



Sociedade & Natureza

ISSN: 0103-1570

ISSN: 1982-4513

Editora da Universidade Federal de Uberlândia - EDUFU

Paz, Otacílio Lopes de Souza da; Paula, Eduardo Vedor de
Sedimentologia e reconstituição volumétrica de depósitos de corridas
de lama em planície aluvial: estudo na bacia do rio Jacareí, Paraná

Sociedade & Natureza, vol. 34, e64381, 2022

Editora da Universidade Federal de Uberlândia - EDUFU

DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-64381>

Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321370368024>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais informações do artigo
- Site da revista em redalyc.org

UABM redalyc.org

Sistema de Informação Científica Redalyc

Rede de Revistas Científicas da América Latina e do Caribe, Espanha e Portugal

Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa
acesso aberto

Sedimentologia e reconstituição volumétrica de depósitos de corridas de lama em planície aluvial: estudo na bacia do rio Jacareí, Paraná

Sedimentology and volumetric reconstitution of recent mud and debris flows deposits in alluvial plain: a study in the Jacareí river basin (southern coast of Brazil)

Otacílio Lopes de Souza da Paz¹

Eduardo Vedor de Paula²

Palavras-chave:

Geomorfologia fluvial
Sedimentos
Transformação de paisagem

Resumo

Corridas de lama e de detritos extremas podem soterrar planícies aluviais. O relato deste processo, bem como o conhecimento sobre as características sedimentológicas e estimativas de volumes destes depósitos, ainda são escassos na literatura. Tais conhecimentos são importantes para a compreensão do papel destes eventos na morfogênese das planícies aluviais de margem serrana. Tendo a planície aluvial do rio Jacareí (litoral do Paraná) como recorte de estudo, área soterrada recentemente por corridas de lama em março de 2011, objetiva-se analisar a sedimentologia e estimar o volume dos depósitos instantâneos formados pelos processos gravitacionais supracitado. Os depósitos foram mapeados a partir de uma base de dados geoespaciais. Após, foram realizadas coletas de amostras para análises laboratoriais. Para estimar o volume, foram coletados em campo pontos amostrais com medidas da espessura dos depósitos, encaminhados para interpolação em ambiente SIG. Foram identificados depósitos pelíticos (9%), psefíticos (4%) e psamíticos (87%). Os depósitos psamíticos apresentaram dois comportamentos distintos em função da dinâmica de escoamento e soterramento da planície. O volume total do depósito foi estimado em 1.7 milhão de toneladas de sedimentos. Os resultados demonstram a elevada magnitude do evento de 2011, visto que em um período inferior a 24 horas a bacia do rio Jacareí movimentou mais de 8,5 vezes a produção anual de sedimentos das unidades hidrográficas que drenam para o Complexo Estuarino de Paranaguá.

Keywords:

River geomorphology
Sediments
Landscape transformation

Abstract

Extreme mud and debris flows can bury alluvial plains. In current literature, there exists a significant knowledge gap regarding this process, since information about the sedimentological characteristics and estimates of the volumes of these deposits, are still scarce. Such knowledge is important for understanding the role of these events in the morphogenesis of the alluvial plains of the highland mountain margins. The study area located in the Jacareí River basin (coast of the State of Paraná, Brazil) was recently buried by mud slides in March 2011, therefore, our objective is to analyze the sedimentology and estimate the volume of instantaneous deposits formed by the aforementioned gravitational processes. The deposits were mapped based on a geospatial database. Afterwards, samples were collected for laboratory analysis. To estimate the volume, field samples were collected, measuring the thickness of the deposits, which were then interpolated in a GIS environment. Pelitic (9%), psephytic (4%) and psammitic (87%) deposits were identified. The psammitic deposits showed two distinct behaviors as a function of the flow and burial dynamics of the alluvial plain. The total volume of the deposit was estimated at 1,7 million tons of sediment. The results demonstrate the magnitude of the 2011 event, since in a period of less than 24 hours the Jacareí river basin moved more than 8.5 times the annual production of sediments from the hydrographic units that drain into the Estuarine Complex of Paranaguá.

¹ Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, PR, Brazil. otacilio.paz@gmail.com

² Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, PR, Brazil. edugeo@ufpr.br

INTRODUÇÃO

Corridas de lama e de detritos são fluxos gravitacionais rápidos compostos por uma mistura concentrada de sedimentos, matéria orgânica e água (HUNGR; et al, 2014). Estes eventos são comumente desencadeados a partir de deslizamentos associados à intensa precipitação (COSTA, 1984; HUNGR, 2005). Se trata de um importante agente geomorfológico em paisagens serranas, intimamente relacionado com o processo de denudação do relevo.

A elevada densidade desses fluxos de massa resulta em competência para transportar clastos desde frações de areias até matacões (LI et al., 2015; WANG et al., 2018; YANG et al., 2019). Os depósitos sedimentares resultantes são comumente encontrados em leitos fluviais intramontanos e em desembocaduras, formando leques deposicionais (COSTA, 1984; HUNGR, 2005). Em função da velocidade, da energia e do volume, estes processos apresentam alto potencial destrutivo, oferecendo riscos a estruturas e a populações (FROUDE; PETLEY, 2018).

Na região litorânea sul e sudeste do Brasil encontra-se a Serra do Mar, um sistema de escarpas e montanhas com notável complexidade litológica e estrutural, que apresenta elevados valores de declividade e expressivas médias de precipitação por períodos prolongados, sobretudo nos meses de verão (VIEIRA; GRAMANI, 2015). Estas características conferem à paisagem elevada suscetibilidade à ocorrência de corridas de lama e detritos (KOBAYAMA et al., 2015; VIEIRA; GRAMANI, 2015; ROSS; FIERZ, 2018).

Teixeira e Satyamurty (2011), ao analisar dados de precipitação nas regiões sul e sudeste do Brasil, identificaram um aumento na frequência dos eventos pluviométricos intensos e extremos entre 1960-2004, sendo na região sul encontrado uma tendência estatisticamente significativa. Os autores apontam que este já seria um resultado das mudanças climáticas na região, sendo necessários maiores séries temporais para corroborar esta hipótese. Estudos recentes têm correlacionado o aumento do número de eventos intensos e extremos pluviométricos com o aumento de frequência e magnitude de processos gravitacionais (deslizamentos e corridas de lama e detritos), tanto no Brasil (ÁVILA et al., 2016; ÁVILA-DIAZ et al., 2020) como no mundo (BORGIA et al., 2014; KUMARI et al., 2021)

Em eventos de maior magnitude, os fluxos de lama e de detritos podem alcançar extensas áreas nas planícies aluviais, gerando inundações e formando “depósitos instantâneos”. Entende-se “depósitos instantâneos” como depósitos sedimentares formados em curto período, por inundações de alta carga sedimentar, induzidos por corridas de lama e detritos, similar ao termo inglês flash flood deposits (ORTEGA; GARZÓN HEYDT, 2009; PAREDES et al., 2021).

Exemplo deste processo é encontrado em parte da planície do rio Jacaré (litoral do Paraná), fortemente afetada por processos gravitacionais em março de 2011, que formaram depósitos nos canais intramontanos, nas desembocaduras e na planície aluvial (PINTO et al, 2012; SILVEIRA et al., 2013). Este recorte espacial e temporal torna a planície do rio Jacaré uma área de estudo ideal pois ainda é possível identificar em campo os impactos do evento nos registros sedimentares da planície, estando os mesmos bem preservados.

O evento de 2011 na bacia do rio Jacaré motivou a realização de diversos estudos focados na caracterização dos processos (PINTO et al, 2012; PICANÇO; NUNES, 2013) e em mapeamentos de suscetibilidade a processo gravitacionais (SILVEIRA et al., 2014; FACURI; PICANÇO, 2021). No entanto, não foram realizados estudos sobre os depósitos gerados na planície aluvial, está completamente soterrada pelo evento.

Ainda, no contexto brasileiro, um reduzido número de estudos se dedicou a descrição sedimentologia e estimativas de volumes dos depósitos recém gerados (BIGARELLA, 2003; GRAMANI, 2018). As descrições existentes pautam-se em sua maior parte nos depósitos intramontanos situados nos canais fluviais e entorno, afetados diretamente pelas corridas. Questões sobre a sedimentologia e estimativas de volumes destes depósitos oriundos das corridas de lama em planícies aluviais ainda permanecem desconhecidas.

