

## MODELO DE DECOMPOSIÇÃO EMPÍRICO BIDIMENSIONAL, NA EXTRAÇÃO DE VARIAÇÕES ESPECÍFICAS INTRÍNSECAS, EM ESCALA E LOCALIZAÇÃO, ENTRE A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO E ATRIBUTOS DO SOLO

LUANA NUNES CENTENO<sup>1</sup>; DIONI GLEI BONINI BITENCOURT<sup>2</sup>; ALESSANDRA DOS SANTOS<sup>3</sup>; ARLAN DA SILVA FERREIRA<sup>4</sup>; CLÁUDIA LIANE RODRIGUES DE LIMA<sup>5</sup>; LUÍS CARLOS TIMM<sup>6</sup>

<sup>1,4,,5,6</sup> Universidade Federal de Pelotas – [luananunescenteno@gmail.com](mailto:luananunescenteno@gmail.com)<sup>1</sup>; [arlansil@yahoo.com.br](mailto:arlansil@yahoo.com.br)<sup>4</sup>; [clrlima@yahoo.com.br](mailto:clrlima@yahoo.com.br)<sup>5</sup>; [luisctimm@gmail.com](mailto:luisctimm@gmail.com)<sup>6</sup>; <sup>2</sup> Universidade Federal do Pampa – [dionibitencourt@unipampa.edu.br](mailto:dionibitencourt@unipampa.edu.br)<sup>2</sup>; <sup>3</sup> Universidade Estadual do Oeste do Paraná - [alessandra.santos23@unioeste.br](mailto:alessandra.santos23@unioeste.br)<sup>3</sup>

### 1. INTRODUÇÃO

Os modelos de decomposição empíricos bidimensionais (2DEMD) podem identificar a escala específica de correlações entre propriedades do solo (BISWAS; SI, 2011). Analisam as variações por escala existentes nas propriedades do solo (LOONEY; HEMAKOM; MANDIC, 2015), por meio de um número finito de funções de modo intrínseco (IMF) de acordo com, as escalas dominantes (SHE et al., 2015). De acordo com Huang et al. (2017) estas podem ser aplicadas em dados não estacionários. Derivados de modelos de decomposição empírico tradicional (EMD), desenvolvidos por Huang et al. (1998) e desenvolvidos por Xu, Wang e Xu (2011), baseiam-se também em dados, direto, a posteriori e adaptativa (HUANG et al., 1998), onde determina-se a priori que um determinado tamanho de um domínio espacial contenha vários modos oscilatórios simples (ou oscilações intrínsecas) de diferentes escalas sobrepostas umas às outras (HUANG; WU, 2008), levando-se em consideração suas localizações espaciais. O 2DEMD extrai as oscilações intrínsecas em diferentes funções do modo intrínseco (IMF). Estes IMF separam as variações das séries de dados originais em escalas dominantes, que estão presentes na série de dados.

De forma simplificada, descreve-se os 2DEMD em etapas: primeiro, usando um algoritmo, no qual pode-se obter a função do modo intrínseco (IMF); segundo, aplicando a transformada de Hilbert aos resultados da etapa anterior. Assim, o espectro de frequência instantâneo da sequência inicial não lineares e não estacionárias é obtido (ZHU et al., 2020).

Ao contrário das transformadas de Fourier e Wavelet, os 2DEMD decompõe todos os dados fornecidos para funções de modo intrínseco (IMF) que são definidas analiticamente, mas determinadas por uma sequência analisada separadamente. Nesse caso, as funções básicas são derivadas diretamente dos dados de entrada de uma forma adaptada (HUANG et al., 2017; ZHU et al., 2020).

Neste contexto, os 2DEMD, vem sendo explorado internacionalmente no estudo da variabilidade espacial de atributos do solo, porém não existem estudos, desta natureza, envolvendo a condutividade hidráulica de solo saturado.

A condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) merece destaque, pois é um dos principais atributos físico-hídricos que expressa a dificuldade ou a facilidade com que a água se movimenta em um perfil de solo (CHEROBIM et al., 2018). Tem sido usada na simulação hidrológica de dados de vazão e em estudos de dinâmica da água e de solutos no sistema Solo-Planta-Atmosfera (REICHARDT; TIMM, 2020).

