

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **ESTIMATIVA DA ÁREA SUPERFICIAL DA REDE DE DRENAGEM A PARTIR DA EXPANSÃO LATERAL E LONGITUDINAL DE RIOS**

*Ewerthon Cezar Schiavo Bernardi<sup>1</sup>; Luiz Felipe Pereira de Brito<sup>2</sup>; Fernando Grison<sup>3</sup> & Pedro  
Luiz Borges Chaffe<sup>4</sup>*

**Abstract:** The drainage network surface area expands in response to catchment wetness conditions, influencing nutrients transport, hyporheic zone exchanges, and even the delineation of permanent preservation areas. While the surface area usually increases with longitudinal expansion in the headwaters and increased wetted width, in headwater catchments drainage network dynamics are also influenced by channel morphology and intermittent streams presence. This study analyzes lateral and longitudinal expansion influence on the streams surface area in a small subtropical catchment. The study area is a 0.16 km<sup>2</sup> hillslope sub-catchment of the Peri Lake Watershed, in Florianópolis – SC. This region is characterized by intermittent streams presence and relief variations with boulders and rock debris along the thalweg. We measured wetted width and length of the activated drainage network at 214 cross sections, spanning different wetness conditions. Between drier and wetter surveys, the longitudinal expansion was 69% and the lateral expansion was 76%, resulting in a 129% surface area increase. The results highlight the importance of detailed channel monitoring to understand surface area dynamics in headwaters.

**Resumo:** A área superficial da rede de drenagem expande de acordo com as condições de umidade da bacia, influenciando o transporte de nutrientes, as trocas na zona hiporréica e até mesmo a determinação de áreas de preservação permanente. O aumento da área superficial ocorre devido a expansão longitudinal nas cabeceiras e ao aumento da largura de topo, mas a dinâmica da rede de drenagem em bacias de cabeceira pode ser diferente em virtude da morfologia dos canais e da presença de rios intermitentes. O objetivo do trabalho é analisar a influência da expansão lateral e longitudinal na área superficial dos rios em uma pequena bacia subtropical de cabeceira. A área de estudo é uma sub-bacia de encosta (0,16 km<sup>2</sup>) da Bacia Hidrográfica da Lagoa do Peri, em Florianópolis – SC. Essa região é caracterizada pela presença de rios intermitentes e por variações no relevo, com matacão e detritos rochosos nos talwegues. Foram realizadas medições de largura de topo e comprimento de drenagem ativa em 214 seções transversais, em diferentes condições de umidade antecedente. Em relação a campanha mais seca, observou-se que na campanha mais úmida o comprimento da rede de drenagem aumentou 69%, enquanto a expansão lateral foi de 76%. A área superficial foi estimada com base nos dados de largura de topo e comprimento de drenagem e teve um aumento 125% entre a campanha mais úmida e mais seca. Esses resultados demonstram a importância do monitoramento detalhados em canais para entender a dinâmica da área superficial em bacias de cabeceira.

**Palavras-Chave** – Monitoramento; conectividade hidrológica; bacia subtropical de encosta.

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

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

## INTRODUÇÃO

A área superficial da rede de drenagem é fundamental para estimativa da troca de gases entre água e atmosfera, trocas na zona hiporréica, transporte de nutrientes e determinação de áreas de preservação permanente. O aumento da área superficial está associado às expansões lateral e longitudinal dos canais, sendo que a expansão lateral dos canais é decorrente do aumento da largura de topo, enquanto a expansão longitudinal ocorre com o aumento do comprimento total da rede de drenagem ativa (Allen *et al.*, 2018; Barefoot *et al.*, 2019).

A expansão lateral e longitudinal são controladas por características da paisagem (Ilja Van Meerveld *et al.*, 2019; Wohl *et al.*, 2012), características topográficas (Prancevic & Kirchner, 2019) e umidade antecedente (Godsey & Kirchner, 2014; Perez *et al.*, 2020). A largura de topo é importante para determinação da área superficial, modelagem da zona hiporréica (Kasahara & Wondzell, 2003; Kiel & Bayani Cardenas, 2014), avaliação de transporte de água em canais abertos (Gleason & Smith, 2014), assim como em estudos envolvendo transporte de material e erosão (Allen *et al.*, 2013). Já o aumento do comprimento total da rede de drenagem pode influenciar o tempo de concentração da bacia (Ilja Van Meerveld *et al.*, 2019), transporte de nutrientes e sedimentos (Zimmermann *et al.*, 2014) ou mesmo na determinação de áreas de preservação (de Souza *et al.*, 2019).