Tanto a análise sedimentológica como a estimativa do volume depositado são importantes para compreensão do papel destes eventos na morfogênese das planícies aluviais de margem serrana. Assim, considerando a lacuna apontada e a planície aluvial do rio Jacaré como área de estudo, objetiva-se realizar uma análise sedimentológica e estimar o volume dos “depósitos instantâneos” gerado após os eventos de fluxos de massa ocorridos em março de 2011.

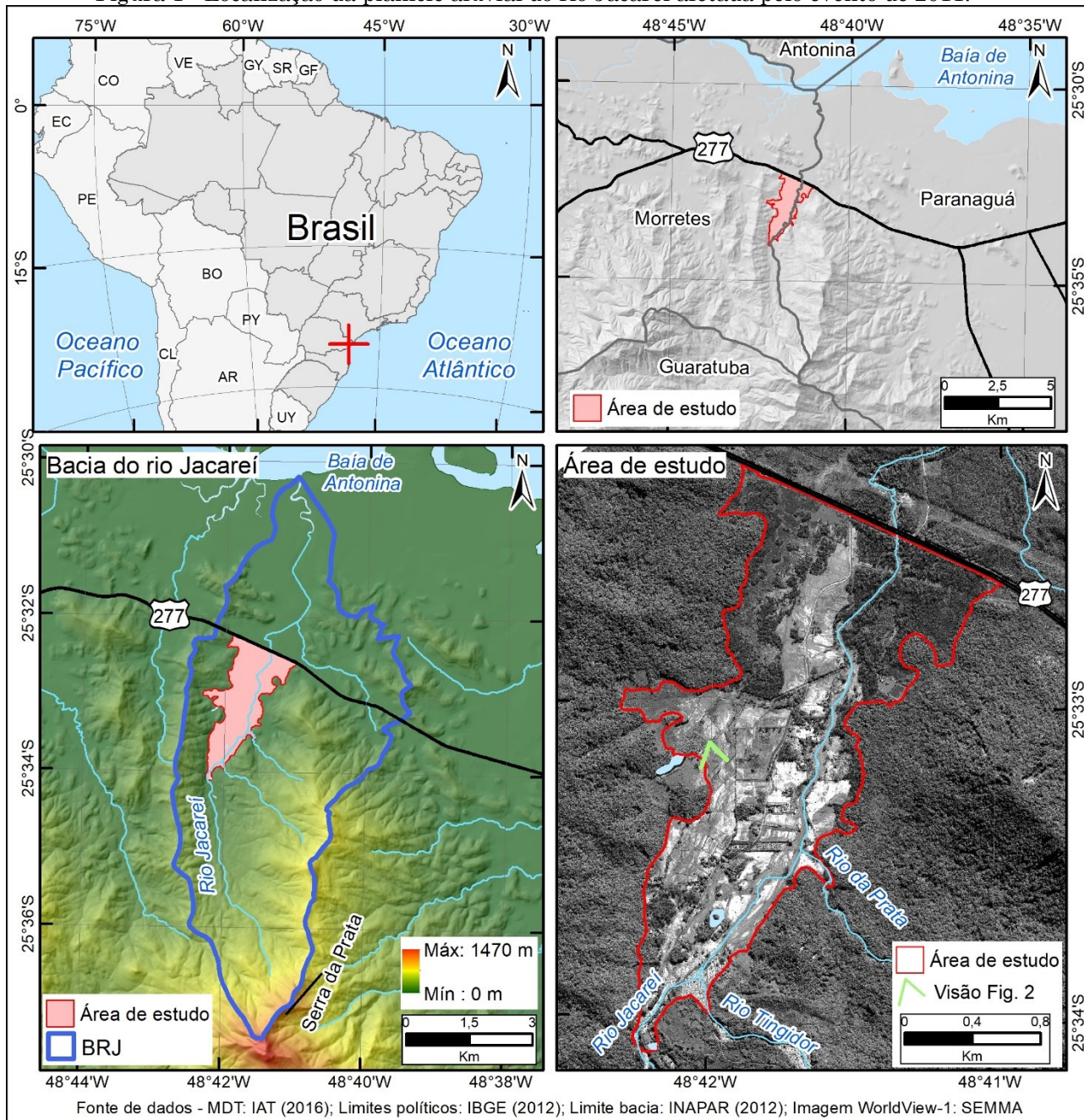
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Área de estudo

A planície do rio Jacareí situa-se entre os municípios de Paranaguá e Morretes, no litoral Paraná. A área de estudo foca em um trecho da planície aluvial, limitado entre a cota de 30

metros e o aterro da rodovia BR 277, porção mais afetada pelo evento de março de 2011 (Figura 1). A jusante do aterro, a planície do rio Jacareí é composta por mosaico de depósitos fluviais, marinhos, fluviomarinhos e paludais (ANGULO, 2004; MINEROPAR, 2006). A bacia do rio Jacareí (BRJ) apresenta 41,28 km², enquanto o recorte da planície analisado neste estudo apresenta 2,86 km².

Figura 1 - Localização da planície aluvial do rio Jacareí afetada pelo evento de 2011.



Fonte: Os autores (2022).

Na área de estudo, os rios Tingidor e da Prata são os únicos tributários de fluxo perene ao rio Jacareí, ambos em sua de margem direita. Os divisores hidrográficos de leste a sul situam-se

na Serra da Prata, um núcleo de Serras Altas sustentadas por rochas granito-gnáissica-migmatíticas relacionadas ao Complexo Cachoeira (MINEROPAR, 2006), apresentando

altitudes entre 800 e 1421 metros. Já os divisores a oeste apresentam altitudes entre 200 e 433 metros, composto por rochas metamórficas indiferenciadas da Formação Rio das Cobras (MINEROPAR, 2011).

No recorte de estudo, o rio Jacaré apresenta comprimento de 3,65 km e padrão reto (1,14 no índice de sinuosidade em 2020) e direção geral nordeste-norte, com foz na baía de Antonina, cabeceira do Complexo Estuarino de Paranaguá. A BRJ é majoritariamente composta por vegetação no estrato arbóreo, concentrando nas porções mais elevadas do terreno (a partir de 50 metros de altitude). As atividades antrópicas predominam na planície e em partes dos terços inferiores das vertentes, sendo encontradas atividades agrícolas (aipim, cebolinha e

gengibre), pecuárias (bois, búfalos e, antes do evento de 2011, atividades de caprinocultura), silviculturas (pinus e eucalipto) e extração mineral (areia do rio Jacaré e margens).

O evento em estudo que transformou profundamente os registros sedimentares da planície aluvial do rio Jacaré ocorreu em 11/03/2011 (Figura 2). Após um acumulado pluviométrico de 236,8 mm em 24h (superior ao esperado para a todo mês de março), diversos deslizamentos ocorreram no terço superior das vertentes da Serra da Prata (SILVEIRA et al., 2014; ZAPATA et al., 2016). A planície aluvial, entre o sopé das vertentes (30 metros de altitude) até o aterro da rodovia BR 277, foi soterrada, enquanto a Serra da Prata foi marcada por dezenas de cicatrizes (Figura 2).

Figura 2 – Paisagem da BRJ após os processos gravitacionais de 11/03/2011. Note cicatrizes nas Serra da Prata e o intenso aporte de sedimentos na planície aluvial.

