



HIDRÁULICA DE FLUXOS DE DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS EM MODELO FÍSICO DE VOÇOROCA – EXPERIMENTAÇÃO LABORATORIAL EM GEOMORFOLOGIA

Julio Cesar Paisani ¹
Rafael Manica ²
Cristian Valenti Schenk ³
Matheus Vinícius dos Santos ⁴

RESUMO

O presente trabalho traz resultados da hidráulica de fluxos com diferentes concentrações de sedimentos (baixa, transicional e alta densidades) gerados em modelo físico de voçoroca, contribuindo para compreender o fenômeno de preenchimento de voçorocas, sejam modernas ou quaternárias. A experimentação totalizou em 150 repetições com variadas concentrações de sedimentos. Para cada fluxo foram mensuradas vazão, velocidade média dos fluxos, profundidade média do fluxo, tempo de ocorrência do fluxo, concentração volumétrica dos fluxos (C_v), números de Froude e Reynolds. Regime supercrítico e escoamento turbulento dominou fluxos de baixa concentração de sedimentos (C_v 0-10%). Regime supercrítico com escoamento na zona de transição entre turbulento e laminar caracterizou fluxos com $C_v > 10$ -25%. Regime supercrítico com escoamento na zona de transição entre turbulento a laminar e supercrítico com escoamento laminar ocorreu em fluxos com elevada concentração volumétrica ($C_v > 25$ <50%). Fluxos $C_v < 10\%$ correspondem a fluxos de baixa densidade. Já fluxos com regime supercrítico e na zona de transição entre laminar e turbulento ($C_v > 10$ -25%) podem corresponder a fluxos de densidade transicional (baixa-alta densidades). Ao passo que fluxos com regime supercrítico-zona de transição e supercrítico-laminar devem corresponder a fluxos de alta densidade ($C_v > 25$ <50%). A futura correlação dos parâmetros hidráulicos com volumes de material sedimentado no interior do modelo físico permitirá compreender o fenômeno de preenchimento de voçorocas, sejam modernas ou quaternárias.

Palavras-chave: Modelo físico geomorfológico, Voçoroca, Fluxo de densidade.

INTRODUÇÃO

O Núcleo de Estudos PaleoAmbientais (NEPA-UNIOESTE) tem se dedicado ao estudo de Geomorfologia do Quaternário, sobretudo do Planalto Vulcânico da Bacia do Paraná (PVBP), Sul do Brasil. Resultados acerca da dinâmica das paisagens regionais têm sido publicados nos últimos anos (ex. Paisani et al., 2019; 2023a) e permitem reconhecer

¹ Docente do Núcleo de Estudos PaleoAmbientais-NEPA da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Francisco Beltrão - PR, juliopaisani@hotmail.com;

² Docente do Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade-NECOD da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH (RS), manica@iph.ufrgs.br;

³ Técnico de Laboratório do Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade-NECOD da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH (RS), cristian.schenk@ufrgs.com;

⁴ Doutorando e membro do Núcleo de Estudos PaleoAmbientais-NEPA da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Francisco Beltrão - PR, matheusvini.geo@gmail.com.



eventos de pedogênese e de morfogênese, ambos condicionados por regimes paleoclimáticos específicos. A morfogênese nas encostas ganhou destaque enquanto principal evento de dinâmica das paisagens quaternárias. Nós temos utilizado dos princípios e técnicas estratigráficas para descrever tanto os materiais quando as estruturas sedimentares de depósitos de encosta em bacias de baixa ordem ($< 4^{\text{a}}$ ordem). Um fenômeno morfogenético recorrente no PVBP são paleovoçorocas que ocorrem, sobretudo, em *hollows* de bacias de 1^{a} ordem (paleocabeceiras de drenagem).

