

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO ESCOAMENTO FLUVIAL COM VEGETAÇÃO MACRÓFITA EMERSA

Camila Farias Vitorino¹ & Lúcio Flávio Ferreira Moreira² & Kleiton Cassemiro³

Resumo – O objetivo deste estudo foi investigar a influência da vegetação macrófita *Montrichardia linifera* na interação com o fluxo e resistência hidráulica. Para isso, foram analisadas as características dos fluxos numa seção transversal situada a montante da área de estudo. Além disso, foi realizada análise estatística da vegetação (morfologia das plantas e configuração espacial) em quatro quadrantes selecionados aleatoriamente, dimensões 2m x 2m dentro da área de estudo. Os resultados indicam alta densidade e pequena variabilidade espacial na distribuição das plantas na área de estudo. As medições da velocidade na seção de estudo foram realizadas utilizando equipamento eletromagnético, e revelaram alta variabilidade dos fluxos através das plantas nas regiões situadas a jusante, com a ocorrência de correntes reversas e turbulência. A descarga líquida de 0,274 m³/s estava associada ao coeficiente de Manning n igual 0,127.

Palavras-Chave – resistência do fluxo; macrófita aquática; coeficiente de Manning.

FLOW RESISTANCE ANALYSIS OF A RIVER WITH MACROPHYTE EMERSE VEGETATION

Abstract – The aim of this study was to investigate the influence of *Montrichardia linifera* emerge macrophyte vegetation to flow interaction and hydraulic resistance. For this purpose, flow characteristics in a transverse section located upstream of the study area was analyzed. In addition, statistical analysis of the vegetation (plants morphology and spatial configuration) was made in four quadrants selected randomly, dimensions 2m x 2m, within the study area. Results indicate that plants density was high within the study area, with relatively low spatial variability. Flow measurements in the transverse section was made by using electromagnetic equipment, and revealed high flow variability through the plants stems in the close downstream regions, where reverse currents and turbulence occurred. Measured flow discharge and Manning coefficient was 0.274 m³/s and 0.127 respectively.

Keywords – flow resistance; aquatic macrophyte; Manning roughness coefficient.

¹Mestranda PPgES/UFRN

²Professor Titular PPgES/UFRN *

³Professor IFRN Natal-RN

INTRODUÇÃO

As plantas macrófitas estão presentes na calha fluvial e exercem um papel importante na absorção de metais pesados, atuando como remediadores dos impactos das atividades humanas. Essas plantas aumentam a resistência do fluxo, produzindo elevação da cota da lamina d'água e redução da velocidade na seção transversal. Estudos demonstram que a resistência produzida em canais com vegetação podem ser até duas vezes mais alta do que nos canais não vegetados. Estudos tem apontado que a resistência é influenciada pelas características da vegetação e distribuição espacial das plantas, uma vez que o arranjo espacial influencia a estrutura do escoamento e a dissipação de energia mecânica.

O sistema fluvial compõe uma comunidade biológica formada por uma variedade de organismos de variadas espécies. Nesse sentido, as comunidades de macrófitas têm um papel relevante na condição ecológica do rio, pois alteram a estrutura da velocidade através das plantas, proporcionando os processos que permitem a melhoria da qualidade da água pela absorção dos contaminantes, tais como metais pesados e substâncias de origem orgânica.

Por outro lado, a proliferação excessiva dessas plantas pode trazer efeitos hidráulicos desfavoráveis, causado pelo incremento da resistência do fluxo e conseqüente redução da capacidade hidráulica. As espécies de macrófitas podem ser do tipo totalmente ou parcialmente submersas.

A presença de vegetação aquática na calha fluvial modifica o comportamento da velocidade na interação fluxo-vegetação. A resistência ao fluxo nesse caso está relacionada com os elementos de rugosidade dos caules, folhas e raízes. A interação fluxo-vegetação modifica a velocidade local, a intensidade da turbulência e as tensões de Reynolds nas regiões próximas da superfícies sólidas dos caules (Wilson, 2007; Garcia et al., 2004; Stone e Shen, 2002).

O comportamento da velocidade nos fluxos através da vegetação macrófita emersa (só o caule entra em contato com o fluxo) depende de vários fatores: características do escoamento (número de Reynolds), espécie da planta (características morfológicas), densidade e arranjo espacial das plantas, entre outros. Estudos apontam que a presença da macrófita produz uma redução das tensões de cisalhamento na superfície do leito, reduzindo o movimento das partículas e promovendo a sedimentação (Sharpe e James, 2006; Jordanova e James, 2003; Lopez e Garcia, 1998).