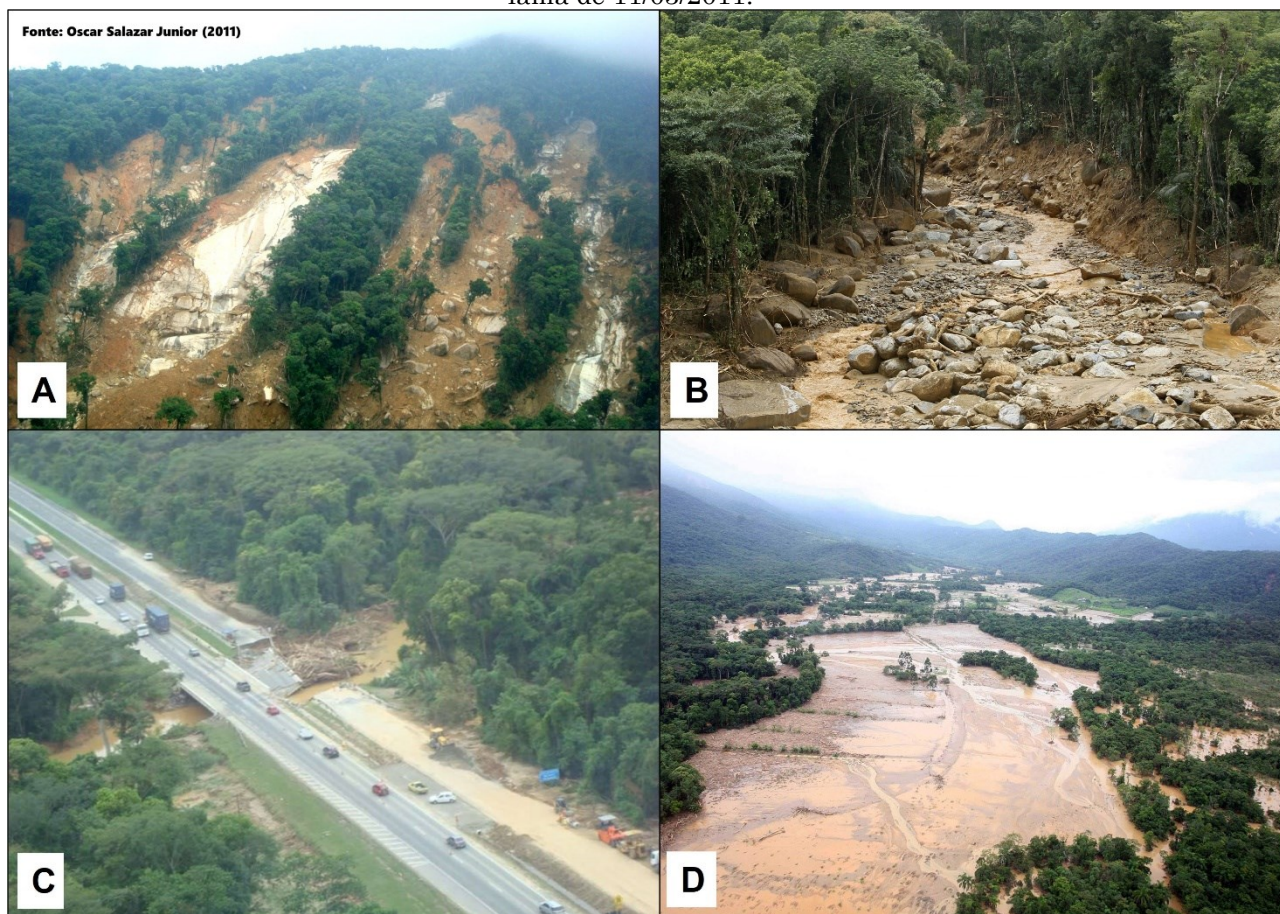


Fonte: Os autores (2022).

O material foi transportado pelos vales intramontanos na forma de corridas de lama e detritos até adentrar a planície aluvial do rio Jacaré (Figura 3 – A e B), onde foram represados pelo aterro da rodovia BR 277

(PINTO et al., 2014; SILVEIRA et al., 2014) (Figura 2 e Figura 3 - C). A inundação generalizada na planície e o acúmulo de troncos resultou no rompimento da ponte da BR 277 sobre o rio Jacaré (Figura 2 e Figura 3 – C e D).

Figura 3 – A: Deslizamentos no terço superior das vertentes da Serra da Prata. B: Canais intramontanos após passagem das corridas de detritos. C: Ponte da rodovia BR 277 sobre o rio Jacareí após o evento de 11/03/2011. D: Planície aluvial do rio Jacareí soterrada pelas corridas de lama de 11/03/2011.



Fonte: A: SALAZAR JUNIOR (2011a). B: KISSNER (2011). C: SALAZAR JUNIOR (2011b). D: MACHADO (2011).

Dados geoespaciais e mapeamento dos depósitos e linhas de fluxo

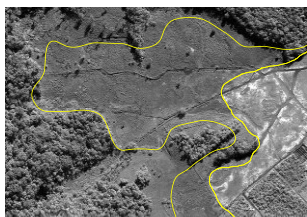
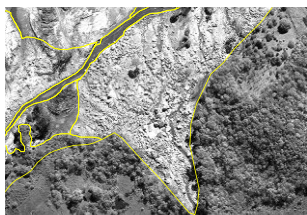
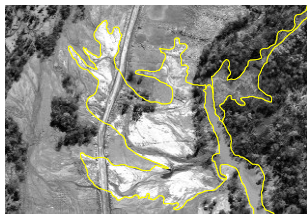
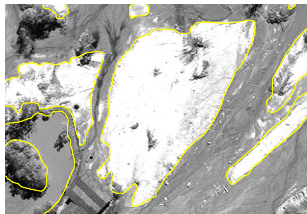


Foi adquirido um modelo digital do terreno (MDT) com 2,5 metros de resolução espacial, gerado a partir de levantamento por interferometria radar de abertura sintética (SAR - *Synthetic Aperture Radar*) em entre 2015 e 2016, disponibilizado pelo Instituto de Água e Terra do Paraná (IAT). Também foi adquirida uma imagem orbital pancromática registrada pelo satélite *WorldView-1* em 02/05/2011 com resolução espacial de 0,5 metro, disponibilizada pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Paranaguá (SEMMA) via ofício institucional. Esta foi a imagem registrada da área de estudo com data mais próxima ao evento extremo de 11 de março de 2011.

A área de estudo foi delimitada com auxílio do MDT supracitado. Foi calculada a declividade

em graus a partir das variáveis direcionais de Horn, na ferramenta *slope* do ArcGIS 10.4.1 (HORN, 1981). Na sequência, obteve-se a média de declividade no raio de 5 m com a ferramenta *focal statistics* do ArcGIS. O recorte de análise foi definido considerando a área entre a cota de 30 metros (localidade em que o rio Jacareí adentra a planície aluvial) até o aterro da BR 277, limitado lateralmente pelos valores de declividade média de até 7 graus, valor definido a partir de observações de campo.

A identificação dos depósitos foi realizada considerando inferência quanto à granulometria do material a partir da imagem orbital (Tabela 1) e consulta à literatura (CHRISTOFOLETTI, 1981; STEVAUX; LATRUBESSE, 2017; MAGALHÃES JÚNIOR; BARROS, 2020). Após a identificação na imagem orbital, os depósitos foram vetorizados no ArcMap, com escala de tela fixada em 1:2.000.

Tabela 1 - Depósitos mapeados na planície aluvial do rio Jacareí em 2011.

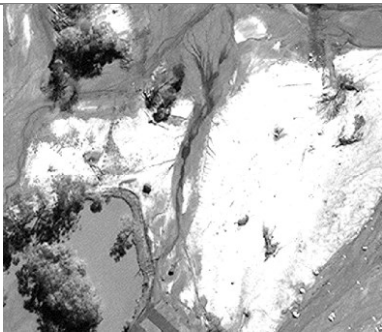
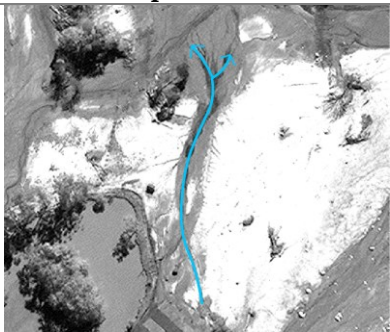


Classe	Subclasse/Descrição	Critérios	Exemplo	
Depósitos pelíticos	Material de granulometria fina em porções da planície aluvial não alteradas pela inundação em 2011.	Ausência de material sedimentar na superfície. Proximidade com as encostas.		
	Material de granulometria grosseira (cascalhos). Consistem em leques deposicionais e demais pontos que as corridas de detritos atingiram.	Material grosseiro na superfície. Encontrados nas porções a montante da planície e nas desembocaduras dos rios da Prata e Tingidor com forma cônica.		
Depósitos psamíticos	Depósito de rompimento (<i>Crevasse splay</i>)	Depósito de transbordamento. Resultante do rompimento de margens em função da obstrução do canal fluvial.	Localizado marginal ao canal. Forma cônica.	
	Barra fluvial	Depósitos centrais ou marginais ao canal anastomosado formado pelo evento	Áreas com material arenoso localizado as margens ou ao centro do canal anastomosado.	
	Leito fluvial anastomosado	Leito fluvial de tipo anastomosado formando pela inundação de 2011	Material arenoso de tons mais escuros, indicando umidade. Limitado pelos depósitos de detritos e corridas.	
	Planície soterrada	Depósito formado pela inundação de 2011. Cobre extensa área da planície.	Material arenoso na superfície e áreas de vegetação de aspecto úmido.	

Fonte: SEMMA (2019) e os autores (2022).

