.

Os dados de chuva foram obtidos de uma estação pluviométrica localizada a 2,30 km do exutório da área de estudo com resolução temporal de cinco minutos. Para obtenção do relevo detalhado, foi realizado o levantamento do perfil topográfico com a estação total Leica TCR407 considerando os pontos na metade da seção transversal inicial e final de cada trecho. Posteriormente foi calculada a declividade de cada trecho. O comprimento total da rede de drenagem mapeada, considerando rios perenes e não perenes, foi de 437,96 metros.

Análise da umidade antecedente

Para determinação da condição de umidade antecedente foi calculado o índice de precipitação antecedente (API, do inglês *Antecedent Precipitation Index*), conforme a Equação 1 proposta por Kohler & Linsley (1951).

$$API = b_1P_1 + b_2P_2 + b_3P_3 + \dots + b_iP_i \quad (1)$$

onde P_i é a precipitação ocorrida em i dias antes do evento considerado e b_i é uma constante definida por $b_i = 1/i$. Foi calculada o API de 1 a 15 dias, porém as análises foram realizadas somente com o API de 1, 2, 4 e 5 dias.

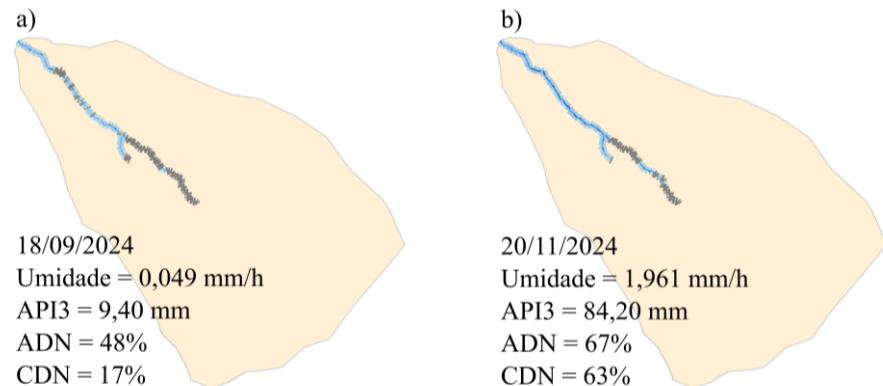
Análise da expansão longitudinal

A rede de drenagem ativa (ADN, do inglês *Active Drainage Network*) foi determinada a partir da soma dos comprimentos dos trechos ativos que apresentaram fluxo de água superficial. Já a rede de drenagem conectada (CDN, do inglês *Connected Drainage Network*) foi determinada a partir da soma dos comprimentos dos trechos ativos conectados superficialmente ao exutório da bacia hidrográfica. Por fim, foram analisadas as relações entre ADN e CDN com o API, bem como com a declividade e elementos da paisagem de cada trecho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi verificado que a rede de drenagem expande em função da umidade da bacia. A rede de drenagem foi mapeada em condições em que a razão entre umidade máxima e mínima foi igual a 40, enquanto a razão entre umidade máxima e mínima da série de dados é de 77, o que sugere que a dinâmica da rede de drenagem seja ainda maior do que mostrado na Figura 2. Na campanha durante o escoamento de base (Figura 2a) a ADN foi de 212,05 m enquanto a CDN foi igual a 74,05 m, mostrando que menos da metade de toda a rede de drenagem estava ativa (48%). Nesta campanha, apenas 17% de toda a rede de drenagem mapeada (35% de toda rede ativa) estava conectada ao exutório da bacia. O estado de umidade da bacia foi de 0,049 mm/h durante esta campanha.

Figura 2 – Mapeamento da rede de drenagem ativa no dia 18/09/2024 em condição de escoamento de base (a) e no dia 20/11/2024 durante evento de chuva (b).

