MARCADORES DO ANTROPOCENO EM SISTEMAS FLUVIAIS MEÂNDRICOS-TRAÇOS DE CÉSIO-137 NO VALE DO RIBEIRA (SP)

Breno Schmidtke Rodrigues [1]
Cleide Rodrigues [2]
Rubens Cesar Lopes Figueira [3]

RESUMO

Nas últimas décadas, diferentes investigações em geomorfologia enfatizam a relevância do fator antrópico em mudanças nos atributos e operação de bacias hidrográficas, canais e planícies fluviais em diferentes contextos de apropriação. Um aspecto relevante na interface entre antrópico e sistemas fluviais, porém pouco explorado, é a interação entre estes sistemas e materiais antropogênicos, em especial nas tendências de circulação e armazenamento destas partículas em canais e planícies fluviais. Uma abordagem promissora para esta investigação, é o uso de marcadores do Antropoceno, definidos como assinaturas estratigráficas e geoquímicas capturadas por sistemas superficiais e que podem contribuir em avaliações de impacto e discussões geocronológicas. Dentre esses marcadores, destaca-se o césio-137, um radionuclídeo artificial disseminado globalmente a partir de testes atmosféricos de bombas nucleares entre as décadas de 1950 e 1970. A avaliação da espacialidade de traços deste radionuclídeo em materiais aluviais pode auxiliar a identificar parâmetros-chave de sua circulação e tendências de armazenamento e mobilização em diferentes compartimentos fluviais, em especial em planícies fluviais meândricas. Neste contexto, o presente estudo objetivou avaliar a ocorrência de traços de césio-137 em um trecho da planície fluvial meândrica do rio Ribeira de Iguape, entre os municípios de Eldorado e Sete Barras (SP), considerando a representatividade hidrogeomorfológica e alto grau de preservação da área. Considerou-se como hipótese que o radionuclídeo apresentava comportamento espacialmente descontínuo, com ocorrência variável entre os diferentes setores hidromorfodinâmicos da planície fluvial. A metodologia de pesquisa abrangeu a análise comparativa baseadas em parâmetros hidrogeomorfológicos, pedogeoquímicos e de atividade do radionuclídeo entre 4 testemunhos de sondagem coletados em margem côncava do canal fluvial, nível principal de planície de inundação, bacia de decantação e meandro abandonado em estágio final de colmatação. Para obtenção de dados

[1] Mestre em Geografia Física da Universidade de São Paulo - USP, brenoschimdtke@gmail.com;
[2] Professora Orientadora: Doutora em Geografia Física, Universidade de São Paulo - USP, cleidrig@usp.br;
[3] Professor Co-orientador: Doutor em Química, Universidade de São Paulo - USP, rfigueira@usp.br

realizou-se caracterização do meio físico da área de estudo baseando-se em revisões de literatura, trabalhos de campo para coleta de amostras e descrições *in situ*, ensaios laboratoriais incluindo espectrometria gama, XRF e pH, e por fim, a organização dos dados, cálculo da relação Fe/K e interpretação das tendências e correlações espaciais. Verificou-se que os todos os testemunhos apresentaram traços de césio-137, porém com diferentes atividades, sugerindo acumulação espacialmente distintas, confirmando a hipótese inicial. Os testemunhos coletados na bacia de decantação e meandro abandonado apresentaram maiores valores da razão Fe/K e maiores atividades do radionuclídeo, sugerindo maior associação do césio-137 aos processos de sedimentação de carga fina. Os valores de pH, predominantes entre 4 e 5, indicam tendência de mobilidade de césio no interior dos materiais, com potencial migração vertical em associação aos regimes de saturação atuantes. Os resultados sinalizam que a espacialidade do radionuclídeo é vinculada a duas dimensões na planície fluvial: uma dimensão lateral, associada aos processos hidrogeomorfológicos, e uma dimensão vertical, associada a processos e dinâmicas pedogeoquímicas atuantes nos materiais. Por fim, evidenciou-se que a relevância da avaliação de materiais antropogênicos em planícies e canais fluviais, caracterizando um campo promissor de investigação e um aspecto fundamental para discussão de sistemas fluviais no Antropoceno.