Paleovoçorocas são voçorocas inativas que foram preenchidas e enterradas por sedimentos quaternários passíveis de serem identificadas nos registros estratigráficos pela estrutura de corte-preenchimento (Botha et al, 1994). Os preenchimentos são vistos enquanto fases específicas de dinâmica da paisagem, onde a morfogênese natural e/ou antrópica atuou após períodos de pedogênese. Embora as *paleogullies* sejam consideradas geoarquivos provendo informações quanto a dinâmica da instabilidade da paisagem (Paisani et al., 2019), pouco se sabe sobre o fenômeno de preenchimento natural. Diante disso, ainda há uma lacuna de conhecimento a respeito do fenômeno de preenchimento de paleovoçorocas. O estudo a partir de informações sedimentológicas e estratigráficas nem sempre são suficientes para compreender esse processo, sobretudo pela limitação das informações obtidas exclusivamente de seções estratigráficas. Uma forma de contornar isso é aplicar o princípio do atualismo e estudar um fenômeno de preenchimento de voçoroca a partir de experimentação física em laboratório.

A experimentação física em laboratório tem emergido como uma abordagem metodológica importante no estudo dos processos geomorfológicos e serve como meio de testar hipóteses quanto as variáveis envolvidas nos processos geomórficos (Paola et al., 2009; Bennet et al., 2015). Nós temos utilizado dessa ferramenta na compreensão da organização sedimentológica de depósitos gerados pelo escoamento superficial (Paisani et al., 2023b,c), por vezes, confrontando com descrições de depósitos naturais modernos (Paisani et al., 2023d). Essa técnica tem se mostrado muito oportuna, assim, optamos por aplicá-la para testar a hipótese de que o preenchimento de paleovoçorocas, dentre outros fatores favoráveis ao barramento dos fluxos no talvegue, decorreria de fluxos com significativa concentração de sedimentos (fluxos transicionais a alta densidade – Dasgupta, 2003). Assim, o presente trabalho traz resultados da hidráulica de fluxos com diferentes concentrações de sedimentos (baixa, transicional e alta densidades) gerados em



modelo físico de voçoroca, contribuindo para compreender o fenômeno de preenchimento de voçorocas, sejam modernas ou quaternárias.

A experimentação totalizou em 150 repetições com variadas concentrações de sedimentos. Para cada fluxo foram mensuradas vazão, velocidade média dos fluxos, profundidade média do fluxo, tempo de ocorrência do fluxo, concentração volumétrica dos fluxos (C_v), números de Froude e Reynolds. Regime supercrítico-turbulento dominou fluxos de baixa concentração de sedimentos (C_v 0-10%), enquanto regime supercrítico-transicional (turbulento-laminar) caracterizou fluxos com $C_v > 10$ -25%, e regime supercrítico-transicional/supercrítico-laminar foi predominante em fluxos com elevada concentração volumétrica ($C_v > 25$ -50%). Fluxos $C_v < 10\%$ correspondem a fluxos de baixa densidade. Já fluxos com regime supercrítico-transicional (turbulento-laminar) ($C_v > 10$ -25%) podem corresponder a fluxos de densidade transicional (baixa-alta densidades). Ao passo que fluxos com regime supercrítico-transicional/supercrítico-laminar devem corresponder a fluxos de alta densidade ($C_v > 25$ -50%). A futura correlação dos parâmetros hidráulicos com volumes de material sedimentado no interior do modelo físico permitirá compreender o fenômeno de preenchimento de voçorocas, sejam modernas ou quaternárias.

MATERIAIS E MÉTODOS

Definição de Modelo Físico de Voçoroca

Nós confeccionamos um modelo reduzido de uma voçoroca no Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade – NECOD-IPH/UFRGS em escala geométrica e cinemática de 1:100. Como referência foram utilizados dados empíricos de duas voçorocas, uma da categoria de voçoroca clássica situada em Rio Preto da Eva-AM e outra da categoria de voçoroca efêmera descontínua encontrada em Palmeira-PR (Paisani; Oliveira, 2001; Paisani et al., submetido). A primeira fundamentou a definição da escala geométrica, com base em perfil topográfico longitudinal do talvegue e três seções transversais. Ao passo que os dados hidráulicos da segunda permitiram definir as variáveis para a escala cinemática/dinâmica. O modelo físico corresponde a uma morfologia universal de voçoroca (modelo tridimensional de geometria fixa simplificada – Tab.1; Fig. 1), haja vista que as paleovoçorocas quaternárias encontradas no mundo real nos planaltos do sul do Brasil não são completamente expostas, geralmente detectadas em afloramento diante da morfologia em V ou U de seções transversais com completo preenchimento (Biffi e