Na maioria das vezes, a Ksat apresenta alta variabilidade espacial e temporal (NOBORIO et al., 2017), complexidade em se obter medições contínuas e precisas (GHANBARIAN, 2021). Também apresentam uma tendência de não-normalidade e de não-estacionariedade, que devem ser tratadas com ferramentas estatísticas que levem em consideração essas características, como por exemplo, 2DEMD. Este estudo objetivou desvendar as inter-relações em escala e localização existentes entre a condutividade hidráulica do solo saturado e atributos físico e topográfico, através do modelo de decomposição empírico bidimensional em escala de bacia hidrográfica.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Descrição do local de estudo

O estudo foi realizado em uma Bacia Hidrográfica denominada Bacia Hidrográfica Sanga Ellert (BHRE), que possui uma área de aproximadamente 700.000 m<sup>2</sup>, está inserida na Bacia do Arroio Pelotas, localizada no município de Canguçu-RS. A BHRE foi selecionada devido à sua importância econômica e social para o município de Canguçu, que é considerado o município com o maior número de minifúndios do Brasil, possuindo cerca de 14 mil propriedades rurais.

### 2.2. Obtenção dos dados

Amostras indeformadas de solo foram coletadas em 184 pontos de amostragem na camada de 0,00 a 0,20m, em um grid irregular, usando cilindros metálicos com altura de 5,0cm e diâmetro interno de 4,8cm. Em cada ponto amostral, foram determinadas as seguintes propriedades físico-hídricas: Macroporosidade (EMBRAPA, 1997) e Condutividade hidráulica do solo saturado (LIBARDI, 2012). A partir do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente, foi obtido o atributo topográfico Elevação (Elev).

### 2.3. Modelo de decomposição empíricos bidimensional (2DEMD)

O 2DEMD, foi empregado para separar a variação geral dos atributos envolvidos neste estudo em diferentes componentes de escala de função de modo intrínseco (IMFs) (BISWAS, 2018; HUANG; WU, 2008). O 2DEMD do conjunto de dados espaciais bidimensionais é definido de acordo com a Equação 1.

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^N c_i(x, y) + r(x, y) \quad (1)$$

Em que  $z(x, y)$  representa os atributos físicos, hídricos e topográficos do solo com as suas coordenadas espaciais, ou seja, de forma bidimensional;  $c_i(x, y)$ , são as IMFs geradas com N-1 e  $r(x, y)$  descreve-se como o resíduo. Sendo que, o processo pode ser descrito de acordo com Huang et al. (2017), da seguinte maneira: 1) Se os dados foram coletados em uma grade regular, calcular-se a vizinhança de cada ponto do conjunto de dados de entrada ( $z(x, y)$ ) usando seu k- vizinho mais próximo; no caso de irregular a função *tri.mesh* do pacote '*tripack*', pode ser usada para criar uma triangulação de dados. 2) Encontrar-se pontos extremos locais (mínimos e máximos) para o conjunto de dados de entrada. Um extremo local é definido como um ponto cujo valor é menor ou maior do que todos os seus vizinhos. 3) Interpolar-se os pontos mínimos e máximos para cada local no conjunto de dados de entrada usando *splines* B de vários níveis, conforme implementado no pacote MBA do software R (FINLEY; BANERJEE, 2014). 4) Calcular-se o envelope ( $e$ ), definido como os valores médios dos mínimos interpolados e pontos máximos. 5) Extrair-se os detalhes ( $d(x, y) = z(x, y) - e$ ). 6) Substituir-se  $z(x, y)$  por  $d(x, y)$  e repetir-se as etapas 2 a 5 até que  $c(x, y)$  seja satisfeito Critérios IMF (isto é,  $c_i(x, y) = d(x, y)$ ). 7) Substituir-se  $z(x, y)$  por  $\sum_{i=1}^N c_i(x, y)$  e recomeça-se pelo passo 2 até que será obtido um resíduo monotônico.

Destaca-se que o número máximo de IMFs será selecionado empiricamente tendo ciência de que o aumento nesse valor não produzirá IMFs adicionais. Posteriormente, a porcentagem de contribuição de cada componente da variação geral foi calculada. Todos os procedimentos foram realizados usando um algoritmo EMD bidimensional que foi desenvolvido no software R por meio do pacote "*spemd*" (ROUDIER, 2016). Posteriormente, as IMFs que apresentaram maiores influências dentro de uma mesma escala foram Espacializadas, por meio de Krigagem ordinária, para se analisar o comportamento espacial destas variáveis ao longo da BHSE.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Variações específicas de escala e localização

As estatísticas para todas as IMFs e resíduos de Ksat e dos demais atributos do solo mostram que todas as IMFs apresentaram valores médios próximos a zero e estão normalmente distribuídas. Isso ocorreu devido à natureza da análise dos 2DEMD, uma vez que, ela passa por um processo de dimensionamento quando extraída. A porcentagem de variância foi reduzida nos resíduos e aumentada com o processo de decomposição.