Normalmente entende-se que a expansão longitudinal ocorre principalmente na cabeceira dos canais e que a largura de um rio aumenta de montante para jusante. Entretanto em bacias de cabeceira essa dinâmica pode ser diferente. As morfologias dos canais destas bacias podem acomodar as vazões a partir do aumento da velocidade do fluxo, altura e largura da água de maneiras diferentes (Wohl & Merritt, 2008). Além disso, é necessário saber como ocorre a expansão da área superficial em rios intermitentes (Busch *et al.*, 2020), que podem ativar em determinadas condições de umidade.

Assim, o objetivo deste trabalho é analisar a influência da expansão lateral e longitudinal na área superficial da rede de drenagem em uma pequena bacia hidrográfica subtropical de cabeceira.

## MATERIAIS E MÉTODOS

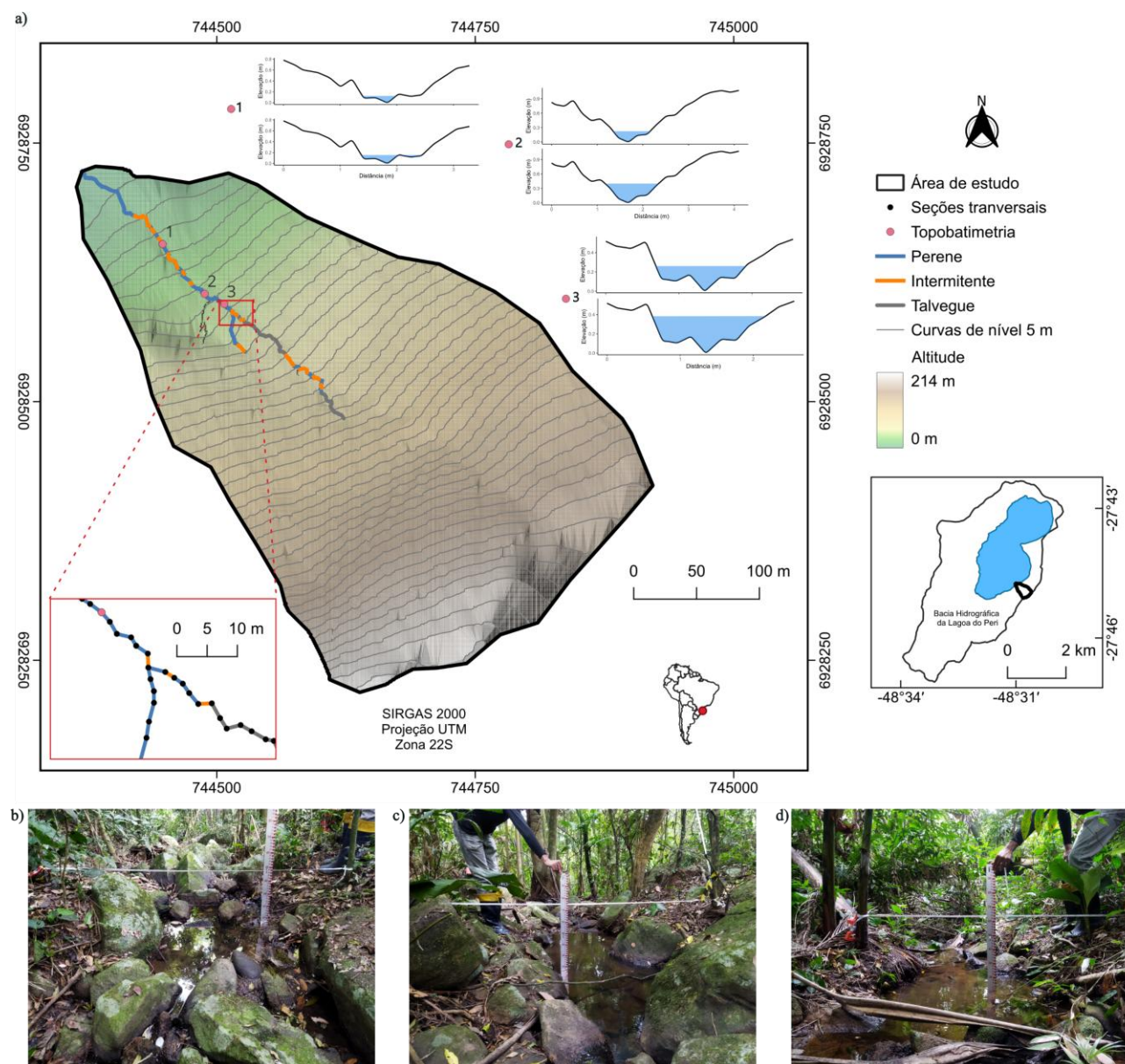
### Área de Estudo

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 (Figura 1a) é uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica da Lagoa do Peri. Sua cobertura é predominantemente Floresta Ombrófila Densa, com declividade média do talvegue principal de 0,16 m/m, altitudes variando entre 0 e 214 m e área de contribuição de 0,16 km<sup>2</sup>. 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).

Foi realizado um campo exploratório desde o exutório até o divisor de água da área de estudo, onde foi possível identificar que a rede de drenagem é composta por rios perenes e intermitentes. Além disso, foi identificada a presença de detritos rochosos, detritos lenhosos e matacão em trechos, que controlam o fluxo da água.

Figura 1 – Mapa de localização e fotografias de campo. a) Mapa de localização da área de estudo, situada na Bacia Hidrográfica da Lagoa do Peri, em Florianópolis. Detalhamento do monitoramento e topobatimetria de seções transversais. b) Seção 1 com topobatimetria, de montante para jusante. c) Seção 2 com topobatimetria, de montante para jusante. d) Seção 3 com topobatimetria, de montante para jusante.