A literatura relaciona a resistência do fluxo com os coeficientes de resistência amplamente utilizados na engenharia. Dentre eles, o coeficiente de resistência de Manning permite quantificar os efeitos de resistência associados a uma variedade de condições de rugosidade que podem estar presentes na calha fluvial.

Considerando o escoamento turbulento através de macrófitas emersas com folhagem sem contato com o fluxo, cabe ressaltar que esses escoamentos são afetados pela presença das fronteiras sólidas representadas pelos caules das plantas. Nesse sentido, a estrutura do escoamento é afetada pela condição de não escorregamento do fluido, com a formação da camada limite em torno da superfície. Na região laminar, o efeito viscoso predomina e a variação de pressão ao longo da superfície dá origem ao arrasto devido à pressão. A separação da camada limite dá origem a pressões negativas e escoamentos reversos na parte de jusante do caule. Fora da região laminar, a turbulência é produzida pelos gradientes de velocidade, que são responsáveis pela formação de vórtices.

A interação fluxo-vegetação está associado a uma série de fatores. Dentre esses fatores, cabe a densidade das plantas (número de indivíduos por unidade de área) e a relação diâmetro do caule-espacamento entre plantas. Quando a densidade das plantas é alta, a resistência do fluxo é dominada

pelas variações de velocidade e turbulência produzidas pelo agrupamento de superfícies sólidas e suas características morfológicas. Por outro lado, a distribuição esparsa de plantas (baixa densidade), a faz com que as estruturas de velocidade e turbulência não se superponham, e o efeito do arrasto pode ser associado a variação de pressão. A alta densidade de vegetação atua como dissipador de energia cinética, amortecendo a turbulência e reduzindo a formação de vórtices. Isso promove o depósito de sedimento, pois as tensões turbulentas não atuam nas regiões próximas do leito. Ghisalberti and Nepf (2004) classificou a densidade da planta como a área frontal por unidade de volume, $a = m \cdot d$ onde m , quantidade de plantas e d , diâmetro do caule. Vandembrouwaene et al. (2011) definiram o parâmetro (d/s) , onde d , diâmetro do caule e s , espaçamento entre plantas. Esse parâmetro foi usado para analisar a interferência no fluxo causado pelos caules das plantas. Observou-se que ocorre interferência dos fluxos entre plantas quando $(d/s) > 0,25$. Para valores de $(d/s)=0,1$, a distribuição é considerada esparsa e não ocorre interferência. Luhar et al. (2008) classificaram a interação fluxo-planta em função da densidade foliar em contato com o fluxo. Foi estabelecido o parâmetro $\lambda = m \cdot A_f$ onde m , número de folhas por cm^2 e A_f , área frontal da folha. Na distribuição esparsa, a interação fluxo-planta se comporta como fluxo com camada limite turbulenta. Por outro lado, para densidades altas ($\lambda > 0,02$), as folhas entram em contato com o fluxo e o arrasto produz redução da velocidade a jusante da planta. Vale citar a importância do número de Reynolds como parâmetro que reflete o efeito da turbulência do escoamento na interação com a planta.

Liu et al. (2008) investigou as características dos fluxos através de vegetação emergente com distribuição esparsa. O estudo analisou a velocidade e a turbulência para diferentes situações de densidade e distribuição espacial. Os resultados mostraram alta variabilidade espacial da velocidade nas zonas a jusante da planta. Foram observadas baixas velocidades e alta turbulência nas regiões próximas do leito a jusante da planta. Na planta isolada, a interação com o fluxo produziu erosão do leito ao redor da base do caule da planta, causado pela formação de vórtices.