INTRODUÇÃO

Sistemas fluviais integram diferentes paisagens e apresentam funcionalidades hidrogeomorfológicas, ecológicas, culturais e socioeconômicas. Ao mesmo tempo, estes sistemas são submetidos a elevados graus de perturbação antrópica em diferentes escalas espaço-temporais, implicando em mudanças em seus atributos e processos. No âmbito específico da geomorfologia, diferentes estudos evidenciam a importância do fator antrópico de mudanças em bacias hidrográficas, planícies e canais fluviais.

Neste contexto, um aspecto relevante porém ainda pouco explorado é o retrabalhamento de materiais antropogênicos em sistemas fluviais, isto é, a circulação de traços de materiais artificiais ao longo de bacias hidrográficas, canais e planícies fluviais. A avaliação da ocorrência de traços de partículas antropogênicas em sedimentos aluviais é relevante na determinação de tendências de circulação em diferentes compartimentos fluviais, auxiliando na identificação de parâmetros-chave que controlam sua interação com o sistema fluvial.

Uma abordagem potencial para esta investigação é o uso de marcadores do Antropoceno, definidos como assinaturas geoquímicas ou estratigráficas de origem

humana, que são incorporadas a sistemas superficiais e capturadas por depósitos sedimentares (Vidas, et. al., 2019). Os marcadores são utilizados como ferramentas para avaliação de impacto humano e discussões do Antropoceno (Waters et. al., 2016).

Um dos principais marcadores do Antropoceno, associado a fase da Grande Aceleração (pós-segunda guerra) é o radionuclídeo césio-137, um isótopo artificial do elemento césio com meia-vida de 30,17 anos, com principal origem associada aos testes atmosféricos de bombas nucleares realizados entre as décadas de 1950 e 1970. O radionuclídeo, produzido na atmosfera, atingiu a superfície por precipitações radioativas denominadas *fallout*, com maior expressão no hemisfério norte e menor alcance no hemisfério sul.

Ao atingir a superfície, em função de sua carga eletricamente positiva, o césio-137 tende a ser adsorvido por grupos funcionais eletricamente negativos do solo, em especial argilominerais e matéria orgânica. Posteriormente, o radionuclídeo é remobilizado por processos superficiais e pode atingir a rede de drenagem e ser transportado e depositado em ambientes fluviais, lacustres ou marinhos. Fatores como mineralogia de argilas, pH, hidrodinâmica, composição e textura de solos e sedimentos afetam a mobilidade do césio na superfície (Campbell, Loughran e Elliott, 1982; Giannakopoulou et. al., 2007).

A avaliação da espacialidade de traços de césio-137 em diferentes compartimentos fluviais pode auxiliar a identificar, com maior precisão, fatores que afetam sua distribuição. Esta investigação torna-se ainda mais relevante em sistemas fluviais meândricas do meio tropical úmido, caracterizados pela alta heterogeneidade espacial, dominância de materiais finos e intensa atuação de processos pedogenéticos, onde a interação com o radionuclídeo adquire maior complexidade.

Neste sentido, o presente estudo abrange a investigação da espacialidade de traços de césio-137 com gênese no *fallout* de testes atmosféricos de bombas nucleares em um setor de sistema fluvial meândrico de meio tropical úmido, a planície fluvial do rio Ribeira de Iguape entre os municípios de Eldorado e Sete Barras (setor ESB) no estado de São Paulo (Figura 1). A escolha da área de estudo se deu em função da (I) representatividade hidrogeomorfológica (II) alto grau de preservação e (III) disponibilidade de investigações anteriores na área, em especial os estudos de Santana (2007) e Veneziani (2019).