Paisani, 2021; Gazola, 2020; Paisani et al. 2019; 2023a; Pagotto et al., 2020; Pietrobelli et al., 2019; Oliveira et al., 2008).

Tabela 1. Parâmetros geométricos do modelo físico (geometria fixa) de voçoroca universal.

Setor	Morfologia	Parâmetros				
		Transversal			Longitudinal	
		Si ¹	Largura (m)	Profundidade (m)	Comprimento talvegue (m)	Desnível talvegue (m m ⁻¹)
Cabeça (P1)	V	0,25	15	10	0	0
Cabeça (P2)	V	0,25	15	10	0,12	0,38
Corpo (P3)	U	0,78	20	15	0,52	0,54
Corpo (P4)	U	0,75	23	12	0,38	0,27
Desembocadura (P5)	U	0,75	23	12	0,15	0,02
Total	-		-	-	1,17	1,21

¹ Si=índice de forma (shape index) proposto por Gabet and Bookter (2008) (Si) para distinguir entre forma da seção transversal de uma dada voçoroca natural em U ou V.

O modelo físico de voçoroca foi estabelecido dentro de uma caixa de acrílico de 2 m de comprimento por 0.24 m de largura, tendo por base o clássico método de construção baseado em gabaritos transversais (Morgan, 1975). Os parâmetros de largura e profundidade transversais calculados a partir da redução da escala de 1:100 foram a base para estabelecer gabaritos em papel de cinco seções transversais (códigos P1-P5), sendo duas em V e três em U (Tab. 1; Fig. 1a). Os gabaritos em papel orientaram a confecção de gabaritos definitivos em madeira, os quais foram fixados em base de madeira de 1,33 m de comprimento com equidistâncias conforme o comprimento longitudinal do talvegue entre as seções transversais obtido em escala (Fig. 1b). Os espaços entre os gabaritos foram preenchidos com dois materiais arenosos, borracha e quartzo/feldspato (areia quartzosa) natural. A areia de borracha foi colocada na base enquanto a areia quartzosa, previamente umedecida, foi moldada seguindo a morfologia dos gabaritos transversais (Fig. 1c, d). Ao final, foi pulverizado cimento sobre a areia quartzosa molhada de modo a criar uma superfície rígida e rugosa (Fig. 1e, f).

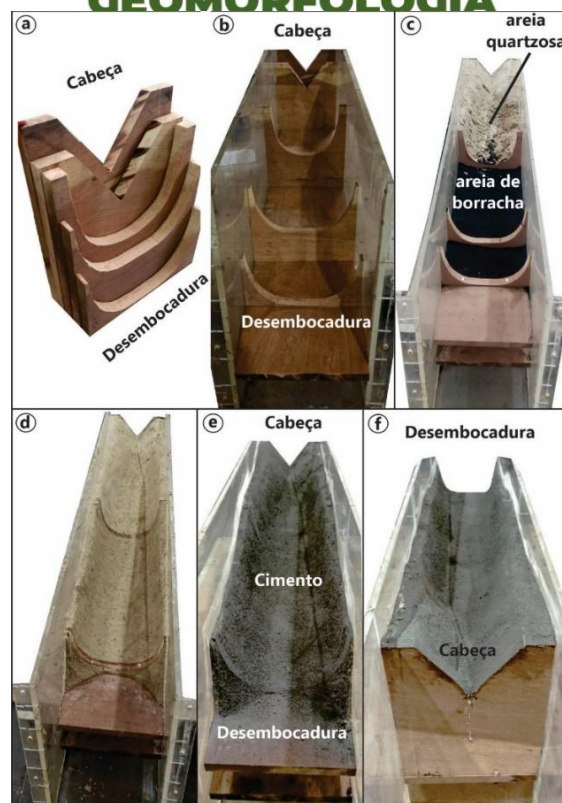


Figura. 1 Etapas de construção do modelo físico (geometria fixa) de voçoroca. Explicação no texto.