O objetivo deste trabalho é analisar a interação fluxo-vegetação numa comunidade de macrófitas da espécie *Montrichardia linifera* (Aninga) e os efeitos na resistência, num trecho do baixo curso do rio Pitimbu, situado na região metropolitana de Natal.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo configura planície de inundação situada no curso médio do sistema fluvial do Rio Pitimbu (BHRP), sub-bacia do rio Pirangi. As coordenadas geográficas das seções de montante (S1) e jusante (S2) são [251939E; 9350981.5S] e [251970.5E; 9350942.8S] respectivamente. A BHRP integra a região metropolitana de Natal, e tem sido objeto de rápida urbanização nas últimas décadas, com crescentes índices de ocupação e uso do solo. Como consequência, o sistema fluvial tem sofrido os impactos da poluição proveniente de fontes difusas e pontuais, sobretudo de origem orgânica. Isso sugere a abundância de contaminantes absorvidos pelas macrófitas, e que explicam a sua alta proliferação em trechos do rio Pitimbu. A área de estudo possui alta densidade de vegetação macrófita de formação pioneira, influência fluvial arbustiva. A macrófita dominante é da espécie *Montrichardia linifera* (Aninga), do tipo arbustiva de aráceas. A Aninga é uma macrófita de caule rígido e ocorre em alguns trechos do rio Pitimbu. A planta ocupa toda a seção transversal, com alta densidade e relativa uniformidade de distribuição espacial. Observou-se que na maioria dos casos, o sistema radicular das plantas está situado acima do leito do rio. Isso pode ser devido aos seguintes fatores: a. ocorrência de processos erosivos ao redor do pé da planta; b. o leito é formado por sedimento de granulometria fina (silte+areia fina), facilmente mobilizados pela ação do fluxo. O diâmetro dos caules variou entre 0,025 m - 0,07 m, em função da idade da planta. A espécie macrófita objeto deste estudo possui altura variando entre 3-4 m, com

folhagem aérea de médio a grande porte. Somente o caule e as raízes estão em contato com o fluxo. O caule dessas plantas é rígido, com diâmetro variando entre 0,05-0,2 m. A alta rigidez do caule dessas plantas impede o seu encurvamento pela ação do fluxo. Assim, pode-se considerar que a interação fluxo-vegetação varia em função das condições hidráulicas.

O talvegue do rio no trecho de estudo apresenta configuração longitudinal com meandro de curvatura suave. A largura molhada das seções S1 e S2 tem 13,2 m e 2,2 m, respectivamente. A largura média da planície de inundação do rio tem 69 m. A extensão longitudinal do trecho tem 49,2 m. Vale citar que a construção de uma ponte rodoviária em 2010, produziu desmatamento das áreas situadas a montante. Ao mesmo tempo, o movimento de terra durante a obra produziu assoreamento da calha do rio no trecho de estudo. O sedimento depositado no leito alterou a morfologia fluvial. No entanto, tem sido transportado para jusante durante os eventos máximos na bacia, permitindo o ajuste da calha fluvial a nova condição sedimentológica.

O escoamento de base do rio Pitimbu ocorre por causa da ressurgência das águas subterrâneas provenientes das formações geológicas Dunas-Barreiras (Medeiros, 2001). Esse aquífero subterrâneo apresenta alta conexão com as águas superficiais, uma vez que se comporta como um sistema hidráulico único (Melo, 1995). No trecho de estudo há predominância da Formação Pioneira com influência fluvial arbustiva sem palmeiras, dominada fisionômica e estruturalmente pela espécie arbustiva de aráceas denominada Aninga (*Montrichardia linifera*). Essa espécie está presente nas águas rasas dos rios da costa leste tropical da América do Sul (Medina, 1959). Ao longo das margens do rio Pitimbu, esse tipo de vegetação é o mais típico e amplamente distribuído, se estendendo desde as regiões de nascente até a desembocadura no rio Taborda, formando frequentemente densas manchas mono-específicas com até 3 m de altura. Associadas, estão umas poucas espécies como a Samambaião (*Acrostichum aureum*), duas espécies de Ludwigia e algumas convolvuláceas e cucurbitáceas trepadeiras.

METODOLOGIA

Caracterização da vegetação

A caracterização da vegetação foi feita com levantamentos *in loco*. Para isso, foram selecionados aleatoriamente na área de estudo 4 quadrantes de dimensões (1m x 1 m). Nesses quadrantes, foram levantados detalhadamente as características morfológicas das plantas (altura, profundidade da lamina d'água, diâmetro do caule, tamanho das folhas). bem como a configuração espacial (distância entre plantas). O diâmetro do caule foi medido usando paquímetro. A realização da medida do caule obedeceu a metodologia amplamente utilizada, que estabelece o diâmetro a 1,3 m de altura da planta. A altura da planta foi medida utilizando uma trena.