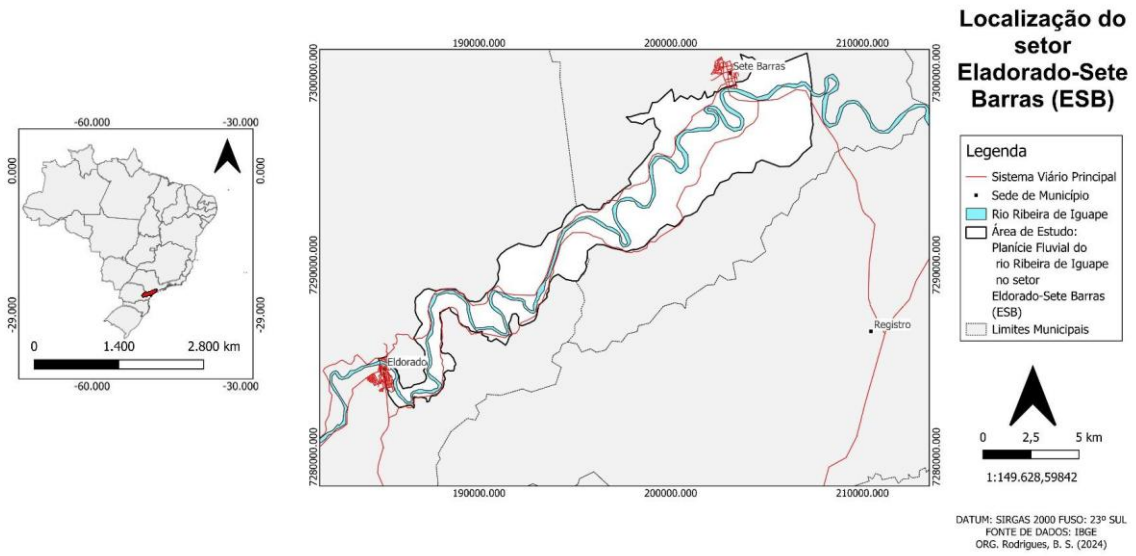

Figura 1: Localização da área de estudo. **Org:** Rodrigues, B. S. (2025)

O estudo considerou como hipótese que o radionuclídeo apresenta comportamento espacialmente descontínuo na área de estudo, com ocorrência variável entre os diferentes compartimentos hidrogeomorfológicos da planície fluvial. O objetivo da pesquisa abrangeu avaliar a ocorrência de traços de césio-137 em materiais superficiais associados a diferentes compartimentos geomorfológicos da planície fluvial do rio Ribeira de Iguape entre Eldorado e Sete Barras (SP).

Os referenciais sobre sistemas fluviais (Knighton, 1998; Stevaux e Latrubesse, 2017) foram a base no desenvolvimento da pesquisa, em especial para caracterização dos processos fluviais da área de estudo. Os processos pedogeoquímicos condicionados por regimes de saturação atuantes em planícies fluviais, em especial as reações de oxirredução e desenvolvimento de feições redoximóficas (Vepraskas e Vaughan, 2016), apresentaram também grande relevância na pesquisa, em especial, para indicação de tendências de mobilidade do radionuclídeo no interior dos materiais do setor ESB.

Outro grupo de referenciais para a pesquisa abrangeu o Antropoceno e a antropogeomorfologia, em especial suas orientações metodológicas para avaliação da ação antrópica em sistemas geomorfológicos indicados em Nir (1983) e Rodrigues (2004). As indicações de Goudie e Viles (2016) sobre materiais antropogênicos em sequências sedimentares (incluindo radionuclídeos, foco deste estudo) como evidências para investigação antropogeomorfológica, em especial para interpretação de mudanças nos processos geomorfológicos também integraram a base teórica da pesquisa.

O Antropoceno foi incialmente proposto por Crutzen e Stoermer (2000) como uma nova época geológica subsequente ao Holoceno, caracterizada pelo rompimento dos limiares de estabilidade do sistema Terra em função das atividades humanas. Alguns marcos importantes para o Antropoceno são a revolução industrial e o período do pós-segunda guerra mundial, chamado de Grande Aceleração. Waters et. al. (2016) indicam que o Antropoceno apresenta distinções estratigráficas e funcionais em relação ao Holoceno, os quais são evidenciados por marcadores específicos. Em 2024, a International Union of Geological Sciences (IUGS) rejeitou a formalização do Antropoceno como unidade cronoestratigráfica, porém indicando que as evidências reunidas até o momento demonstraram a relevância das intervenções humanas na operação dos sistemas superficiais. Neste sentido, o uso dos marcadores, como os radionuclídeos artificias, é válido para avaliação de impacto humano.

A metodologia de pesquisa envolveu a análise comparativa de testemunhos de sondagem coletados em diferentes sub-compartimentos da planície fluvial. A partir dos testemunhos, realizaram-se descrições e ensaios laboratoriais de espectrometria gama, pH e XRF, os quais permitiram organizar dados de picos de atividade de césio-137, pH em água, ΔpH, composição elementar e relação Fe/K. Os dados foram organizados, comparados e correlacionados espacialmente considerando a setorização fluvial.

