

WAVELETS E MODELOS DE ESPAÇO DE ESTADOS NA IDENTIFICAÇÃO DE CO-VARIÁVEIS PARA ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO EM ESCALA DE BACIA HIDROGRÁFICA

LUANA NUNES CENTENO¹; RODRIGO VALANDRO MAZZARO²; NATHAN BELLUZZO DA SILVEIRA³; ARLAN DA SILVA FERREIRA⁴; WILLIAN SILVA BARROS⁵; LUÍS CARLOS TIMM⁶

^{1,2,3,4,5,6}Universidade Federal de Pelotas – luananunescenteno@gmail.com¹; rvmazzaro@gmail.com²; nathanbelluzzo@hotmail.com³; arlansil@yahoo.com.br⁴; wsbarros@hotmail.com⁵; lctimm@ufpel.edu.br⁶

1. INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) é um dos principais atributos físico-hídricos do solo, já que expressa a dificuldade ou a facilidade com que a água se movimenta em um perfil de solo. Desta forma, é um parâmetro chave no controle de processos hidrológicos (BESKOW et al., 2016) e na avaliação dos impactos relacionados as práticas de uso e manejo do solo e na dinâmica da água e de solutos no solo (REICHARDT; TIMM, 2020). Também é um atributo importante em estudos de infiltração e redistribuição de água, em um perfil de um solo e em projetos de irrigação e drenagem (CHEROBIM et al., 2018). Em suma, a Ksat apresenta alta variabilidade espacial e temporal (SHE et al., 2017), exibindo tendência de não-normalidade e de não-estacionariedade, que devem ser tratadas com ferramentas estatísticas que levem em consideração essas características. Dentre essas ferramentas, tem-se as transformadas de *Wavelets* (uma variável), *Wavelet Coherence* (duas variáveis) e a *Multiple Wavelet Coherence* (mais de duas variáveis) as quais permitem separar a variância total de um conjunto de dados em diferentes variâncias que são plotadas em função da posição (ou localização) e da frequência (ou escala) no domínio em estudo (seja espacial ou temporal) (BISWAS, 2018), podendo ser empregada em séries que possuem comportamento estacionário e não estacionário neste domínio. A maioria dos estudos recentemente publicados tem usado *Wavelets* em escalas de parcelas experimentais (SHE et al., 2017), sendo escasos trabalhos em escala de bacia hidrográfica.

Vários estudos tem focado na estimativa da Ksat a partir de atributos físicos do solo de fácil determinação, de dados topográficos (PICCIAFUOCCO et al., 2019) e de uso do solo (LI; SHAO; ZHAO, 2019) usando modelos de regressão múltipla. Entretanto, tais modelos ignoram as coordenadas espaciais das variáveis em estudo. Diante disso, a modelagem em espaço de estados torna-se uma alternativa no sentido de contornar essa limitação dos modelos globais. Ela permite estudar o relacionamento entre as variáveis levando em consideração a posição das suas observações e o seu carácter local do comportamento.

Frente ao exposto, este estudo teve como objetivo estimar a Ksat em função de variáveis físicas e químicas do solo, atributos topográficos e de uso do solo em uma transeção espacial de 15 km estabelecida na bacia hidrográfica do Arroio Fragata por meio de *Wavelets* e modelos de espaço de estados.

2. METODOLOGIA

O estudo foi conduzido na bacia hidrográfica do Arroio Fragata a montante da seção de controle Ponte Passo dos Carros (BHAFF-PC) foi estabelecida uma transeção espacial de 15 km onde foram demarcados 100 pontos amostrais,

equidistantes entre si de 150 m. Em cada ponto amostral, na camada de 0-0,20 m, foram determinadas as seguintes propriedades físico-hídricas do solo: Argila (GEE; BAUDER, 1986), Carbono Orgânico (TEDESCO et al., 1995), Densidade do solo (Ds), Macroporosidade (Macro) (EMBRAPA, 1997) e Condutividade Hidráulica do Solo Saturado - Ksat (LIBARDI, 2005). A partir do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente, foi obtido o atributo topográfico Elevação (Elev), em cada ponto, também foi identificado o tipo de uso do solo, o qual foi categorizado a partir dos valores médios de Ksat, em função da sua magnitude. Neste estudo, adotou-se a *Wavelet* de Morlet e aplicou-se a *Wavelet Coherence* (duas variáveis) and *Multiple Wavelet Coherence* (mais de duas variáveis). Por conseguinte a *Multiple Wavelet Coherence*, de acordo com HU e SI (2016), está baseada em uma série de espectros de potência de onda automática e cruzada, em diferentes escalas e locais espaciais (ou temporais) com a variável resposta e com todas as variáveis preditivas.