Observou-se certa uniformidade na configuração espacial das plantas, muito embora a distância entre elas não obedeça a um padrão definido. Observou-se, de modo geral, aumento da altura das plantas na região do talvegue do rio.

Levantamento hidrométrico

Foi realizado levantamento detalhado das características do escoamento nas seções transversais S1 e S2.

A medição da descarga líquida obedeceu a metodologia amplamente utilizada. A seção transversal foi dividida em verticais igualmente espaçadas ao longo da sua largura. Assim, em cada vertical foram realizadas medições da profundidade e da velocidade média. A medida da velocidade média em cada vertical foi feita utilizando equipamento medidor de vazão usado em rios de pequeno e médio porte. Utiliza tecnologia de aquisição de dados baseada no efeito Doppler, marca *FlowTracker*[®]. O equipamento apresenta a vantagem de permitir o levantamento detalhado das

características dos fluxos através da vegetação distribuída ao longo do perímetro molhado. A seção S1 foi dividida em verticais equidistantes de 0,6 m ao longo da largura. A medida da velocidade média pontual foi realizada durante o período de 40 segundos. O levantamento possibilitou analisar a estrutura dos fluxos na seção transversal.

Levantamento da Declividade da lâmina de fluxo

O levantamento do desnível da lamina d'água entre as seções foi feito utilizando mangueira de nível transparente, com diâmetro igual a 10 mm e comprimento igual a 20 m. O levantamento da declividade foi realizado ao longo da margem do rio, onde foi feita divisão do comprimento em sub-trechos até alcançar a seção de jusante. Foram usadas estacas de madeira e marcador. A declividade da linha d'água ($I_{\text{água}}$) foi determinada usando a seguinte expressão,

$$I_{\text{água}} = \frac{Z_1 - Z_2}{L} \quad (1)$$

onde Z_1 e Z_2 representam os níveis da lamina d'água nas seções S1 e S2 respectivamente; L é a distância longitudinal entre seções. Assim, a determinação do coeficiente de rugosidade de Manning utilizou a expressão 2,

$$n = \frac{R^{2/3}}{V} \sqrt{\frac{1}{L} \cdot \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \right) + I_{\text{água}}} \quad (2)$$

onde R é o raio hidráulico médio envolvendo 2 ou mais seções transversais no trecho de estudo (m), V é o valor médio da velocidade média nas seções transversais, L é o comprimento longitudinal do curso d'água (m), V_1 e V_2 são as velocidades médias nas seções S1 e S2 respectivamente.

RESULTADOS

O levantamento das características da vegetação considerou a importância de selecionar unidades de amostragem situadas dentro da comunidade de macrófitas na área de estudo. Para isso, foram selecionados aleatoriamente 4 quadrantes, dimensões 2m x 2m, representativos da população de plantas, onde a localização está ilustrada na Figura 1.

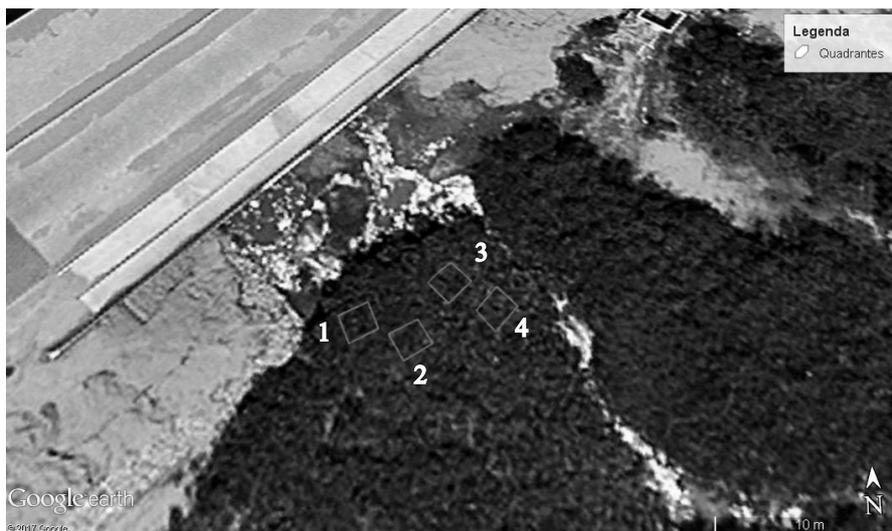


Figura 1. Área de estudo e localização dos quadrantes da vegetação. Fonte: Google Earth.