Verificou-se maiores totais inventariados de césio-137 em compartimentos hidrogeomorfológicos com maiores médias da razão Fe/K, indicando associação do radionuclídeo com processos sedimentares de carga fina. Os picos de césio apresentam diferentes distribuições verticais nos testemunhos, cujo materiais apresentam pH ácido, sinalizando potencial de migração interna do radionuclídeo. Neste sentido, os dados evidenciaram a descontinuidade espacial na distribuição dos traços de césio na planície fluvial, confirmando a hipótese inicial proposta. A presença de traços do radionuclídeo nos testemunhos coletados reforçou a relevância da grande aceleração na produção de assinaturas geoquímicas distintivas nos materiais do sistema fluvial do rio Ribeira de Iguape.

METODOLOGIA (OU MATERIAIS E MÉTODOS)

O procedimento metodológico principal da pesquisa foi a análise comparativa de quatro testemunhos de sondagem coletados na área de estudo, utilizando-se parâmetros hidrogeomorfológicos (compartimento de amostragem), pedogeoquímicos (pH, ΔpH e razão Fe/K) e atividade do radionuclídeo (total inventariado de radionuclídeo, perfil de profundidade e precisão das medidas). Os procedimentos técnicos-operacionais empregados para obtenção e sistematização de dados, por sua vez, foram organizados em 4 etapas subsequentes.

A etapa 1 abrangeu a caracterização de meio físico da área de estudo a partir de revisão bibliográfica de aspectos hidrológicos, geomorfológicos, pedológicos, sedimentológicos do setor ESB. A partir dos resultados desta caracterização, selecionaram-se 4 pontos de amostragem em diferentes setores hidrogeomorfológicos da planície fluvial, incluindo margem côncava de canal fluvial, nível principal de planície de inundação, bacia de decantação e meandro abandonado em grau final de colmatação. Posteriormente, iniciou-se a fase 2, onde realizaram-se trabalhos de campo para coleta dos testemunhos e descrições *in situ*. Utilizou-se método de tração manual para coleta dos testemunhos, com amostras armazenadas em canos de PVC. Em cada ponto de amostragem realizou-se descrições da morfologia fluvial.

Após a coleta de amostras, iniciou-se a fase 3, a qual envolveu ensaios laboratoriais. A princípio, os testemunhos foram abertos e descritos e em seguida, fatiados em intervalos regulares de 2 centímetros, resultando em amostras menores, as quais foram submetidas à secagem em capela ventilada. Após a secagem total, as amostras foram trituradas e acondicionadas em placas de petri. As amostras foram submetidas, então, a detector espectrométrico de alta precisão calibrados por fontes de Co-60 e Cs-137 com tempo de contagem de 50.000 segundos por amostra, obtendo-se o valor dos picos de atividade de césio acima do limite de detecção (acima de 0,66 Bq $Kg{-}1$) e valores de precisão das medidas.

Após a finalização dos ensaios de espectrometria, as amostras foram submetidas ao detector XRF (fluorescência de raio-X) obtendo-se valores de parte por milhão (ppm) de Ferro (Fe) e Potássio (K). O volume restante de amostras foi utilizado para ensaios de pH de água e pH em KCl, onde, a princípio, foram reorganizadas em conjuntos de profundidades maiores, de acordo com as descrições dos testemunhos e, posteriormente, foram desagregadas e peneiradas em malha de 2,0 ml. Para o pH em água, utilizou-se 20 g de amostra misturados em 20 mm de água destilada, submetidas ao pHmetro, e para o

pH em KCl, utilizou-se 20 g de amostras misturada a 20 ml de solução 1 N KCl, submetidas ao pHmetro.