## Campanhas de monitoramento e dados de vazão

As seções transversais foram definidas em campo com uma trena e apresentaram distância variando de 0,67 a 5,85 m, com mediana igual a 1,96 m. O comprimento total da rede de drenagem mapeada, considerando rios perenes e não perenes, foi de 437,96 metros. As distâncias entre as seções transversais foram aferidas com a estação total Leica TCR407. A topobatimetria de três seções transversais também foi levantadas com a estação total. Estas seções foram definidas à montante e à jusante de trechos intermitentes, assim como em um trecho perene com o intuito de demonstrar a geometria da seção.

Foram medidas as larguras de topo em 214 seções transversais ao longo dos talwegues do rio principal e de seu afluente em condições de escoamento de base e durante eventos de chuva, totalizando seis campanhas. Cada campanha teve duração de aproximadamente 4 horas. Cada seção transversal foi demarcada e identificada com uma bandeira de plástico, de modo que todas as campanhas avaliaram as mesmas seções transversais.

As campanhas ocorreram entre o dia 18 de setembro de 2024 e 7 de janeiro 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. Os dados utilizados para curva-chave correspondem a outra sub-bacia da Bacia Hidrográfica da Lagoa do Peri com 2,04 km<sup>2</sup> 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 durante o período de coleta de dados na área de estudo.

### Expansão lateral e longitudinal

A expansão lateral foi avaliada a partir da mediana e do somatório das larguras de topo de cada campanha. A expansão longitudinal foi determinada a partir da soma dos comprimentos dos trechos ativos entre seções transversais, também conhecida como rede de drenagem ativa (ADN, do inglês *Active Drainage Network*). Foram considerados ativos os trechos que apresentaram fluxo de água superficial.

### Modelo de área superficial

A área superficial total (SA, do inglês *surface area*) foi estimada pela soma dos produtos entre o comprimento médio dos segmentos de rede de drenagem ativa e as larguras de cada seção transversal, onde as larguras são consideradas como uma variável aleatório com distribuição lognormal.

O modelo proposto por Allen *et al.* (2018) leva em conta que a distribuição das medidas de larguras não muda mesmo em diferentes condições de umidade. Os autores assumem que inicialmente irá acontecer a expansão longitudinal nos trechos de montante enquanto os trechos já ativos se expandem lateralmente. Assim, a proporção de rios estreitos se mantém a mesma.