Os dados levantados das plantas foram submetidos a análise estatística, utilizando para isso o aplicativo GraphPad Prism7. Os resultados obtidos apresentados nos gráficos das Figuras 2 e 3.

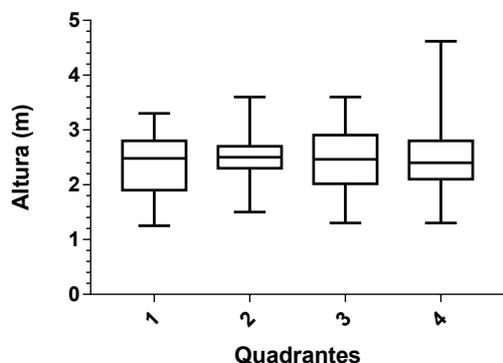


Figura 2. Boxplot das medições da altura da vegetação Aninga nos quadrantes

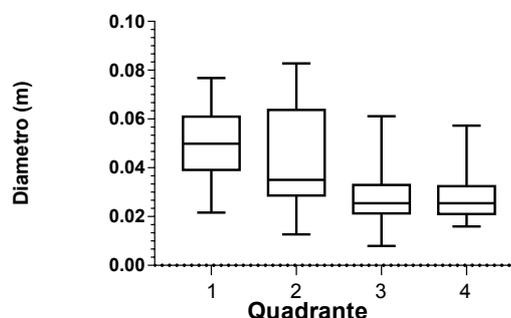


Figura 3. Boxplot das medições do diâmetro da vegetação nos quadrantes

A população analisada em cada quadrante foi de 32 plantas em média. Observou-se que a altura média das plantas em todos os quadrantes variou em torno de 2,6 m, com taxa de variação média de 24%. A maior taxa de variação (28%) foi observada no quadrante 4. O desvio padrão da altura nos quadrantes 1-2-3 demonstrou comportamento homogêneo. Para a relação do diâmetro, observou-se que variou em torno de 0,034 m, sendo os maiores valores de diâmetros incluídos no quadrante 1 e 2 os quais possuíam menor densidade de distribuição das plantas. Observou-se que uma alta variação no diâmetro está relacionada com baixa variação na altura.

Os valores do parâmetro (d/s) observados em campo indicaram que a densidade da vegetação é bastante alta ($d/s > 0,4$). Nesse caso, a interação fluxo-planta é dominada pela interferência dos fluxos entre plantas, dando lugar a formação de correntes reversas e vórtices nas regiões imediatamente a jusante das plantas e próxima do leito. A literatura relata controvérsias sobre qual seria o parâmetro mais adequado para definir a interação com a planta. Neste estudo, o parâmetro %CSA, desenvolvido por O'Hare et al., (2010), demonstrou ajuste satisfatório a macrófita da espécie *Montrichardia linifera* objeto deste estudo. Neste estudo, o %CSA obtido (0,57) representa o percentual de área da seção transversal ocupada pela vegetação. O'Hare et al. (2010) trabalhou com a espécie de caule rígido *Sparganium erectum* e obteve um %CSA médio de 0,459.

As características do escoamento na seção S1 foi investigada com a medição da velocidade em 24 verticais. O comportamento das velocidades médias e profundidades, medidas imediatamente a jusante das plantas, estão apresentadas nas Figuras 5 e 6 respectivamente. De modo geral, velocidades altas estavam ocorriam em pontos de pouca profundidade. Observou-se alta variabilidade espacial nos fluxos entre as plantas, o que está relacionado a dois fatores: a) alta variação no espaçamento entre plantas; b) presença de resíduos sólidos represando o fluxo em alguns pontos da seção. Identificou-se a ocorrência de corrente reversa a jusante das plantas nas verticais 11, 22 e 23, possivelmente associadas a alta densidade das plantas nesses pontos. A velocidade média na seção foi 0,0828 m/s e descarga líquida 0,274 m³/s (realizada em 20/04/2017).