Com a finalização dos ensaios laboratoriais, iniciou-se a fase 4, na qual, inicialmente, realizou-se a tabulação e organização dos dados. Posteriormente, foram calculadas a razão Fe/K e ΔpH por faixas de profundidade (perfis verticais) e, posteriormente, a média de valores de cada testemunho. Por fim os resultados foram avaliados considerando o princípio comparativo proposto, realizando-se correlações espaciais entre os dados laboratoriais e os compartimentos hidrogeomorfológicos de amostragem, avaliando a validade da hipótese inicial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O setor Eldorado-Sete Barras (ESB) é um trecho de planície fluvial meândrica desenvolvido na transição entre o terço médio e inferior do rio Ribeira de Iguape no estado de São Paulo. O setor ESB é setorizado internamente em diferentes compartimentos fluviais (Santana, 2007; Veneziani, 2019), incluindo subsistemas (I) canal fluvial, com canal fluvial ativo do rio Ribeira de Iguape, (II) planície de inundação, com subcompartimentação interna apresentando níveis de planície de inundação, meandros abandonados, cordões marginais convexos, bacias de decantação e diques marginais e (III) terraço fluvial, com níveis de terraço baixo e terraços altos.

Os resultados de espectometria gama confirmaram a presença de traços de Cs-137 no setor ESB, com pico máximo de atividade relacionado temporalmente a 1963 (máximo fallout), caracterizando o radionuclídeo como marcador síncrono e distintivo da Grande Aceleração na área de estudo. A partir da síntese de resultados laboratoriais (Tabela 1) verificou-se valores baixos de césio-137 nos testemunhos de sondagem, compatíveis com a faixa latitudinal do setor ESB (Walling e Quine, 1993). No entanto, observou-se variabilidade dos totais inventariados entre os testemunhos:

- Maior total inventariado no testemunho coletado no canal fluvial, porém com maiores valores de incerteza de medida em comparação as demais amostras. Tal fato relaciona-se, potencialmente, ao aporte contínuo de carga sedimentar no canal fluvial, o qual implica em maior abundância de traços de Cs-137, porém, em função da hidrodinâmica de canal, há maior tendência de remobilização mecânica e menor permanência do radionuclídeo neste setor;

- Nos testemunhos coletados no subsistema planície de inundação, verificou-se maiores totais inventariados nos setores de bacia de decantação e meandro abandonado em relação ao nível principal de planície de inundação, indicando maior acúmulo de césio-137 em setores com tendência de sedimentação de materiais finos, evidenciados, inclusive, pelas médias da razão Fe/K.

Testemunho	Setor de coleta	Total Inventariado Cs-137	Média da razão Fe/K	Média de pH em água	Média de ΔpH
Testemunho 1	Margem côncava de canal fluvial	10,19 Bq Kg^{-1}	1,46	5,30	-0,85
Testemunho 2	Nível principal de planície de inundação	2,65 Bq Kg^{-1}	2,34	5,87	-0,79
Testemunho 3	Bacia de decantação	6,56 Bq Kg^{-1}	2,93	5,01	-0,85
Testemunho 4	Meandro abandonado	6,60 Bq Kg^{-1}	2,49	4,56	-0,4

Tabela 1: Síntese dos resultados laboratoriais. **Org.** os autores, 2025.

Os valores médios de pH observados nos testemunhos indicam dominância de condições ácidas nos materiais (Giannakopoulou et. al., 2007), o que implica em tendência de migração vertical do radionuclídeo em profundidade, com potencial para alteração da sequência original de deposição do radionuclídeo, em especial nos testemunhos coletados no subsistema planície de inundação. A atuação dos processos pedogenéticos, em condições de hidromorfia em diferentes regimes de saturação, implica em condições variáveis de oxidação e redução e desenvolvimento de feições redox. Esta dinâmica pode afetar o balanço de cargas, e consequentemente, o potencial de fixação dos traços de Cs-137 em grupos funcionais eletricamente negativos, cuja disponibilidade é variável entre os testemunhos, conforme evidenciado indiretamente pelas médias de ΔpH.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A variabilidade espacial dos traços de Cs-137 verificada no setor ESB em termos de totais inventariados e perfis de profundidade reforçou a hipótese inicial do estudo, indicando descontinuidades espaciais na acumulação do radionuclídeo na planície fluvial. Neste sentido, o sistema fluvial, em função dos seus processos

hidrogeomorfológicos e pedogeoquímicos, constitui um sistema espacialmente heterogêneo (Wohl, 2016) para interação com o radionuclídeo, com tendências distintas de acumulação e remobilizações, as quais relacionam-se a duas dimensões espaciais (I) dimensão lateral, associada aos processos hidromorfológicos fluviais, e controla a acumulação e permanência dos traços de radionuclídeo nos diferentes setores da planície fluvial e (II) dimensão vertical, associada aos processos pedogeoquímicos atuantes nos materiais da planície, que influenciam nas remobilizações pós-deposição do radionuclídeo e em potenciais perdas internas.