Experimentação

A experimentação foi realizada em duas fases. A primeira correspondeu a 50 repetições que tiveram como objetivo gerar fluxos com diferentes concentrações volumétricas até detectar visualmente qual concentração volumétrica é mais eficiente em promover o maior volume de sedimentação. Já a segunda fase, 100 repetições, implicou em gerar fluxos com alta concentração de sedimentos de forma recorrente. Assim, a experimentação totalizou em 150 repetições com variadas concentrações de sedimentos.

a) **Composição da mistura:** as misturas para os fluxos foram constituídas de água (massa específica de 998 kg m^{-3}) e carvão mineral. O carvão (código de fabricação 207) tem massa específica de 1289 kg.m^{-3} e tamanhos de grãos entre 0,005 à 0,5 mm, configurando a classe textural lama arenosa (< 50 % areia).

b) **Concentração Volumétrica das Misturas:** foi determinada a concentração volumétrica das misturas (%) considerando: (i) massa específica da mistura (água e carvão mineral) e (ii) quantidades de carvão (g) e água (litros) para cada conjunto de cinco repetições na primeira fase e dez a quinze repetições na segunda fase. A concentração

volumétrica das misturas variou de 7 a 38 %, mas a concentração volumétrica dos fluxos variaram acima e abaixo desses percentuais.



Figura 2. Modelo físico de voçoroca. Tabletes de filmagem, perfiladora e reservatório utilizados na experimentação. Acoplado ao reservatório há registro de esfera de pvc (20 mm – ½) para liberação da mistura e registro regulador da vazão tipo esfera metálico (dn 15 – ½). A injeção da mistura ocorreu por meio de mangueira (dn 2 mm).

c) **Geração de fluxos:** para cada uma das concentrações volumétricas das misturas foram gerados 5 fluxos na primeira fase e 10 a 15 fluxos na segunda fase. Os fluxos foram gerados a partir da cabeça do modelo físico de voçoroca com durações correspondentes ao tempo necessário para que percorressem até a desembocadura do modelo. Ao final totalizou-se 150 repetições de fluxos. Esse procedimento simulou o processo de entrada externo de sedimentos provenientes de *rills* e *interrills* gerados na encosta a montante da cabeça de voçorocas naturais.

d) **Parâmetros hidráulicos:** para cada fluxo gerado no modelo físico de voçoroca foram mensuradas vazão, velocidade média dos fluxos, profundidade média do fluxo, tempo de ocorrência do fluxo, concentração volumétrica dos fluxos, números de Froude e Reynolds. A vazão ($Q=l.s^{-1}$) foi determinada diretamente na injeção da mistura utilizando copo becker e cronometragem. A velocidade média dos fluxos ($V=m.s^{-1}$) e o tempo de



ocorrência do fluxo ($T=s$) foram determinadas por filmagem utilizando aplicativo Time-Lapse em tablete iPhone disponível no NECOD (Fig. 2). A profundidade média do fluxo ($h=m$) foi determinada próximo a desembocadura utilizando trena laser acoplada a perfiladora topográfica automatizada disponível no NECOD (Fig. 2). A concentração volumétrica dos fluxos ($C_v \%$) foi mensurada levando em consideração os mesmos parâmetros estabelecidos para as concentrações volumétricas das misturas obtidas das amostragens de vazão após secagem e pesagem das misturas de carvão e água contidas nos beakers. Os números de Reynolds ($Re=V \cdot h / \nu_m$), de Froude ($Fr=V_m / \sqrt{g \cdot h}$) foram calculados a partir dos seguintes parâmetros: V =velocidade do fluxo ($m \cdot s^{-1}$), h =profundidade do fluxo (m), g =força da gravidade ($9,8 \cdot m \cdot s^{-2}$), ν_m = viscosidade cinemática da mistura das misturas água e carvão. Esse último parâmetro foi obtido com as equações reológicas de Castro (2016) determinadas para o mesmo tipo de carvão utilizado nestes experimentos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A injeção de mistura foi variável, o que implicou numa aparente incostância nos parâmetros hidráulicos, cujos valores máximo, mínimo e médios se encontram na tabela 3. Essa aparente inconsistência é positiva, deixa o experimento mais próximo do mundo real pois no meio natural as voçorocas operam com variabilidade de fluxos.