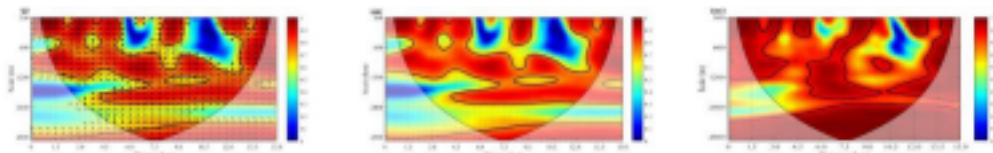
Destaca-se que todos os cenários possíveis, com todas as dimensões, foram modelados por meio de *wavelets*, contudo foram apresentados apenas os que contiveram a maior área de coerência significativa dentro de cada dimensão. Posteriormente, as variáveis contidas nos cenários selecionado, de cada dimensão, foram escalonadas e incorporadas como dados de entrada nos modelos de espaço de estados.

O código em MATLAB de GRINSTED et al. (2004), foi usado para a elaboração dos espectros das *Wavelets Coherence*, enquanto que a rotina para elaborar as *Multiple Wavelets Coherence* está disponível no suplemento de HU e SI (2016). Os modelos de espaço de estados foram obtidos por meio do *software* Matlab versão R2018a.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As áreas significativas dos espectros das *Wavelets* utilizados para selecionar as variáveis preditoras de maior e menor influência de Ksat estão descritos na Tabela 1. A maior área significativa dentre os modelos gerados foi de 56,2%, quando incorporando a macroporosidade argila e o uso do solo, contudo esta área significativa foi bem semelhante quando se utilizou da macroporosidade e uso do solo (53,86%) e apenas macroporosidade (53%). Estimando o Log Ksat apenas a partir da macroporosidade observa-se que esta abrange todas as posições, porém, não possui espectro significativo na escala de 2400 a 4000m (Figura 1A), sendo que ao incorporar à macroporosidade o uso do solo (Figura 1B), pouca alteração se encontra nas áreas significativas.

Figura 1 - Espectro da Wavelets Coherence entre a Ksat e da macroporosidade (A), *Multiple Wavelet Coherence* entre a Ksat, macroporosidade e o uso do solo (B), *Multiple Wavelet Coherence* entre a Ksat, macroporosidade, o uso do solo e argila (C), pertencentes a BHAF.



Porém, esta variabilidade significativa torna-se mais intensa ao incorporar a argila (Figura 1C), bem como ocorre uma maior predominância tanto em escala como em posição da área total significativa. Mostrando então que esta equação é capaz de melhor descrever o Log Ksat em todas as escalas e posições.

Por conseguinte, a menor área significativa de 11,20%, foi encontrada

quando empregando apenas a elevação, na estimativa do Log Ksat. As Equações do Log Ksat geradas pelos modelos de espaço de estados (expressas como Log₁₀), e valores de seus coeficientes de determinação (r²) (Tabela 1), calculados através de regressões lineares entre os valores medidos e estimados de Ksat, mostram que a variabilidade do Log Ksat explicado por meio apenas da macroporosidade foi de 80% já ao utilizar-se do Log Elev este percentual de variância explicada diminui para 47%.

Tabela 1 - Equações de espaço de estado do log₁₀ da Ksat usando as melhores e as piores combinações definidas com base nas áreas significativas das *wavelets*.

Equação	Área Significativa	r ²
(Log Ksat) _i = 2,464(Log Ksat) _{i-1} - 1,511(Macro) _{i-1} + w _i 53,30	0,80	(Log Ksat) _i = 1,006(Log Ksat) _{i-1} - 3,199(Log Elev) _{i-1} + w _i 11,20
0,45 (Log Ksat) _i = 1,763(Log Ksat) _{i-1} - 1,241(Macro) _{i-1} - 0,487(Log Uso) _{i-1} 53,86	0,85	(Log Ksat) _i = 0,975(Log Ksat) _{i-1} + 0,037(Ds) _{i-1} - 0,004(Log Uso) _{i-1} + w _i 13,26
0,47 (Log Ksat) _i = -0,261(Log Ksat) _{i-1} + 0,836(Argila) _{i-1} + 0,644(Macro) _{i-1} - 0,207(Log Uso) _{i-1} + w _i 56,20	0,99	(Log Ksat) _i = 0,179(Log Ksat) _{i-1} + 0,428(Log Elev) _{i-1} + 0,155(Ds) _{i-1} + 0,236(Log Uso) _{i-1} + w _i 25,72
0,30 (Log Ksat) _i = 0,118(Log Ksat) _{i-1} + 0,419(Log Elev) _{i-1} + 0,066(Macro) _{i-1} + 0,070(Ds) _{i-1} + 0,331(Log Uso) _{i-1} + w _i 49,64	0,99	(Log Ksat) _i = 0,089(Log Ksat) _{i-1} + 0,368(Log Elev) _{i-1} + 0,196(Argila) _{i-1} + 0,119(Ds) _{i-1} + 0,230(Log Uso) _{i-1} + w _i 16,60
0,33 (Log Ksat) _i = -0,323(Log Ksat) _{i-1} - 0,275(CO) _{i-1} + 0,987(Argila) _{i-1} + 0,743(Macro) _{i-1} + 0,108(Ds) _{i-1} - 0,225(Log Uso) _{i-1} + w _i 43,20	0,99	(Log Ksat) _i = 0,425(Log Ksat) _{i-1} + 0,395(Log Elev) _{i-1} + 0,649(CO) _{i-1} - 0,618(Argila) _{i-1} + 0,204(Ds) _{i-1} - 0,049(Log Uso) _{i-1} + w _i 27,00
0,67 -0,123(Log Ksat) _{i-1} + 0,311(Log Elev) _{i-1} + 0,277(CO) _{i-1} + (Log Ksat) _i = 0,184(Ds) _{i-1} - 0,120(Log Uso) _{i-1} + w _i 43,90	0,99	0,054(Argila) _{i-1} + 0,427(Macro) _{i-1} + w _i