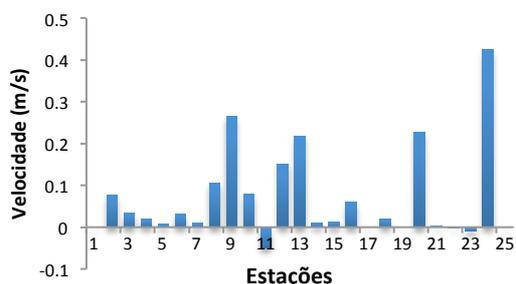


Figura 5. Distribuição da velocidade na seção S1.

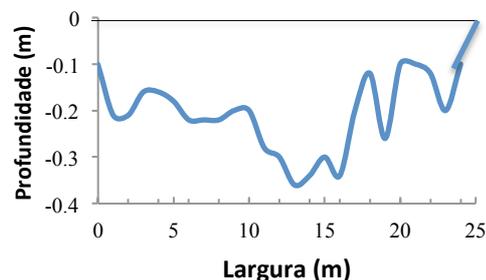


Figura 6. Morfologia da seção transversal S1.

Os levantamentos e medições de campo permitiram determinar o coeficiente de Manning, $n=0,127$. O valor de n mostrou-se consistente em comparação com estudos anteriores com presença de vegetação e características hidráulicas semelhantes, tal como o estudo de O'Hare et al. (2010).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Gestão das Águas do Rio Grande do Norte – IGARN, pelo apoio na utilização do equipamento de medição da velocidade e pessoal técnico.

CONCLUSÕES

Este trabalho teve o objetivo de investigar a influencia da vegetação macrófita (morfologia e configuração espacial) na interação fluxo-vegetação e consequente resistência ao fluxo. Para isso, foi investigada as características dos fluxos na seção transversal situada imediatamente a jusante da área de estudo. Foram selecionados aleatoriamente 4 quadrantes de vegetação com dimensões 2m x 2m com o objetivo era analisar a morfologia das plantas e a sua configuração espacial. Os resultados obtidos indicaram alta densidade na configuração das plantas, o que explicou a alta variabilidade das velocidades nas regiões situadas a jusante das plantas. Além disso, foi detectada a ocorrência de correntes reversas a jusante das plantas. A descarga líquida de $0,274 \text{ m}^3/\text{s}$ estava associada ao coeficiente de Manning n igual $0,127$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ghisalberti, M., & Nepf, H. M. (2004). The limited growth of vegetated shear layers. *Water Resources Research*, 40(7).
- Jordanova, A. A., & James, C. S. (2003). Experimental study of bed load transport through emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(6), 474-478.
- Liu, D., P. Diplas, C. C. Hodges e J. D. Fairbanks. 2010. "Hydrodynamics of flow through double layer rigid vegetation." *Geomorphology* no. 116 (3-4):286-296.
- Lopez, Fabian e Marcelo H. Garcia. 2001. "Mean Flow and Turbulence Structure of Open-Channel Flow Through Non-Emergent Vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering* no. 127 (5):392.
- Luhar, M., Rominger, J., & Nepf, H. (2008). Interaction between flow, transport and vegetation spatial structure. *Environmental Fluid Mechanics*, 8(5), 423-439.
- Medeiros, T. H. de L.. 2001. Evolução geomorfológica, descaracterização e formas de uso das lagoas da cidade do Natal/RN. Dissertação de Mestrado (UFRN/PPGG) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 105p

- Melo, J. G. D. (1995). Impactos do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal-RN (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Medina, J.C (1959). Plantas fibrosas da flora mundial. *Campinas: Instituto Agrônomo*
- O'Hare, M. T., McGahey, C., Bissett, N., Cailles, C., Henville, P., and Scarlett, P. (2010). "Variability in roughness measurements for vegetated rivers near base flow, in England and Scotland." *Journal of Hydrology*, Elsevier B.V., 385(1–4), 361–370.
- Stone, B. M., and Shen, H. T. (2002). "Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness." *J. Hydraul. Eng.*, 500–506.
- Wilson, C. A. M. E. (2007). "Flow resistance models for flexible submerged vegetation." *J. Hydrol. (Amst.)*, 342(3–4), 213–222.
- Vandenbruwaene, W., Temmerman, S., Bouma, T. J., Klaassen, P. C., De Vries, M. B., Callaghan, D. P., ... & Balke, T. (2011). Flow interaction with dynamic vegetation patches: Implications for biogeomorphic evolution of a tidal landscape. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F1).