Tabela 3. Parâmetros hidráulicos.

Parâmetro	$C_v \%$	$Q (l \cdot s^{-1})$	$V (m \cdot s^{-1})$	$h (m)$	$T (s)$	Froude	Reynolds
Valor Máximo	47,12	0,031	2,32	0,008	2,11	16,67	5085
Valor Mínimo	2,55	0,003	0,33	0,001	0,32	1,67	148
Média	32,37	0,011	1,26	0,003	0,67	8,32	1098

Diante do controle da descarga, a concentração volumétrica dos fluxos variou entre 2,55 à 47,12 % (média 32,37 %), sendo que concentrações inferiores a 20% corresponderam a 10% do total dos fluxos. Destaque para os números de Froude e



Reynolds, cujo primeiro caracterizou os fluxos na sua totalidade enquanto pertencentes ao regime de fluxo supercrítico (Superior). Já o segundo mostra a tendência de aumento da viscosidade dos fluxos conforme a concentração volumétrica (Fig. 3). Era de se esperar Froude elevado justamente pela inclinação do talvegue da voçoroca (Tab.1). Reynolds 500-2000 (zona de transição escoamento turbulento-laminar) para fluxos com baixa concentração volumétrica ($C_v \leq 10$) denota ação de forças coesivas por conta dos elevados teores de argila (8-14 %) da fração mineral (Manica, 2012). Enfim, regime supercrítico e escoamento turbulento dominou fluxos de baixa concentração de sedimentos (C_v 0-10%). Regime supercrítico com escoamento na zona de transição entre turbulento e laminar caracterizou fluxos com $C_v > 10$ -25%. Regime supercrítico com escoamento na zona de transição entre turbulento a laminar e supercrítico com escoamento laminar ocorreu em fluxos com elevada concentração volumétrica ($C_v > 25 < 50\%$) (Fig. 3).

A concentração de sedimentos determina o comportamento dinâmico dos fluxos, sendo que aqueles fluxos fluídos, de baixa densidade (reologia Newtoniana), apresentam pouca resistência ao movimento (baixa viscosidade) carregam sedimentos diante da turbulência; ao passo que fluxos de alta densidade (reologia não-Newtoniana), fluxos friccionais e coesivos, apresentam resistência ao movimento (alta viscosidade) carregando sedimentos por mecanismos de sustentação que inibem a queda dos grãos (Lowe, 1979). Entre essas categorias há os fluxos transicionais, cujo comportamento dinâmico expressa partes dos dois primeiros (Dasgupta, 2003). Na literatura não há consenso quanto aos valores de concentração de sedimentos que determinem o enquadramento dos fluxos enquanto baixa, transicional e alta densidades (Shanmugam, 1996), haja vista que o limite desses tipos de fluxo depende da distribuição de tamanho de grão, teor de argila e variáveis reológicas (Shanmugam, 1996; Manica, 2012). Para depósito granular (pedosedimentos) decorrente do escoamento superficial simulado em experimentação fluxos com concentração volumétrica no intervalo de $14 > C_v < 26\%$ foram interpretados como transicionais a alta densidade (Paisani et al., 2023d). Justamente as faixas de concentração com regime supercrítico-transicional ($C_v > 10$ -25%). Para o nosso experimento, com diferentes frações granulométricas de carvão (argila a areia), fluxos $C_v < 10\%$ correspondem a fluxos de baixa densidade. Já fluxos com regime supercrítico e na zona de transição entre laminar e turbulento ($C_v > 10$ -25%) podem corresponder a fluxos de densidade transicional (baixa-alta densidades). Ao passo



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

que fluxos com regime supercrítico-zona de transição e supercrítico-laminar devem corresponder a fluxos de alta densidade ($C_v > 25 < 50\%$) (Fig. 3).