A variação nos dados Ksat, encontrara-se em sua maioria na IMF<sub>3</sub> (54,817%), sendo distribuída a variação restante em ordem crescente na IMF<sub>1</sub> (0,014%), no resíduo (1,177%), na IMF<sub>2</sub> (14,423%), na IMF<sub>4</sub> (12,621%), na IMF<sub>5</sub> (7,694%) e na IMF<sub>6</sub> (9,268%). Com relação a macroporosidade sua maior variância também se encontra na IMF<sub>3</sub> (55,045%), sendo distribuída a variação restante em ordem crescente no resíduo (0,810%), na IMF<sub>1</sub> (1,657%), na IMF<sub>6</sub> (2,535%), na IMF<sub>2</sub> (7,499%), na IMF<sub>4</sub> (14,807%) e na IMF<sub>5</sub> (17,647%). E por fim, a elevação apresentou em ordem crescente as seguintes variações: resíduo (0,288%), IMF<sub>6</sub> (0,731%), IMF<sub>4</sub> (4,246%), IMF<sub>1</sub> (8,734%), IMF<sub>5</sub> (9,515%), IMF<sub>2</sub> (13,653%) e IMF<sub>3</sub> (62,833%).

Observa-se que as 3 variáveis apresentam a maior variação dentro da IMF<sub>3</sub>. Mostrando assim que existe uma relação entre os atributos, condutividade hidráulica de solo saturado, estrutural do solo (macroporosidade) e o atributo topográfico na variabilidade do solo dentro da IMF<sub>3</sub>. Desta maneira as IFMs serviram como um filtro, que retirou os ruídos, ou as influências de outros fatores.

### 3.2. Variações específicas das IMF3

A análise geoestatística realizada por meio de semivariogramas, utilizando o estimador clássico (MATHERON; 1963), mostrou que todos os atributos apresentaram dependência espacial, ajustando-se o modelo teórico gaussiano, que apresentou os melhores resultados na validação cruzada, por mínimos quadrados ordinários ao semivariograma experimental. Todas as IMF<sub>3</sub> analisadas apresentaram fator de anisotropia geométrica. Sendo que a IMF<sub>3</sub> da Ksat, da Macroporosidade e da Elevação respectivamente apresentaram a direção de maior alcance com 154°, 5,65° e 120°.

Nestas direções o alcance da IMF<sub>3</sub> da Ksat, Macroporosidade e Elevação, resultou respectivamente em, 148,53m, 296,67m e 602,35m. Já o efeito pepita destas IFMs estiveram respectivamente iguais a 0,00007, 0,670 e 0,542. Posteriormente através da análise da variabilidade espacial, foi possível observar que a IMF<sub>3</sub> da Ksat (Figura 1A), macroporosidade (Figura 1B) e elevação (Figura 1C), apresentaram similaridade entre seus padrões de distribuição espacial.

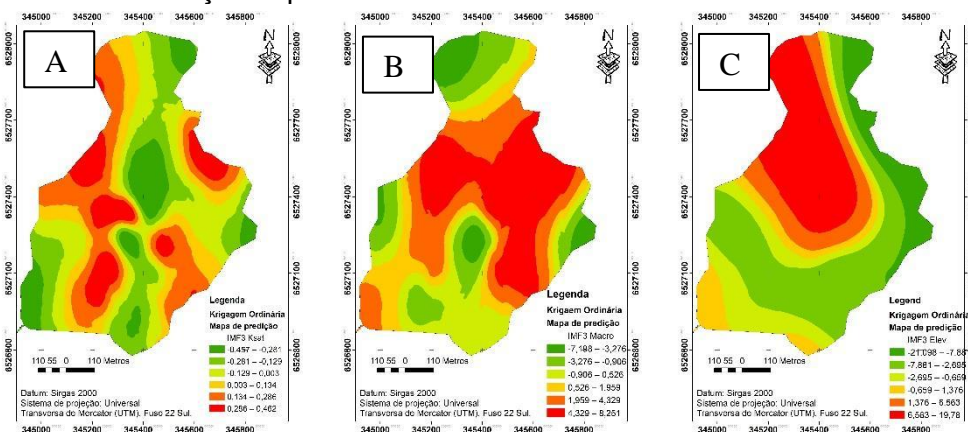


Figura 1: Variabilidade espacial das IMF3.