Entretanto, observou-se que a expansão longitudinal não ocorre somente nos trechos à montante, como também em trechos próximos ao exutório da bacia. Estes trechos têm área de contribuição próxima da área total da área de estudo e apresentam altas declividades elevadas, bem como a presença de matacão. Estas características topográficas e da paisagem, associadas ao aumento da umidade do solo, controlam a ativação destes trechos intermitentes.

Sendo assim foi proposta a utilização da mediana e desvio padrão de cada medida em diferentes condições de umidade no modelo de Allen *et al.* (2018), conforme a Equação 1.

$$SA = \sum \frac{L}{N} e^{\mu + \sigma X} \quad (1)$$

onde,  $SA$  é a área superficial (em m<sup>2</sup>),  $L$  é o comprimento acumulado (em m)  $N$  é o número de observações,  $X$  é variável normal padronizada,  $\mu$  é o logaritmo da mediana e  $\sigma$  é o logaritmo do desvio padrão dos dados de largura de cada campanha.



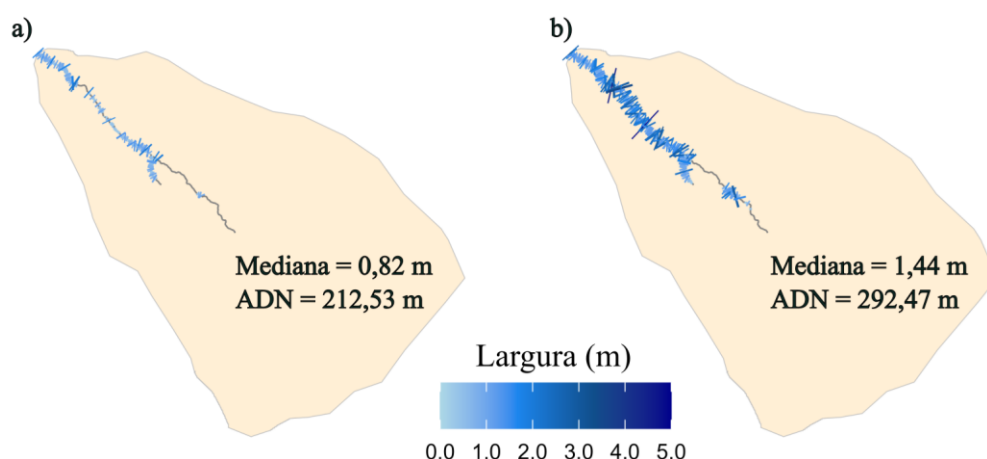
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Expansão Lateral e Longitudinal

As expansões lateral e longitudinal ocorrem à medida que a umidade da bacia aumenta. Na campanha durante o escoamento de base (Figura 2a) a ADN foi de 212,53 m (48% de toda a rede de drenagem mapeada). Já na campanha durante um evento (Figura 2b) de chuva a ADN foi de 292,47 (67% de toda a rede de drenagem). Entre as duas campanhas, a ADN teve um aumento de 69%.

O aumento da ADN é explicado pela ativação de trechos intermitentes ao longo do talvegue. Embora alguns destes trechos apresentem área de contribuição próxima à área da bacia, a desativação deles ocorre somente quando a bacia está em escoamento de base, possivelmente devido às características da paisagem como matacão e detritos rochosos que aumentam a transmissividade do solo e, conseqüentemente, as perdas por infiltração (Ilja Van Meerveld *et al.*, 2019; Perez *et al.*, 2020). Entretanto, o aumento da umidade da bacia, do nível da água subterrânea e da zona hiporréica pode acarretar na ativação destes canais. Deste modo, estas características da paisagem podem atuar como sumidouros de água à montante e fontes à jusante.