Áreas não afetadas pelo evento foram classificadas como depósitos pelíticos (finos), considerando granulometria predominantemente em silte e argila, já descrito em estudo anterior (PAZ; PAULA, 2021). Depósitos psefíticos (cascalhos) foram identificados observando presença de material grosseiro na imagem orbital. Depósitos psamíticos (areias) foram identificados considerando o material na superfície e aspecto úmido da vegetação (afetada pela inundação), sendo subdividido em classes conforme posição na paisagem e morfologia.

Para analisar a direção das correntes de água e sedimento durante a inundação e após o rompimento da ponte na BR 277, foi efetuado mapeamento de linhas de fluxo através de fotointerpretação da imagem orbital WorldView-1 de 2011 (SEMMA, 2019). Em ambiente SIG, foram identificados marcas ou cicatrizes no material sedimentar deixado pelo evento (Tabela 2). Em seguida, foram inseridas setas de comprimento variado visando inferir o ângulo e a direção do fluxo.

Tabela 2 - Exemplos de mapeamento das linhas de fluxo.

Cicatrizes	Mapeamento
	
Marcas	Mapeamento
	

Fonte: Os autores (2022).

Levantamentos de campo e sedimentologia

Foram abertas trincheiras (manualmente ou com maquinário) e realizadas tradagens com trado holandês com caçamba de 20 cm e boca de 6 cm somente nos depósitos pelíticos e psamíticos. As coletas nos depósitos pelíticos foram realizadas para entender a planície antes de 2011. As coletas nos depósitos psamíticos foram realizadas para compreender a sedimentológica e estimar o volume do material transportado pelas corridas de lama, localizados exclusivamente na planície aluvial. Não foram realizadas coletas nos depósitos psefíticos por incompatibilidade metodológica e, principalmente, por estes depósitos de estenderem da planície até os canais intramontanos, fora da área de estudo. Os 21 levantamentos de campo foram efetuados entre

2019 e 2021. Dos 111 pontos amostrais, 108 foram utilizados na reconstituição volumétrica e em 19 foram coletadas amostras para análise sedimentológica.

Os depósitos formados em 2011 (psamíticos) foram identificados em campo, considerando os critérios apresentados por Paz e Paula (2021): camada arenosa em estrutura maciça de cores amareladas sobrepostas abruptamente a camada com material fino de cores brunadas a acinzentadas, podendo apresentar raízes soterradas. Após identificar o depósito do evento, foi mensurado sua espessura total e realizado coleta de material a 25 cm de profundidade. A coleta de material nas áreas não atingidas também foi realizada a 25 cm de profundidade.

As amostras foram encaminhadas para secagem em estufa a 50° por 72 horas. A

granulometria foi obtida através da integração entre os métodos de peneiramento mecânico e dispersão a *laser*, utilizando a escala Wentworth. O equipamento utilizado na análise a laser foi o *Bluewave MICROTRAC*. Em função de limitações do equipamento foi necessário separar material de dimensão superior a 2 mm (grânulos), sendo as amostras submetidas a peneiramento mecânico (peneira de 2 mm), obtendo a porcentagem de grânulos na amostra. O restante da amostra foi homogeneizado e $\cong 2$ g foi aplicada na via úmida do equipamento *Bluewave MICROTRAC*, obtendo a distribuição granulométrica entre 0,02 e 2,000 μm (argila a areia muito grossa). Para integrar os resultados de ambos os métodos foi necessário ajustar as porcentagens de cada classes na escala Wentworth utilizando a equação abaixo:

$$PF (\%) = \frac{(100 - PG) \times PC}{100}$$

PF = Porcentagem final da classe granulométrica na granulometria integrada (peneira + laser);

PG = Porcentagem de grânulos mensurados por peneiramento mecânico;

PC = Porcentagem da classe granulométrica calculada com resultados por dispersão a laser.

Fonte: os autores (2022).

Os dados de distribuição granulométrica foram transferidos para o software SYSGRAN 3.0 (CAMARGO, 2006), onde foram calculados os parâmetros granulométricos de Folk e Ward: média, mediana, grau de seleção, assimetria e curtose. A textura foi identificada de acordo com o triângulo textural adaptado da Soil Survey Manual (SANTOS et al., 2015).

As propriedades morfológicas do material nas frações granulométricas de areia ($0 \phi/\phi$ a $4 \phi/\phi$) foram analisadas a partir de uma lupa de bolso com aumento de 20X, comparando-se com cartas de esfericidade e arredondamento (MANCINI, 2016). Por fim, foi aplicado teste de correlação bivariado entre as classes granulométricas das amostras coletadas no software Excel (Função CORREL).

Reconstituição volumétrica dos depósitos

A reconstituição volumétrica foi executada somente nos depósitos psamíticos (formados no evento). O valor de espessura do depósito foi inserido na tabela de atributos do arquivo

vetorial dos pontos coletados. A nuvem de 108 pontos com a referida informação de espessura foi submetida a interpolação no *software* ArcGIS 10.4.1.

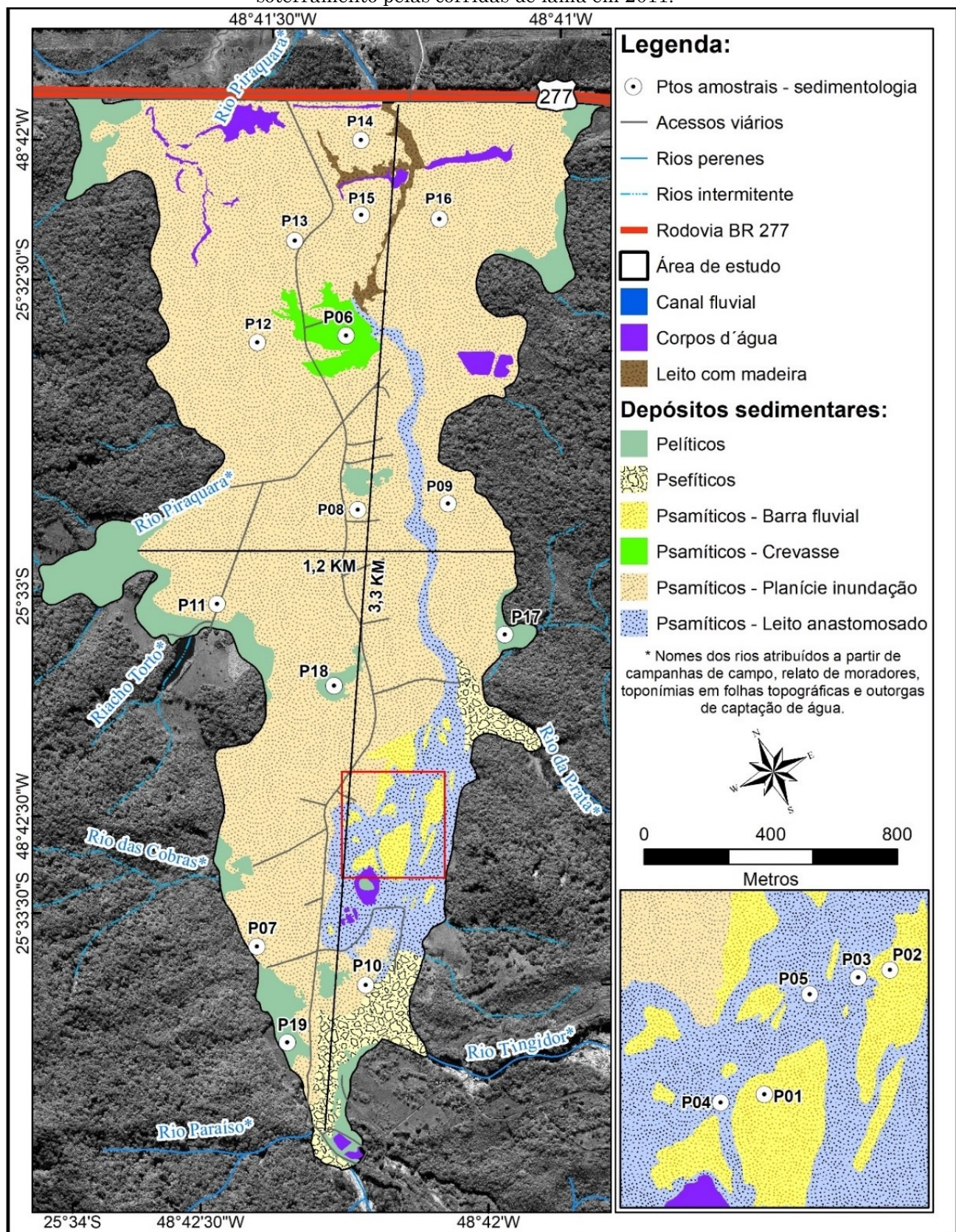
O algoritmo de interpolação utilizado foi o *Spline With Barriers*. Este foi escolhido considerando o comportamento espacial dos dados coletados, onde o tipo de depósito reflete as características de espessura. Ou seja, transições abruptas de espessura foram observadas somente comparando as espessuras em diferentes depósitos, enquanto no mesmo depósito foi observado certa homogeneidade dos valores, com suave variação. Portanto, considera-se que a curvatura mínima deste algoritmo, associado a barreiras como os limites dos depósitos de 2011 previamente mapeados, melhor se enquadra para a estimativa volumétrica proposta.