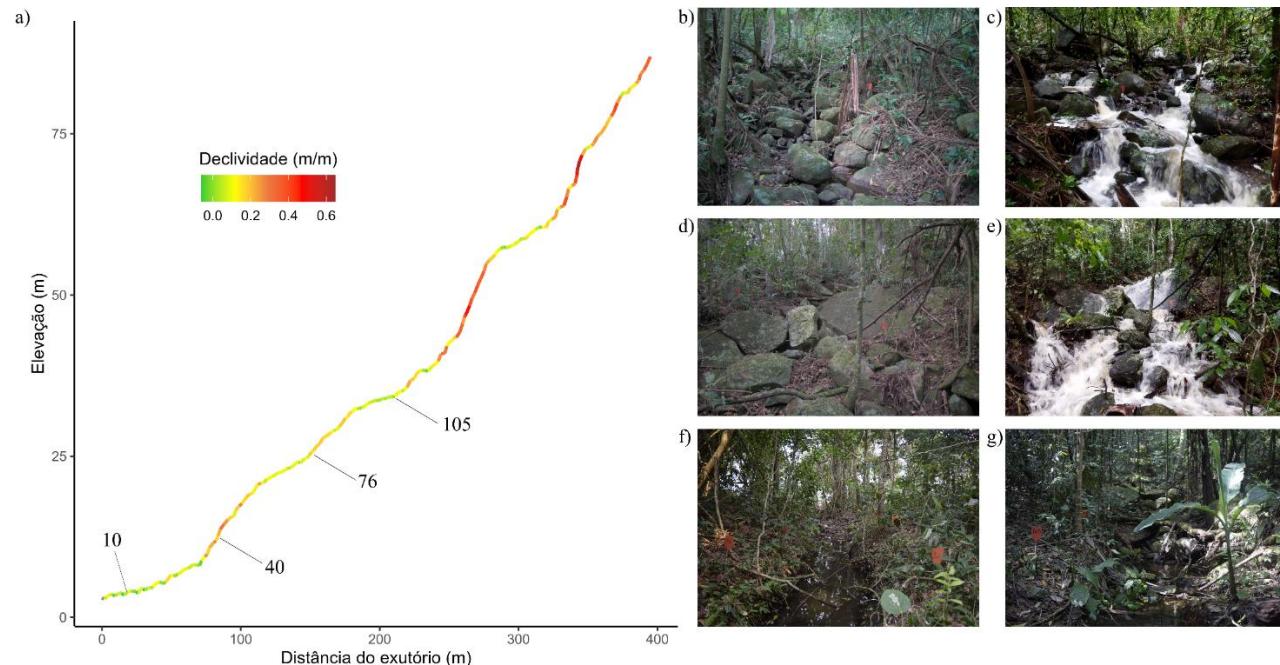


A campanha mais úmida (Figura 2b) ocorreu durante um evento de chuva e estado de umidade igual a 1,961 mm/h. Foi registrado o comprimento 292,47 m de ADN ou 67% de toda a rede de drenagem. Já a CDN foi de 275,86 m ou 63% de toda a rede de drenagem mapeada. Ainda, nesta campanha quase toda a rede de drenagem ativa estava conectada (94%), com exceção dos trechos 174 a 177 que não apresentaram conexão com o exutório em nenhuma campanha, mesmo estando ativos em todas as campanhas.

Estes trechos se mantiveram ativos por estarem situados em uma região de baixa declividade e uma área de contribuição de 0,10 km². Isto permite inferir que a rede de drenagem perene pode ocorrer mesmo em trechos distantes do exutório e à montante de trechos desativados, dependendo da área de contribuição e das características do relevo.

Entre as duas campanhas descritas, a densidade de drenagem aumentou de 1,32 km/km² para 1,83 km/km². Já a ADN aumentou 38% enquanto a CDN aumentou em quase quatro vezes (272%). Isto ocorreu em virtude de ativação de 24 trechos, somando 48,15 metros. Em cinco campanhas alguns trechos à montante da bandeira 40 não estavam conectados ao exutório da bacia. Os referidos trechos apresentam alta declividade, chegando até 0,31 m/m e presença de fragmentos de rochas e matacão, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Perfil topográfico do canal principal e fotografias dos trechos monitorados. Perfil longitudinal do talvegue principal e declividade de cada trecho (a). Trecho 76 de jusante para montante em 18/09/2024 (b) e 20/11/2024 (c). Trecho 40 de jusante para montante em 18/09/2024 (d) e em 20/11/2024 (e). Trecho 10 de montante para jusante em 10/10/2024 (f). Trecho 105 de jusante para montante em 18/09/2024 (g).