Os resultados inciais orientam para um campo de investigações potencial para geomorfologia fluvial e antropogeomorfologia que abrange a interação de sistemas fluviais, em suas múltiplas escalas e arranjos espaciais com materiais antropogênicos, vinculados ou não aos processos históricos de apropriação humanas destes sistemas. Neste sentido, explorar as dimensões espaciais elencadas e variáveis associadas como magnitude de eventos de inundação, textura de depósitos e mineralogia de argilas constituem passos futuros nestas investigações. O uso de novos marcadores também é promissor, sobretudo por constituírem assinatura distintivas que podem auxiliar a identificar cronologia e sequência da incorporação de traços de partículas antrópicas aos materiais fluviais e, de forma mais abrangente, a própria operação dos sistemas fluviais.

Palavras-chave: Sistemas fluviais meândricos, Antropoceno, Marcadores do Antropoceno, Césio-137, Rio Ribeira de Iguape.

REFERÊNCIAS

CAMPBELL, B. L.; LOUGHRAN, R. J.; ELLIOTT, G. L. Caesium-137 as an indicator of geomorphic processes in a drainage basin system. Australian Geographical Studies, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 49-64, abr. 1982. Wiley. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8470.1982.tb00393.x. Acesso em: 02 mar. 2025.

CRUTZEN, P.J., STROERMER, E.F., 2000. The “Anthropocene”. Glob. Change Newsl., n. p. 41, 17-18.

GIANNAKOPOULOU, F. et. al. Sorption behavior of cesium on various soils under diferente pH levels. Journal Of Hazardous Materials, [S.L.], v. 149, n. 3, p. 553-556, nov. 2007.Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.109. Acesso em 04 mar 2025.

GOUDIE, A. S.; VILES, H. A. Geomorphology in the Anthropocene. New York: Cambridge University Press, 2016. 324 p.

KNIGTHON, D. Fluvial forms and processes: a new perspective. London and New York: Arnold, 1998. 383 p.

NIR, D. Man, a geomorphological agent: an introduction to anthropic geomorphology. Jerusalem: Ketem Pub. House, 1983.

RODRIGUES, C. A urbanização da Metrópole sob a perspectiva da Geomorfologia: Tributo a leituras geográficas. In: Carlos, A. F. A. OLIVEIRA, A. U. de. Geografias de São Paulo: Representações e Crises da Métropole. São Paulo: Editora Contexto, 2004.

SANTANA, C. L. Geomorfologia da planície fluvial do rio Ribeira de Iguape entre Sete Barras e Eldorado (SP): subsídios ao planejamento físico-territorial de áreas inundáveis. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. Geomorfologia Fluvial. São Paulo: Oficina de Texto, 2017. 336 p.

WATERS, C. N. et. al. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. Science, [S.L.], v. 351, n. 6269, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1126/science.aad2622. Acesso em 27 out. 2024.

WALLING, D. E.; QUINE, T. A. Use of Caesium-13 as a Tracer of Erosion and Sedimentation: Handbook for the Application of the Caesium-137 Technique. Exeter: Uk Overseas Development Administration Research Scheme R4579, 1993. 196 p.

VENEZIANI, Y. Inundações em sistemas fluviais meândricos: geomorfologia e hidrologia de paleoinundações aplicadas à identificação de eventos holocênicos extremos no baixo Rio Ribeira de Iguape, Brasil. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

VEPRASKAS, M. J.; VAUGHAN, K. L. Morphological Features of Hydric and Reduced Soils. In: VEPRASKAS, M. J.; CRAFT, C. B. Wetland Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes and Classification. New York: CRC Press, 2016, 2º ed. p. 189-218.

VIDAS, D. et. al. The utility of formalisation of the Anthropocene for Science In: ZALASIEWICZ, J. et. al.. (ed.) The Anthropocene as a geological time unit: a guide to the scientific evidence and current debate. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. p. 31-40.