O raster resultante teve 1 m de resolução espacial e foi aplicado na ferramenta Surface Volume do ArcGIS 10.4.1 onde, considerando o plano de referência abaixo como zero, foi estimado o volume dos depósitos psamíticos. Para estimar a massa dos depósitos foi multiplicado o volume pela densidade aparente do material, considerado aqui em $1,5 \text{ mg/m}^3$, valor médio calculado para amostras com textura de areia a areia franca (BRADY; WEIL, 2013; ZERI et al., 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os depósitos psamíticos predominam na planície aluvial (87,59%), sendo a subunidade planície de inundação a maior (76,12%), distribuída entre as porções montante a jusante da área de estudo (Figura 4 e Tabela 3). Os depósitos pelíticos encontram-se nas extremidades laterais na área e em fragmentos de vegetação, áreas não afetadas pela inundação de março de 2011. Os depósitos psefíticos, resultantes das corridas de detritos, são encontrados nas desembocaduras dos rios Jacareí, Tingidor e da Prata, onde formaram leques (ou cones de dejeção), se estendendo até os canais intramontanos. Nestas áreas são encontrados clastos com diâmetro maior de 150 cm, classificados como matacões, sendo circundados por blocos, seixos e grânulos. Exceção no leque no rio da Prata, onde predominam grânulos.

Figura 4 - Depósitos na planície aluvial do rio Jacareí em 2011. Note que os canais fluviais na planície não são ilustrados na figura devido ao preenchimento dos mesmos durante o evento de soterramento pelas corridas de lama em 2011.



Fonte: Os autores (2022).

Tabela 3 - Características das unidades sedimentares da planície aluvial do rio Jacareí em 2011.

Unidade/Subunidades		Área (ha)	Área (%)	Setor da planície
Depósitos pelíticos		25,06	8,76	Porções distais
Depósitos psefíticos		10,45	3,65	Desembocaduras - Porção montante
Depósitos psamíticos	Depósito de rompimento	4,48	1,56	Porção jusante
	Barra fluvial	5,28	1,85	Porção montante
	Leito fluvial anastomosado	23,04	8,06	Porção montante
	Planície de inundação	217,68	76,12	Porções de montante a jusante

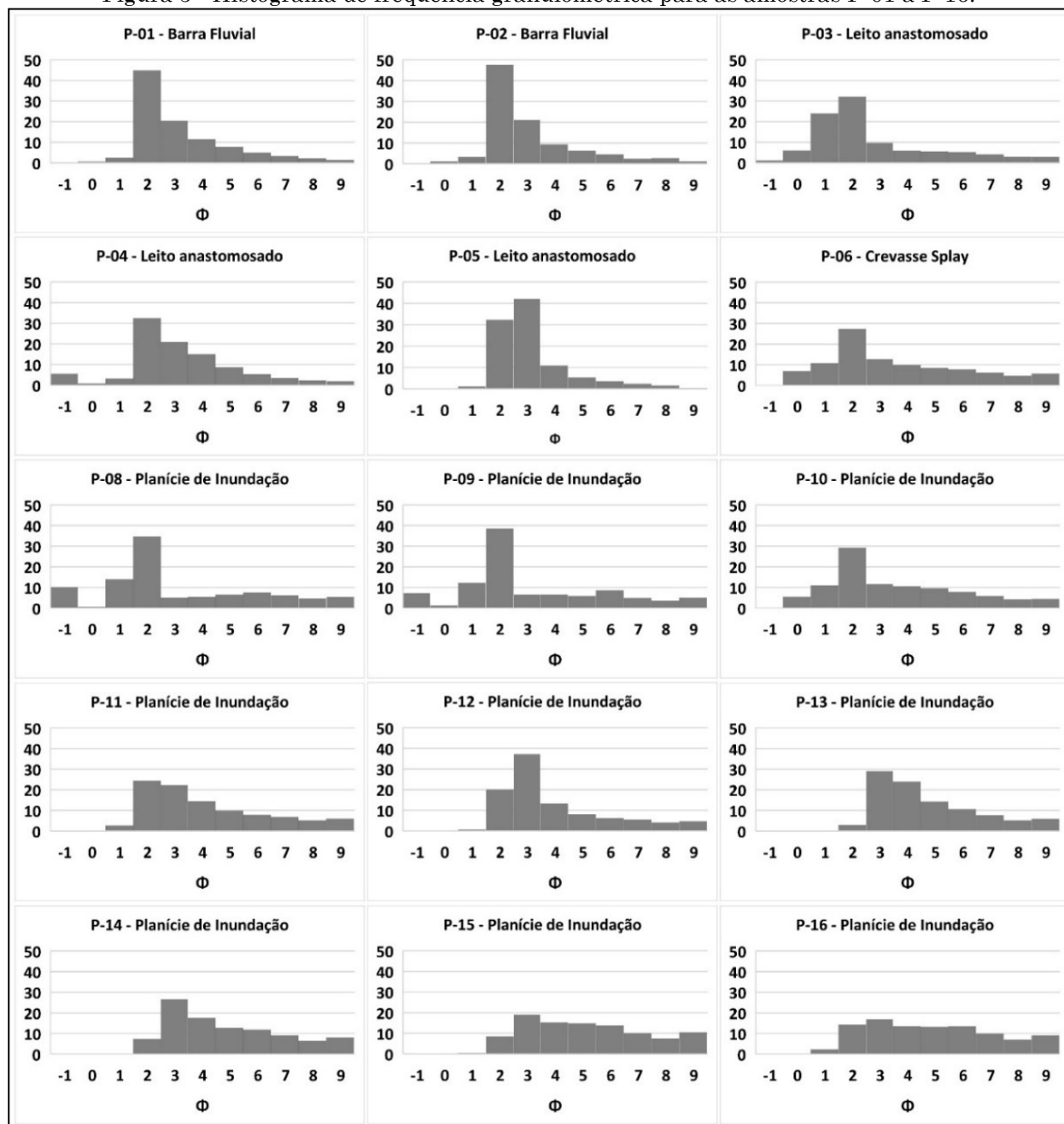
Fonte: Os autores (2022).

As corridas de lama percorreram a planície (3,3 km de extensão por 1,2 km de largura) fomentando a inundação generalizada na área. A descrição sedimentológica dos depósitos psamíticos e pelíticos é apresentada no tópico a seguir. Além de clastos, identificam-se na imagem orbital diversos pontos com acúmulo de material lenhoso, principalmente no leito do rio Jacareí próximo a BR 277. Ainda nesta porção, foram identificados diversos corpos d'água formados pelo evento.

Sedimentologia dos depósitos formados em 2011

As amostras coletadas nos depósitos psamíticos foram classificadas entre areia fina (3 ϕ) a areia muito fina (4 ϕ), sendo que na maioria dos casos o pico do histograma ocorreu na classe areia média (2 ϕ), com exceção das amostras P-05, P-12 e P-16 (pico em areia fina – 3 ϕ). As subunidades psamíticas “barra fluvial” e “leito fluvial anastomosado” apresentaram os maiores teores de areias (acima de 78%) (Figura 5). Do ponto de vista textural, as amostras destas unidades foram classificadas como “areia franca”, com exceção da amostra P-05 que foi classificada como “areia” (86,47% de areia). Em todas as amostras psamíticas foi constatado clastos de baixa esfericidade, sub-angulosos a muito angulosos.

Figura 5 - Histograma de frequência granulométrica para as amostras P-01 a P-16.