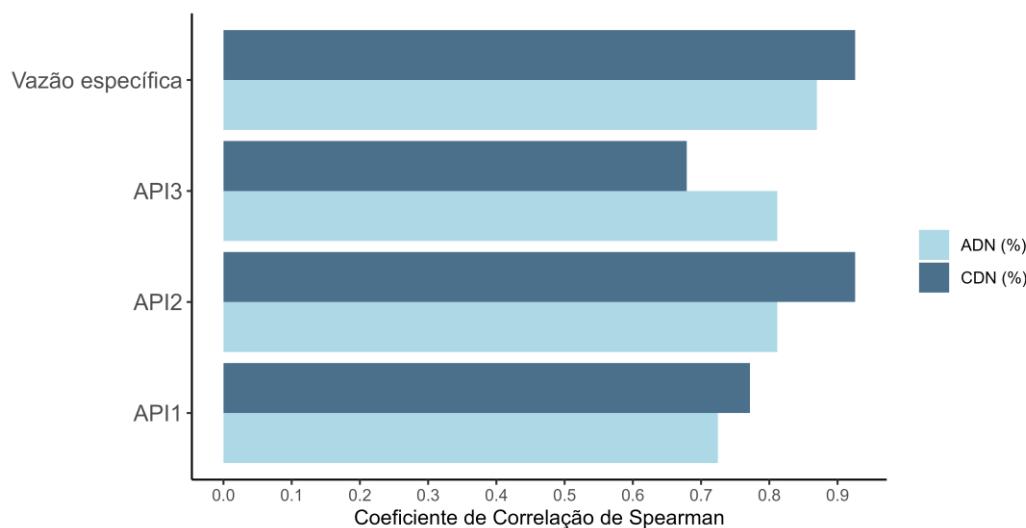
Estas características da paisagem implicam na ativação e desativação dos trechos, uma vez que a presença de matacão aumenta a transmissividade do solo e, consequentemente, as perdas por infiltração aumentam (Meerveld *et al.*, 2019; Perez *et al.*, 2020), o que gera a desativação dos canais e trechos mais íngremes desativam com o rebaixamento natural do nível da água subterrânea.

Por outro lado, durante eventos de chuva com alta umidade antecedente da bacia, pode ocorrer a elevação do nível da água subterrânea e o aumento da zona hiporréica do trecho, acarretando na ativação dos canais (Tromp-Van Meerveld & McDonnell, 2006). Nesse caso, trechos mais íngremes

podem ser ativados em função a elevação da água subterrânea. Após os trechos intermitentes com presença de matação há redução da declividade ($< 0,10 \text{ m/m}$) e existem trechos perenes. Neste sentido pode-se entender que estas características da paisagem atuam como fontes (à jusante) e sumidouros (à montante) do fluxo superficial.

A umidade antecedente, representada pelo API de dois dias apresentou maior correlação com o aumento da ADN e da CDN (0,74 e 0,88, respectivamente). Além disso, a CDN reduz mais do que a ADN à medida que o tempo entre o final do último evento e a campanha aumenta. Estes resultados indicam que a umidade antecedente da bacia tem maior controle sobre a dinâmica da rede de drenagem, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Correlação da ADN e CDN com a vazão específica e API de 1, 2 e 3 dias.



Neste sentido, entende-se que a ativação de canais intermitentes pode afetar drasticamente o comprimento de drenagem conectada ao exutório e que a expansão longitudinal da rede de drenagem não ocorre somente em trechos de cabeceira, mas trechos próximos ao exutório da bacia. Contudo, esta dinâmica da rede de drenagem pode não ser observada sem trabalhos de monitoramento em campo. De acordo com Martin *et al.* (2021), os trabalhos de campo são a maneira mais confiável de identificar a rede de drenagem ativa em pequenas bacias de cabeceira.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi mapeada a rede de drenagem ativa em uma bacia subtropical de encosta em diferentes condições de escoamento. Pode-se concluir que a rede de drenagem ativa e conectada expandiu com o aumento da umidade da bacia. A ativação de canais intermitentes gera o aumento da rede de drenagem conectada em quase quatro vezes. As características da paisagem como declividade, área de contribuição e presença matação também controlam a ativação destes canais, sobretudo quando aumentam a transmissividade de água no solo. O trabalho destaca a importância em considerar a intermitência de canais na dinâmica da rede de drenagem na determinação da rede ativa e conectada ao exutório para o entendimento da geração de escoamento em bacias de cabeceira