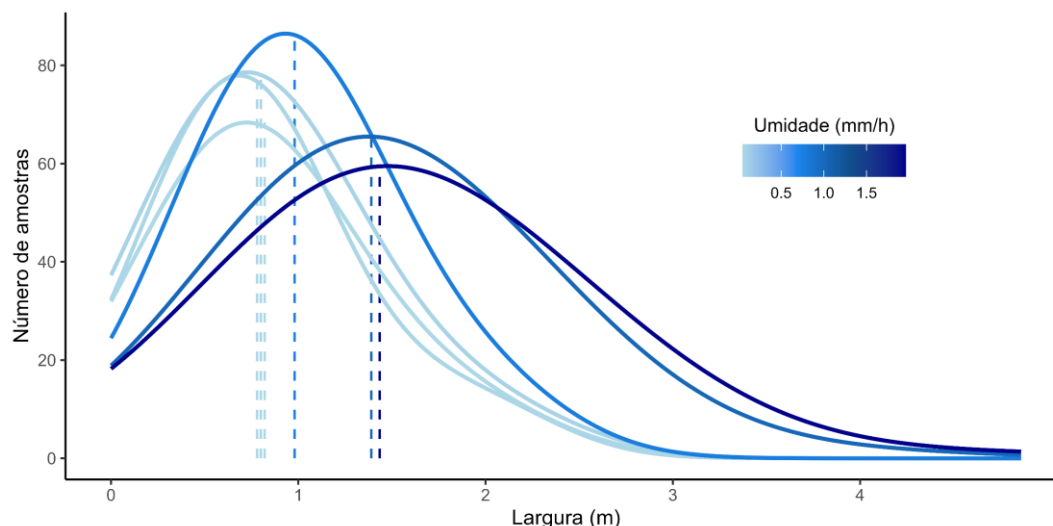
Figura 2 – Rede de drenagem ativa e largura de topo em 18/09/2024 e 20/11/2024.



Na campanha mais seca as amostras de largura variaram de 0,18 m a 2,22 m, enquanto na campanha mais úmida as amostras variaram de 0,32 m a 4,96 m. A mediana das larguras aumentou de 0,82 m para 1,44 m (76%) entre a campanha mais seca e mais úmida, respectivamente (Figura 3). Já o somatório das larguras foi de 94,89 m e 248,68 m, durante escoamento de base e durante evento de chuva, respectivamente. Durante a campanha mais seca a umidade da bacia foi de 0,049 mm/h enquanto na campanha mais úmida foi de 1,961 mm/h.

Este comportamento da expansão lateral pode ser explicado pelo aumento da vazão do rio, o que acarreta o aumento da largura de topo. Contudo, algumas seções transversais podem apresentar menor variabilidade da largura em função da presença de detritos rochosos que impedem a expansão lateral ou mesmo trechos íngremes que tendem a aumentar a velocidade do fluxo em uma maior proporção do que expandem a largura.

Figura 3 – Distribuição das larguras de topo medidas e localização das medianas das medidas de largura em diferentes condições de umidade da bacia hidrográfica.

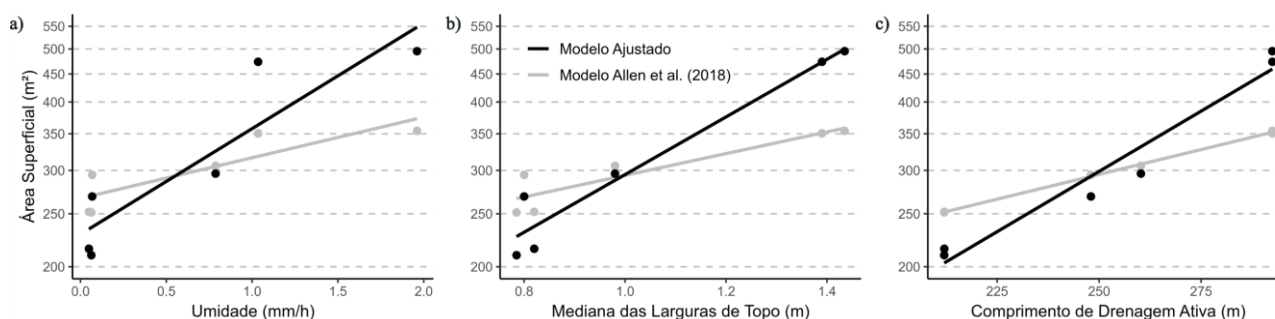


### Estimativa da área superficial

A área superficial estimada aumentou com a umidade da bacia hidrográfica em virtude da expansão lateral e longitudinal dos rios. Durante a campanha mais seca a área superficial foi estimada em 215,72 m<sup>2</sup>, enquanto na campanha mais úmida foi de 495,43 m<sup>2</sup>, mostrando um aumento de 125%.