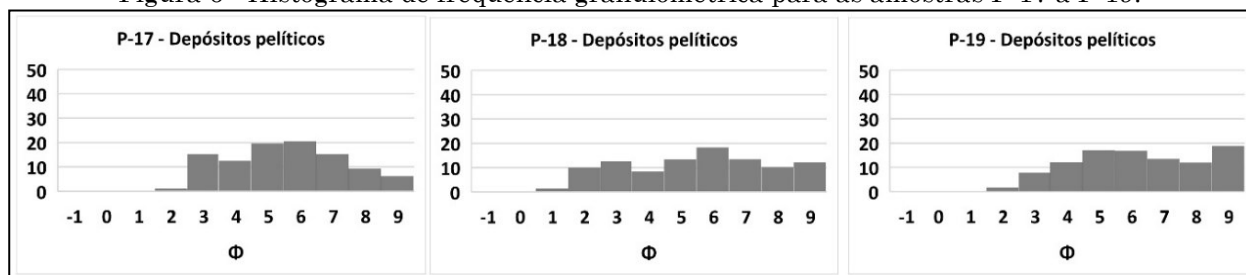


Fonte: Os autores (2022). Eixo X é phi (ϕ) e do eixo Y é porcentagem (%).

O material da unidade “depósito de rompimento” foi classificado como “franco arenoso”. As amostras P-07 a P-14, coletadas na planície de inundação soterrada, também foram classificadas como “franco arenosas”. Nestas unidades, as amostras P-04, P-08 e P-09 apresentaram-se cascalhentas. As amostras P-15 e P-16 registraram os menores teores de areia das amostras coletadas nos depósitos

psamíticos, classificadas como “franca”. As amostras P-17 a P-19 se referem aos depósitos pelíticos, com o diâmetro médio classificado como “silte médio” (Figura 6). As amostras apresentaram em média 59% do material em silte, resultando na classificação textural “franco silteoso”.

Figura 6 - Histograma de frequência granulométrica para as amostras P-17 a P-19.



Fonte: Os autores (2022). Eixo X é phi (ϕ) e do eixo Y é porcentagem (%).

Além do diâmetro médio, o parâmetro assimetria apresentou diferença significativa entre as amostras psamíticas e pelíticas (Tabela 4). Amostras psamíticas foram classificadas com assimetria “positiva” a “muito positiva”, enquanto amostras pelíticas foram classificadas como “aproximadamente simétrica”.

Analisando a correlação bivariada entre a distribuição granulométrica das amostras psamíticas (Figura 7) são observados dois

padrões de elevada correlação positiva: amostras P-01 até P-12 (\bar{x} 0,8) e amostras P-13 a P-16 (\bar{x} 0,9). Os dois grupos identificados apresentam fraca correlação positiva entre si (\bar{x} 0,33), mesmo todas as amostras sendo psamíticas. Foi constatado, em média, muito fraca correlação positiva entre as amostras pelíticas e psamíticas (\bar{x} 0,15).

Tabela 4 - Parâmetros estatísticos granulométricos das amostras coletadas.

Unidade	Amostra	Média	Mediana	Seleção	Assimetria	Curtose
Depósitos psamíticos - Barra fluvial	P-01	2,64	2,10	1,66	0,56	1,11
	P-02	2,48	1,96	1,60	0,59	1,30
Depósitos psamíticos - Leito fluv. Anastomosado	P-03	2,28	1,58	2,29	0,48	1,22
	P-04	2,74	2,37	2,04	0,24	1,37
	P-05	2,54	2,39	1,30	0,33	1,55
Depósitos psamíticos - Depósito de rompimento	P-06	3,09	2,39	2,57	0,38	0,95
Depósitos psamíticos - Planície de inundação	P-07	3,61	2,91	2,56	0,38	0,77
	P-08	2,71	1,73	2,71	0,50	0,93
	P-09	2,69	1,76	2,59	0,49	1,05
	P-10	3,04	2,35	2,42	0,40	0,95
	P-11	3,63	3,04	2,27	0,41	0,90
	P-12	3,42	2,78	2,00	0,51	1,17
	P-13	4,19	3,74	1,91	0,40	0,93
	P-14	4,36	3,91	2,15	0,32	0,85
	P-15	4,70	4,46	2,28	0,16	0,83
	P-16	4,40	4,23	2,37	0,13	0,82
Depósitos pelíticos	P-17	5,00	5,07	1,90	0,00	0,90
	P-18	5,07	5,23	2,41	-0,08	0,80
	P-19	5,78	5,66	2,11	0,02	0,79

Fonte: Os autores (2022).

Figura 7 - Matriz de correlação bivariada entre as distribuições granulométricas das amostras psamíticas coletadas.

Amostras	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
P1	1,00	1,00	0,74	0,97	0,84	0,94	0,93	0,80	0,87	0,94	0,90	0,70	0,24	0,36	0,33	0,60
P2	1,00	1,00	0,76	0,96	0,83	0,94	0,93	0,82	0,89	0,94	0,87	0,69	0,19	0,31	0,28	0,55
P3	0,74	0,76	1,00	0,64	0,49	0,88	0,79	0,86	0,87	0,88	0,50	0,30	-0,19	-0,11	-0,15	0,15
P4	0,97	0,96	0,64	1,00	0,89	0,86	0,84	0,71	0,78	0,87	0,93	0,79	0,40	0,49	0,41	0,63
P5	0,84	0,83	0,49	0,89	1,00	0,73	0,66	0,45	0,53	0,69	0,92	0,96	0,58	0,68	0,53	0,66
P6	0,94	0,94	0,88	0,86	0,73	1,00	0,94	0,81	0,88	0,99	0,80	0,58	0,13	0,24	0,23	0,52
P7	0,93	0,93	0,79	0,84	0,66	0,94	1,00	0,86	0,91	0,96	0,81	0,53	0,09	0,25	0,31	0,61
P8	0,80	0,82	0,86	0,71	0,45	0,81	0,86	1,00	0,99	0,84	0,52	0,23	-0,28	-0,16	-0,13	0,20
P9	0,87	0,89	0,87	0,78	0,53	0,88	0,91	0,99	1,00	0,90	0,61	0,32	-0,19	-0,07	-0,03	0,30
P10	0,94	0,94	0,88	0,87	0,69	0,99	0,96	0,84	0,90	1,00	0,80	0,54	0,11	0,22	0,23	0,52
P11	0,90	0,87	0,50	0,93	0,92	0,80	0,81	0,52	0,61	0,80	1,00	0,90	0,63	0,73	0,69	0,85
P12	0,70	0,69	0,30	0,79	0,96	0,58	0,53	0,23	0,32	0,54	0,90	1,00	0,76	0,84	0,70	0,76
P13	0,24	0,19	-0,19	0,40	0,58	0,13	0,09	-0,28	-0,19	0,11	0,63	0,76	1,00	0,97	0,89	0,76
P14	0,36	0,31	-0,11	0,49	0,68	0,24	0,25	-0,16	-0,07	0,22	0,73	0,84	0,97	1,00	0,95	0,87
P15	0,33	0,28	-0,15	0,41	0,53	0,23	0,31	-0,13	-0,03	0,23	0,69	0,70	0,89	0,95	1,00	0,94
P16	0,60	0,55	0,15	0,63	0,66	0,52	0,61	0,20	0,30	0,52	0,85	0,76	0,76	0,87	0,94	1,00