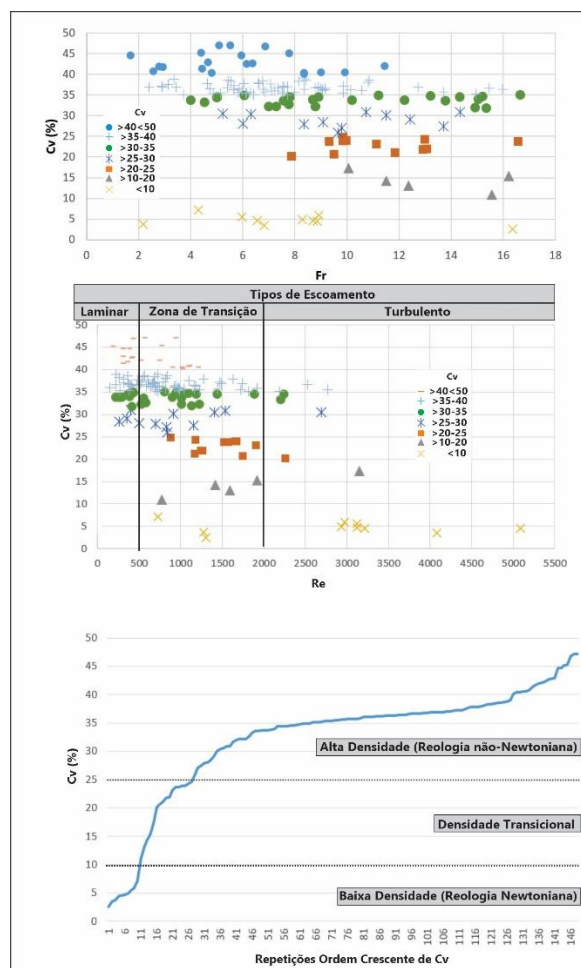


Figura 3. Correlação estatística da concentração volumétrica (C_v) com números de Froude (Fr)-regime de fluxo e Reynolds (Re)-tipo de escoamento, e classificação dos fluxos pela densidade/reologia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A experimentação em modelo físico de voçoroca trouxe resultados da hidráulica de uma variedade de fluxos, cuja maioria (90%) apresentou $C_v > 20\%$. Diante desse valor de C_v , os fluxos podem ser enquadrados enquanto transicional a altas densidades. A futura correlação dos parâmetros hidráulicos com volumes de material sedimentado no interior do modelo físico permitirá compreender o fenômeno de preenchimento de voçorocas, sejam modernas ou quaternárias.

AGRADECIMENTOS

Ao IPH/NECOD/UFRGS pelo apoio na realização da experimentação.