Ksat: Condutividade hidráulica de solo saturado; Elev: Elevação; CO: Carbono Orgânico; Argila: Argila; Macro: Macroporosidade; Ds: Densidade do Solo e Uso: Tipos de Uso do solo.

Este percentual aumenta para 85%, na *Multiple Wavelet Coherence* quando se utiliza da macroporosidade e do uso do solo para explicar o Log Ksat. Destaca-se que ao utilizar-se da *Multiple Wavelet Coherence*, para definir cenários com dimensões de 4 a 7 variáveis, a variância explicada é de 99%, sendo que todas as equações de melhor desempenho, e por conseguinte, com maior área significativa apresentam a macroporosidade em sua composição.

As propriedades básicas do solo, como frações texturais, têm sido amplamente utilizadas para prever Ksat, contudo a incorporação das propriedades topográficas é algo mais recente (SHE et al., 2017), porém, estas não apresentaram um bom desempenho para a estimação da Ksat neste estudo.

Já o uso do solo apresentou resultados satisfatórios neste estudo, LIZAGA et al. (2019), relatam que as atividades humanas e o manejo da terra podem ter um efeito adicional na reformulação das propriedades do solo no espaço e, portanto, na distribuição espacial delas dentro de uma bacia hidrográfica.

4. CONCLUSÕES

Com base nas *Wavelet Coherence* e *Multiple Wavelet Coherence* foi possível identificar as variáveis, bem como o conjunto de variáveis, que melhor explicam o Log Ksat, tendo como base a abrangência em escalas e posições da sua área de significância da transeção espacial de 15km estabelecida na bacia hidrográfica do Arroio Fragata.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pelo aporte físico e financeiro aos bolsistas envolvidos no presente trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BESKOW, SAMUEL et al. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, [s.l.], v. 61, n. 14, p.2567-2578, 15 jul. 2016.
- BISWAS, ASIM. Scale–location specific soil spatial variability: A comparison of continuous wavelet transform and Hilbert–Huang transform. **Catena**, [s.l.], v. 160, p.24-31, jan. 2018.
- CHEROBIM, VEREDIANA FERNANDA et al. Soil surface sealing by liquid dairy manure affects saturated hydraulic conductivity of Brazilian Oxisols. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 203, p.193-196, abr. 2018. Elsevier BV.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212 p.
- Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 1, 2nd ed Agronomy Monograph Vol. 9. ASA-SSSA, Madison, WI, pp. 383–411.
- GRINSTED, A.; MOORE, J. C.; JEVREJEVA, S. **Application of the cross wavelet transform and waveletcoherence to geophysical time series**. *Nonlinear Processes in Geophysics*, European Geosciences Union (EGU), 2004. N. 11 .561-566.p
- HU W, SI BC, BISWAS A, CHAU HW. Temporally stable patterns but seasonal dependent controls of soil water content: Evidence from wavelet analyses. **Hydrol Proc**. 2017. 31 v. 3697-3707p.
- LI, Xiangdong; SHAO, Ming'an; ZHAO, Chunlei. Estimating the field capacity and permanent wilting point at the regional scale for the Hexi Corridor in China using a state-space modeling approach. **Journal of Soils and Sediments**, [s.l.], p.1-12, 9 abr. 2019.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2ª edição. São Paulo, EDUSP, 2012. 346 p.
- LIZAGA, Ivan et al. Linking land use changes to variation in soil properties in a Mediterranean mountain agroecosystem. **Catena**, [s.l.], v. 172, p.516-527, jan. 2019. Elsevier BV.
- REICHARDT, Klaus; TIMM, Luís Carlos. **Soil, Plant and Atmosphere: Concepts, Processes and Applications**. [s.i.]: Springer International Publishing, 2020. 456 p.
- PICCIAFUOCO, Tommaso et al. On the estimation of spatially representative plot

scale saturated hydraulic conductivity in an agricultural setting. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 570, p.106-117, mar. 2019.

SHE, D. et al. Multi-scale correlations between soil hydraulic properties and associated factors along a Brazilian watershed transect. **Geoderma**, [s.l.], v. 286, p.15-24, jan. 2017. Elsevier BV.

SHUMWAY, R.H. **Applied statistical time series analyses**. Prentice Hall, Englewood Cliffs. 1988.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2ª edição. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia/UFRGS, 1995. 174p.