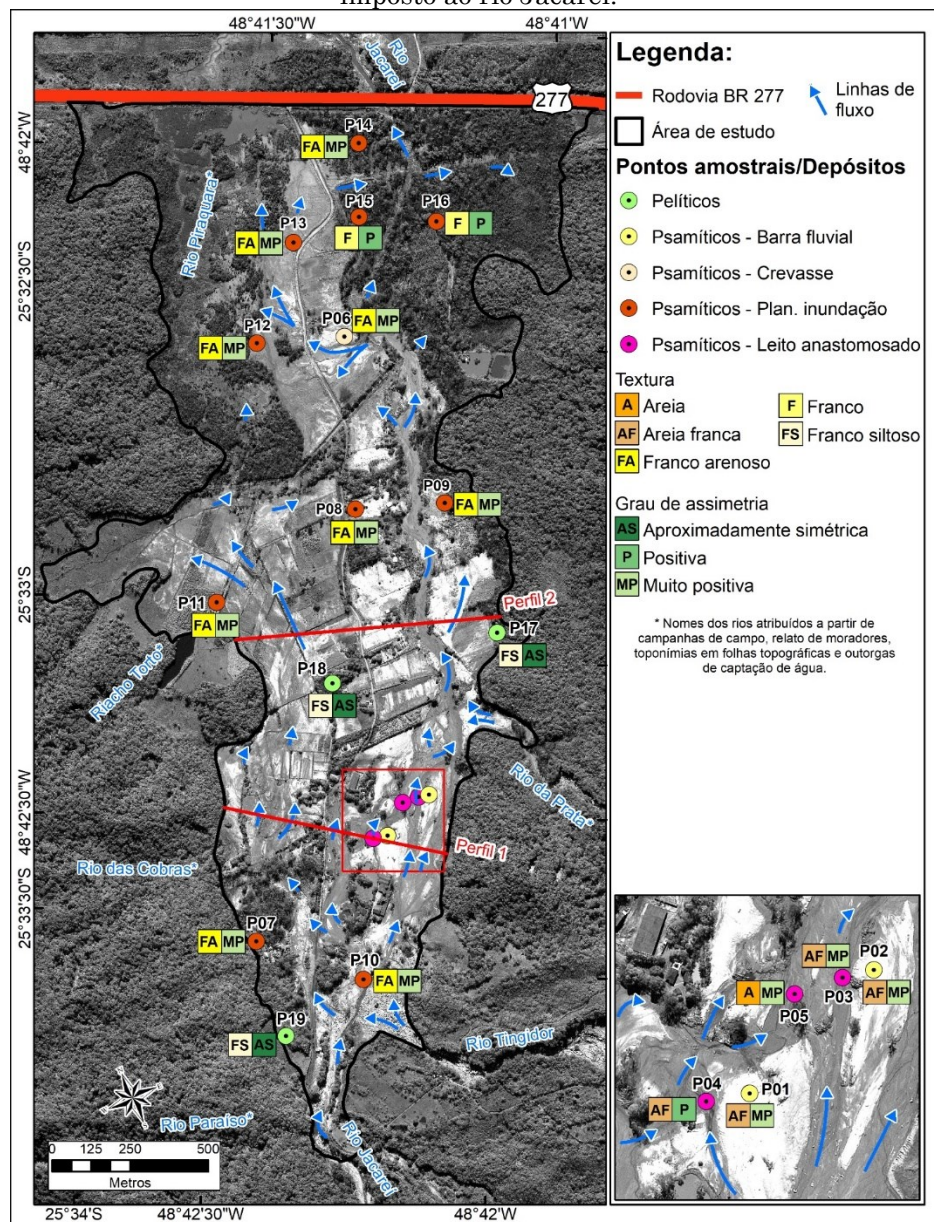
-0,39 a -0,20		Fraca negativa	0,40 a 0,69		Moderada positiva		Grupo 1
-0,19 a 0,00		Bem fraca negativa	0,70 a 0,89		Forte positiva		
0,00 a 0,19		Bem fraca positiva	0,90 a 1,00		Muito forte positiva		Grupo 2
0,20 a 0,39		Fraca positiva					

Fonte: Os autores (2022).

As amostras P-01 a P-12 situam-se nas porções montante e média da planície aluvial, enquanto as amostras P-13 a P16 encontram-se na porção jusante (próximo a BR 277). O mapeamento das linhas de fluxo (Figura 8) indica dois sentidos principais de água e sedimentos durante o evento, sendo que ambos têm início no ponto no qual o rio Jacareí adentra

a planície aluvial e se encontram nas proximidades da BR 277. O primeiro flui próximo às vertentes da Serra da Prata, seguindo o leito fluvial anastomosado até o depósito de rompimento. O segundo flui nas proximidades das vertentes a oeste, adentrando as proximidades do rio Piraquara.

Figura 8 - Principais parâmetros granulométricos e linhas de fluxo na planície aluvial do rio Jacareí em 2011. Note que, após o evento de soterramento da planície aluvial, não é possível identificar os canais fluviais devido ao seu preenchimento. É possível apenas observar o canal anastomosado imposto ao rio Jacareí.



Fonte: Os autores (2022).

Reconstituição volumétrica

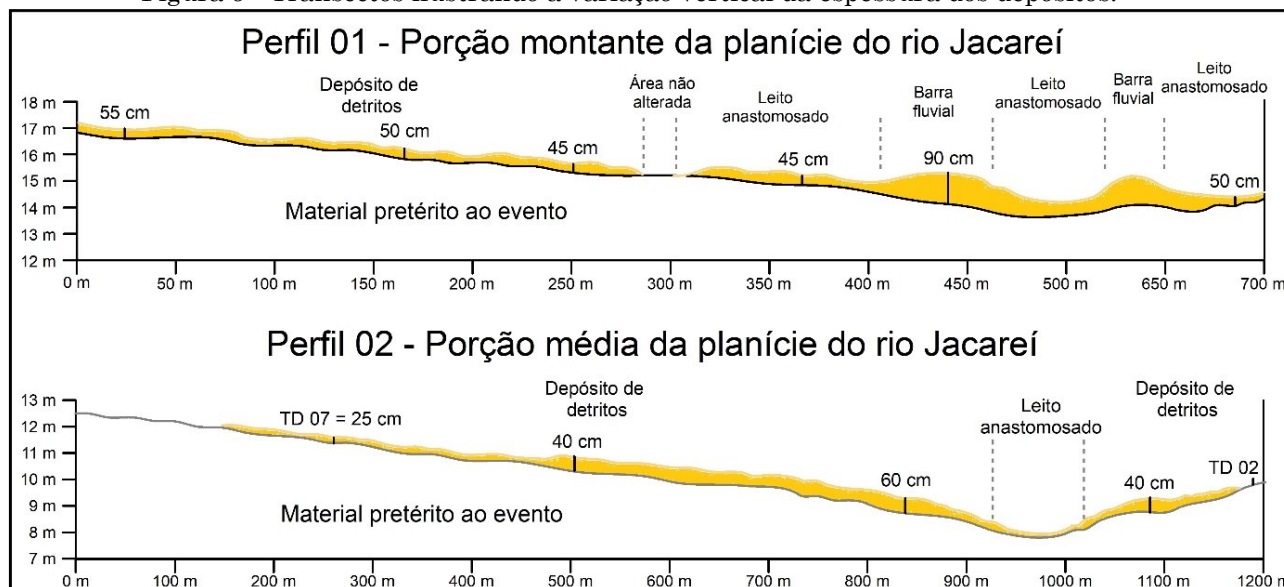
Os 108 pontos amostrais de espessura apresentaram valores desde 20 cm, nas extremidades laterais da planície aluvial, até 120 cm, em uma barra fluvial circundada pelo leito anastomosado. A espessura média foi de 50 cm. O volume total dos depósitos psamíticos foi

estimado em 1.13 milhão m³, equivalente a 1.7 milhão de toneladas de sedimentos. Para melhor analisar a distribuição dos depósitos na planície, o modelo gerado foi dividido em classes (Tabela 6). Transectos foram traçados sobre a planície visando observar a variação longitudinal dos depósitos (Figura 9).

Tabela 5 - Área (hectare e porcentagem) de cada classe de espessura na planície aluvial.

Classe	Área (hectare)	Área (%)
Entre 20 e 35 cm	60,3001	24,09
Entre 35 e 45 cm	69,8435	27,89
Entre 45 e 55 cm	83,4906	33,35
Entre 55 e 75 cm	31,9649	12,76
Entre 75 e 120 cm	4,7813	1,91

Fonte: Os autores (2022).