A Figura 4 mostra os resultados das estimativas de área superficial considerando a não mudança da posição central na distribuição das larguras, proposto por Allen *et al.* (2018), bem como as estimativas de área superficial estimadas a partir do modelo ajustado. A comparação entre os modelos mostra que o modelo proposto por Allen *et al.* (2018) subestima a área superficial quando a bacia está em estado úmido e superestima a área superficial quando a bacia está em escoamento de base.

Figura 4 – Relações entre o logaritmo da área superficial e a) umidade, b) mediana das larguras monitoradas e c) comprimento da rede de drenagem.



Os modelos de regressão linear entre o logaritmo da área superficial e umidade, mediana e comprimento da rede de drenagem tiveram R<sup>2</sup> igual a 0,82, 0,94 e 0,96, com p-valor menor que 0,05. Além disso, os coeficientes de correlação de Spearman calculados entre a área superficial e umidade, mediana e comprimento da rede de drenagem foram, respectivamente, iguais a 0,94, 0,94 e 0,98, todos com p-valor menor 0,05.

O aumento da área superficial é decorrente não só da ativação de trechos de cabeceira, mas principalmente pela ativação de trechos próximos ao exutório. Estes trechos apresentam grandes larguras devido à alta área de contribuição ( $> 0,14 \text{ km}^2$ ) e, consequentemente, geram o deslocamento da mediana das larguras quando a umidade da bacia é alta.

## CONCLUSÕES

A expansão lateral e longitudinal da rede de drenagem de uma bacia subtropical de encosta foi mapeada em diferentes condições de escoamento. A partir do mapeamento em alta resolução espacial estimou-se a área superficial da rede de drenagem. A área superficial aumentou em mais de duas vezes entre a campanha mais úmida e a mais seca. O trabalho enfatiza a importância em considerar a expansão lateral e longitudinal de rios perenes e não perenes na determinação da área superficial da rede de drenagem 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.; BARNES, J. B.; PAVELSKY, T. M.; KIRBY, E. (2013). “*Lithologic and tectonic controls on bedrock channel form at the northwest Himalayan front*”. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 118(3), pp. 1806–1825. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20113>
- 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>
- 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.; SANTOS, C. I.; PEREZ, A. B. A.; SÁ, J. H. M.; CARLOTTO, T.; HOINASKI, L. (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.; PINTO, C. R. S. C.; 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.
- DOWNING, J. A.; COLE, J. J.; DUARTE, C. M.; MIDDELBURG, J. J.; MELACK, J. M.; PRAIRIE, Y. T.; KORTELAINE, P.; STRIEGL, R. G.; MCDOWELL, W. H.; TRANVIK, L. J. (2012). “*Global abundance and size distribution of streams and rivers*”. Inland Waters, 2(4), pp. 229–236. <https://doi.org/10.5268/IW-2.4.502>
- GLEASON, C. J.; SMITH, L. C. (2014). “*Toward global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry*”. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111(13), pp. 4788–4791. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317606111>
- 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>
- KASAHARA, T.; WONDZELL, S. M. (2003). “*Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams*”. Water Resources Research, 39(1), SBH 3-1–SBH 3-14. <https://doi.org/10.1029/2002wr001386>
- KIEL, B. A.; CARDENAS, M. B. (2014). “*Lateral hyporheic exchange throughout the Mississippi River network*”. Nature Geoscience, 7(6), pp. 413–417. <https://doi.org/10.1038/ngeo2157>



- PEREZ, A. B. A.; SANTOS, C. I.; 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>
- 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>
- WOHL, E.; MERRITT, D. M. (2008). “Reach-scale channel geometry of mountain streams”. *Geomorphology*, 93(3–4), pp. 168–185. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.02.014>
- ZIMMERMANN, B.; ZIMMERMANN, A.; TURNER, B. L.; FRANCKE, T.; ELSENBEER, 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>