REFERÊNCIAS

- BENNET, S.J.; ASHMORE, P.; NEUMAN, C.M. Transformative geomorphic research using laboratory experimentation. **Geomorphology** 244, 1–8, 2015.
- BIFFI, V.H.R.; PAISANI, J.C. Reconstrução morfoestratigráfica e evolução de encosta em unidade de relevo de baixa ordem no Quaternário Superior: o caso da Superfície de Cimeira de Pinhão/Guarapuava - Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 22, 656–681, 2021.
- BOTHA, G.A.; WINTLE, A.G.; VOGEL, J.C. Episodic late Quaternary palaeogully erosion in Northern KwaZulu-Natal, South Africa. **Catena**, 27, 323–340, 1994.
- CASTRO, C. **Propriedades reológicas de misturas utilizadas em simulação física de correntes de turbidez**. Master's thesis, UFRGS, 2016.
- DASGUPTA, P. Sediment gravity flow – the conceptual problems. **Earth-Science Review**. 62, 265–281, 2003.
- GABET, E.J.; BOOKTER, A. A morphometric analysis of gullies scoured by post-fire progressively bulked debris flows in southwest Montana, USA. **Geomorphology**, 96, 298–309, 2008.
- GAZOLA, K.C. **Dinâmica de encosta em compartimento dissecado da superfície de cimeira de Pinhão/Guarapuava no Quaternário tardio**. Master's thesis. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2020.
- LOWE, D.R. Sedimentary gravity flows: their classification and some problems of application to natural flows and deposits. In: DOYLE, L.J., PILKEY, O.H. (Eds.), **Geology of Continental Slopes**. Tulsa, vol. 27. SEPM (Spec. Publ.), pp. 75–82, 1979.
- MORGAN, M.A. Modelos experimentais em Geografia. In: Chorley, R.J. e Haggett, P. (Ed.) **Modelos físicos e de informação em Geografia**, São Paulo:USP, p.185-238, 1975.
- OLIVEIRA, M.A.T., BEHLING, H., PESSENDA, L.C.R. Late-Pleistocene and mid-Holocene environmental changes in highland valley head areas of Santa Catarina state, Southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 26, 55–67, 2008.
- PAGOTTO, D., PAISANI, J.C., DE SORDI, M.V. Dinâmica da paisagem do Planalto do rio Canoas (SC) no Quaternário tardio com base em registros pedoestratigráficos de paleocabeceira de drenagem. **Geosul**, V.35, n. 75, 481–505, 2020.
- PAISANI, J.C. et al. Paleoenvironmental dynamics of low-order paleovalleys in the late quaternary – Palmas/Çaçador summit surface – southern Brazil. **Catena**, 182, 104171, 2019.
- PAISANI, J.C. et al. Pleistocene-Holocene coluvial facies from the Volcanic Plateau of the Paraná Sedimentary Basin (Rio Grande do Sul, Brazil) – sedimentation processes and paleoenvironmental implications. **Journal of South American Earth Sciences** 126, 104344, 2023a.
- PAISANI, J.C. et al. Simulação física de escoamento superficial com concentração de pedosedimentos entre 6 e 8%. **Revista de Geociências do Nordeste**, v.9, n.2, p.96-109, 2023c.
- PAISANI, J.C. Modern soil aggregates-colluvium generated by Overland flow- stratigraphy and physical experiments. **Sedimentology**, 70, 2150-2174, 2023d.
- PAISANI, J.C., SANTOS, M.C.P., DE SORDI, M.V. Low-concentrated overland flow generated in laboratory experiments: sedimentary structures and fabric. **Revista Brasileira de Geomorfologia** 24, 1-20, 2023b.
- PAISANI, J.C.; OLIVEIRA, M.A.T. Desenvolvimento de incisão erosiva (voçoroca) descontínua e desconectada da rede de hidrográfica em área de cabeceira de drenagem: o caso da Colônia Quero-Quero (Palmeira-PR). **Revista Brasileira de Geociências**, 31, 51-58, 2001.
- PAISANI, J.C.; VIEIRA, A.F.S.G.; MANICA, R. Types flow and depositional processes of gully fan in the Amazonia (Rio Preto da Eva – Brazil): rheology-fluid dynamics and microstratigraphy approach. Submetido.
- PAOLA, C. et al. The “unreasonable effectiveness” of stratigraphic and geomorphic experiments. **Earth Science-Review** 97, 1–43, 2009.
- PIETROBELLI, G. et al. Análise macroscópica e micromorfológica de estruturas sedimentares aplicada à interpretação de eventos de deposição de sedimentos em depósitos de baixa encosta no sul do Segundo Planalto do Estado Paraná (Brasil), **Revista Caminhos de Geografia**, 20, 537-559, 2019.
- SHANMUGAM, G. High-density turbidity currents: are they sandy debris flow? **Journal of Sedimentary Research**, V. 66, n.1, 2-10, 1996.