A Ksat (Figura 1A) e a macroporosidade (Figura 1B) apresentaram padrões mais semelhantes em diferentes regiões em relação a elevação. A alta semelhança da Ksat com a macroporosidade indica um ganho ao considerar que a macroporosidade é um indicador da estrutura e da qualidade física de solos (Zhang et al., 2019).

## 4. CONCLUSÕES

Por meio deste estudo foi possível concluir que existe uma relação entre os atributos avaliados que se encontra na IMF<sub>3</sub>. Ademais na análise da variabilidade foi possível identificar os padrões de distribuição espacial entre os atributos Condutividade hidráulica do solo saturado, Elevação e Macroporosidade. Onde constatou-se que a macroporosidade possui características de variabilidade espacial muito semelhantes às da Ksat. Contudo em futuros estudos deve-se explorar a capacidade da macroporosidade dentro da IMF<sub>3</sub> em estimar a Ksat em escala de bacia hidrográfica.

### Agradecimentos

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, pelo aporte físico e financeiro, bem como aos envolvidos no presente trabalho.

### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BISWAS, Asim. Scale–location specific soil spatial variability: a comparison of continuous Wavelet transform and hilbert-huang transform: A comparison of continuous Wavelet transform and Hilbert–Huang transform. **Catena**, [s.l.], v. 160, p. 24-31, jun. de 2021.
- CHEROBIM, V. F., 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.
- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo. 2.ed.** Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.
- FINLEY, A.O., Banerjee, S., 2014. **MBA: Multilevel B-spline Approximation**. R Package Version 0.0-8. Disponível em: "<<https://CRAN.R-project.org/package=MBA>>". Acesso em: 30 de jul. 2021.
- GHANBARIAN, Behzad. Unsaturated hydraulic conductivity in dual-porosity soils: percolation theory. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 212, n. 1, p. 1-12, ago. 2021.
- HUANG, JINGYI; et al. Unravelling scale- and location-specific variations in soil properties using the 2-dimensional empirical mode decomposition. **Geoderma**, [S. l.], v. 307, n. 2, p. 139–149 2017.
- HUANG, NORDEN E.; et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [S. l.], v. 454, n. 1971, p. 903–995, 1998.
- HUANG, NORDEN E.; WU, ZHAOHUA. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. **Reviews of Geophysics**, [S. l.], v. 46, n. 2, p. RG2006, 2008.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2a ed. São Paulo, EDUSP, 2012. 346
- LOONEY, DAVID; HEMAKOM, APIT; MANDIC, DANILO P. Intrinsic multi-scale analysis: a multi-variate empirical mode decomposition framework. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [S. l.], v. 471, n. 2173, p. 20140709, 2015.
- MATHERON, G. **Principles of geostatistics**. El Passo: Economic Geology, 58 v, 1963.
- NOBORIO, K. et al. A new and simple method for measuring in situ field-saturated hydraulic conductivity using a falling-head single cylinder. **Paddy Water Environ** 16, 81–87, 2018.
- p. ISBN-13: 978-8531413841.
- REICHARDT, K., TIMM, L. C. **Soil, Plant and Atmosphere: concepts, processes and applications**. 1 ed. Springer, Basel. 2020.
- Roudier, P., 2016. **Spemd: A Bi-dimensional Implementation of the Empirical Mode Decomposition for Spatial Data**. R Package Version 0.1-0. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.58317>. Available online at: <https://github.com/pierrerroudier/spemd>.
- SHE, Dongli; et al. Multivariate Empirical Mode Decomposition Derived Multi-Scale Spatial Relationships between Saturated Hydraulic Conductivity and Basic Soil Properties. **CLEAN - Soil, Air, Water**, [S. l.], v. 43, n. 6, p. 910–918, 2015.
- XU, G. L.; WANG, X. T.; XU, X. G. Improved bi-dimensional empirical mode decomposition based on 2D-assisted signals: analysis and application. **IET Image Processing**, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 205, 2011.
- ZHANG X., et al. Effect of macroporosity on pedotransfer function estimates at the field scale. **Vadose Zone J** 18:1–12, 2019.
- ZHU, H.; et al. Revealing the 2D–scale, location–specific variations of soil properties in the coal mining area of Changhe watershed, China. **Land Degradation and Development**, [S. l.], n. 765, 2020.