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), bem como à Fundação Municipal do Meio Ambiente de Florianópolis (FLORAM) pelo apoio em atividades de campo.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, G. H.; PAVELSKY, T. M.; BAREFOOT, E. A.; LAMB, M. P.; BUTMAN, D.; TASHIE, A.; GLEASON, C. J. (2018). “*Similarity of stream width distributions across headwater systems*”. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02991-w>
- BAREFOOT, E.; PAVELSKY, T. M.; ALLEN, G. H.; ZIMMER, M. A.; MCGLYNN, B. L. (2019). “*Temporally Variable Stream Width and Surface Area Distributions in a Headwater Catchment*”. *Water Resources Research*, 55(8), pp. 7166–7181. <https://doi.org/10.1029/2018WR023877>
- BOTTER, G.; McNAMARA, J.; DURIGHETTO, N. (2024). “*Extending Active Network Length Versus Catchment Discharge Relations to Temporarily Dry Outlets*”. *Water Resources Research*, 60(1). <https://doi.org/10.1029/2023WR035617>
- BUSCH, M. H. et al. (2020). “*What's in a name? Patterns, trends, and suggestions for defining non-perennial rivers and streams*”. *Water (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/w12071980>
- CHAFFE, P. L. B. et al. (2021). “*Observing the critical zone on a critical budget: The Peri Lake experimental catchment*”. *Hydrological Processes*, 35(3). <https://doi.org/10.1002/hyp.14087>
- DE SOUZA, K. I. S.; CHAFFE, P. L. B.; DE CARVALHO PINTO, C. R. S.; NOGUEIRA, T. M. P. (2019). “*Environmental protection of springs and groundwater outcrops in Brazil: history and current technical gaps*”. *Aguas Subterraneas*, 33(1), pp. 76–86. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29254>
- EMBRAPA. (2004). *Solos de Santa Catarina: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n°46*. [s.l.], 745 p.
- FLORAM. *MONA da Lagoa do Peri 38 anos*, 2019.
- GODSEY, S. E.; KIRCHNER, J. W. (2014). “*Dynamic, discontinuous stream networks: Hydrologically driven variations in active drainage density, flowing channels and stream order*”. *Hydrological Processes*, 28(23), pp. 5791–5803. <https://doi.org/10.1002/hyp.10310>
- ILJA VAN MEERVELD, H. J.; KIRCHNER, J. W.; VIS, M. J. P.; ASSENDELFT, R. S.; SEIBERT, J. (2019). “*Expansion and contraction of the flowing stream network alter hillslope flowpath lengths and the shape of the travel time distribution*”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11), pp. 4825–4834. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4825-2019>
- KAPLAN, N. H.; BLUME, T.; WEILER, M. (2022). “*Event controls on intermittent streamflow in a temperate climate*”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(10), pp. 2671–2696. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2671-2022>
- KOHLER, M. A.; LINSLEY, R. K. (1951). *Predicting the Runoff from Storm Rainfall*. US Department of Commerce, Weather Bureau, Silver Spring – MD, USA, 10 p.

- MARTIN, C.; KAMPF, S. K.; HAMMOND, J. C.; WILSON, C.; ANDERSON, S. P. (2021). “*Controls on Streamflow Densities in Semiarid Rocky Mountain Catchments*”. Water, 13, 521. <https://doi.org/10.3390/w13040521>
- NOTO, S.; DURIGHETTO, N.; TAURO, F.; GRIMALDI, S. (2024). “*Characterizing Space-Time Channel Network Dynamics in a Mediterranean Intermittent Catchment of Central Italy Combining Visual Surveys and Cameras*”. Water Resources Research, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1029/2023WR034682>
- PEREZ, A. B. A.; SANTOS, C. I. DOS; SÁ, J. H. M.; ARIENTI, P. F.; CHAFFE, P. L. B. (2020). “*Connectivity of ephemeral and intermittent streams in a subtropical atlantic forest headwater catchment*”. Water (Switzerland), 12(6). <https://doi.org/10.3390/W12061526>
- PRANCEVIC, J. P.; KIRCHNER, J. W. (2019). “*Topographic Controls on the Extension and Retraction of Flowing Streams*”. Geophysical Research Letters, 46(4), pp. 2084–2092. <https://doi.org/10.1029/2018GL081799>
- RAYMOND, P. A. et al. (2013). “*Global carbon dioxide emissions from inland waters*”. Nature, 503(7476), pp. 355–359. <https://doi.org/10.1038/nature12760>
- TROMP-VAN MEERVELD, H. J.; McDONNELL, J. J. (2006). “*Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis*”. Water Resources Research, 42(2). <https://doi.org/10.1029/2004WR003800>
- UFSC – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. (2018). *Mapa Geológico da Ilha de Santa Catarina*. Florianópolis: [s.n.]. Disponível em: <http://lmo.ufsc.br/mapa-geologico-da-ilha-de-santa-catarina/>. Acesso em: 18 dez. 2018.
- WOHL, E.; DWIRE, K.; SUTFIN, N.; POLVI, L.; BAZAN, R. (2012). “*Mechanisms of carbon storage in mountainous headwater rivers*”. Nature Communications, 3. <https://doi.org/10.1038/ncomms2274>
- ZIMMERMANN, B.; ZIMMERMANN, A.; TURNER, B. L.; FRANCKE, T.; ELSENBEEER, H. (2014). “*Connectivity of overland flow by drainage network expansion in a rain forest catchment*”. Water Resources Research, 50(2), pp. 1457–1473. <https://doi.org/10.1002/2012WR012660>