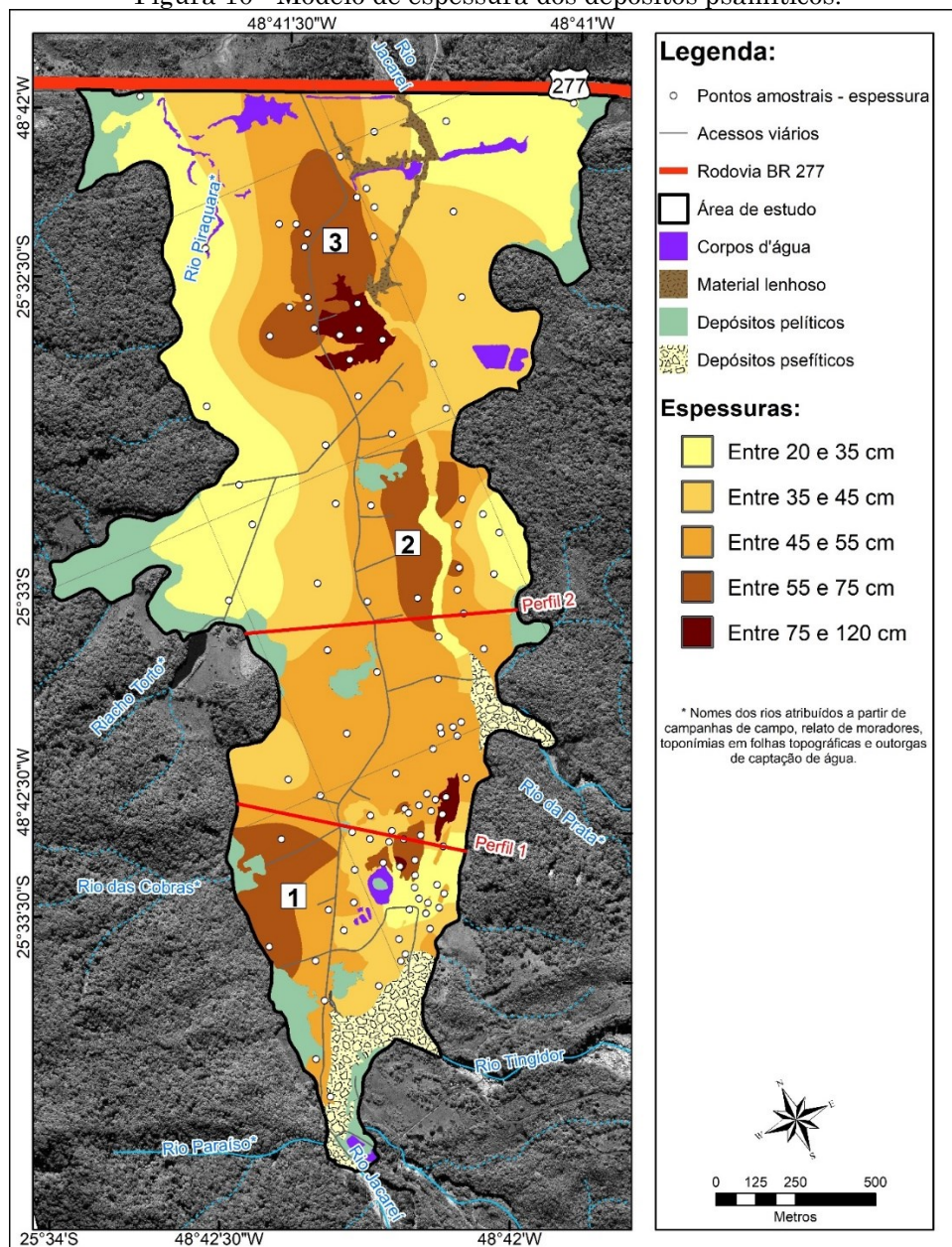
Figura 9 - Transectos ilustrando a variação vertical da espessura dos depósitos.

Fonte: Os autores (2022).

De acordo com o modelo gerado (Figura 10), observa-se concentração dos volumes depositados em três pontos: 1 - próximo ao canal do rio Jacaré em toda a planície; 2 – no setor montante, logo após a chegada do rio Jacaré na planície; 3 – no setor jusante, logo após o

depósito de rompimento formado as margens do canal do rio Jacaré. Nas extremidades laterais da planície e no leito fluvial anastomosado foram observados os menores valores de espessura (< 35 cm).

Figura 10 - Modelo de espessura dos depósitos psamíticos.



Fonte: Os autores (2022).

DISCUSSÃO

Os resultados obtidos indicam dois estágios no processo de construção dos depósitos psamíticos em 2011. O primeiro se refere à chegada e espreadimento de material sedimentar, lenhoso e água na planície aluvial, oriundo dos fluxos de lama e detritos entre 14h e 15h de 11/03/2011 (de acordo com relatos apresentados pelos moradores), soterrando a superfície pretérita.

O escoamento pela ponte da BR 277 foi interrompido em função do acúmulo de troncos. O aterro da BR 277 funcionou como uma barragem, acumulando água e sedimento na planície. Os dois primeiros pontos de

concentração de volume de sedimentos (próximo ao canal do rio Jacaré e no setor montante, logo após a chegada do rio Jacaré na planície) foram formados neste estágio.

O segundo estágio tem início por volta das 19h, quando ocorre o rompimento da ponte da BR 277 (ECOVIA, 2011). Água e sedimento são escoados para a baía de Antonina, modelando o material recém-acumulado na planície. O leito fluvial anastomosado é originado na erosão causada pelo fluxo de escoamento. Já o depósito de rompimento (*crevasse splay*) tem sua origem a partir do entulhamento por material lenhoso do canal do Jacaré e consequente rompimento, resultando na deposição do material carregado do leito anastomosado. Tal interpretação é

sustentada pela análise das linhas de fluxo. O terceiro ponto de concentração de volume de sedimentos (no setor jusante) foi formado neste estágio, alimentado pelo depósito de rompimento.

A existência de dois grupos nas amostras psamíticas é explicada por esta dinâmica. Material mais fino que estava no leito fluvial anastomosado foi transportado para a porção jusante da planície. Isso explica a significativa diferença de textura dentro das amostras psamíticas (areia a areia franca e franco arenoso a franco). Quanto a assimetria, curvas de assimetria positiva são frequentemente associadas a momentos de deposição, enquanto curvas aproximadamente simétricas sugerem combinação dos processos de erosão e deposição (FRIEDMAN, 1961; DUANE, 1964).

Os resultados obtidos confirmam a baixa maturidade textural (imaturidade) do material psamíticos na planície aluvial do rio Jacaré. São sedimentos pobremente selecionados, com presença de finos e clastos angulosos de baixa esfericidade (FELIX; HORN FILHO, 2020). Tal resultado está em acordo com a literatura, sendo esperado este comportamento em material oriundo de corridas de lama e detritos (HUNGR, 2005; REGMI et al., 2015).

Com o intuito de se compreender a dimensão do evento, mostra-se pertinente comparar a massa estimada dos pacotes sedimentares psamíticos formados em 2011 (1.7 milhão de ton.) com os valores mensurados de produção de sedimentos na BRJ e entorno. Considerando o contexto regional, a massa aqui estimada dos depósitos psamíticos é mais de 8,5 vezes o total estimado da produção de sedimentos para todas as unidades hidrográficas (bacias + sistemas insulares) que drenam para o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) valor estimado em 197.017,21 toneladas por ano (RUTYNA et al., 2021). Cabe destacar que a estimativa de volume aqui apresentada se trata de recorte dos depósitos psamíticos na planície aluvial, existindo material psefítico na planície e nos leques e canais intramontanos.

Considerando o volume aqui estimado, é possível enquadrar o evento que ocorreu na bacia do rio Jacaré como de elevada magnitude, parcialmente dentro da classe 7 ($10^6 - 10^7 \text{ m}^3$) de acordo com a proposta de Jakob (2005) (apenas considerando o volume de material). Corridas de massa de classe 7 podem destruir estruturas e partes de cidades, além de obliterar vales, leques, planícies e canais fluviais por dezenas de quilômetros (JAKOB, 2005). Se não fosse pelo aterro da BR 277, os fluxos de lama poderiam ter

atingido partes mais a jusante da planície do rio Jacaré.

A planície aluvial do rio Jacaré deve ser encarada como um estoque sedimentar, uma área fonte de material no ciclo hidrossedimentar da paisagem. Os sedimentos nesta área são inconsolidados e podem ser erodidos pelo rio, ainda mais em casos de eventos extremos pluviométricos. Apesar do predomínio da fração areia, o material sedimentar formado em 2011 apresenta expressivos valores de silte (\bar{x} 28%), fração granulométrica predominante no material dragado nos canais de navegação dos portos de Antonina e Paranaguá (BOLDRINI; PAULA, 2009). Assim, o material eventualmente erodido e transportado pelo rio, pode contribuir para a problemática do assoreamento da baía de Antonina (PAULA, 2010; PAULA, 2016).

CONCLUSÃO

Os processos gravitacionais de deslizamentos e corridas de lama e detritos na bacia hidrográfica do rio Jacaré em 2011 resultaram em depósitos psamíticos e psefíticos que cobriram cerca de 91% da planície aluvial. Os depósitos psamíticos foram os mais expressivos ($\cong 88\%$), classificados como areia franca a franco arenoso, estimado em 1.7 milhão de toneladas de sedimentos.

Os resultados demonstram a elevada magnitude do evento de 2011, visto que em um período inferior a 24 horas a BRJ movimentou mais de 8,5 vezes a produção anual de sedimentos das unidades hidrográficas que drenam para o Complexo Estuarino de Paranaguá. As transformações na planície aluvial do rio Jacaré refletem os processos genéticos de origem terrígena na planície litorânea.

Recomenda-se estudos adicionais que abordem a volumetria dos depósitos psefíticos desde os canais intramontanos até a planície aluvial. Os resultados aqui apresentados podem ter desdobramentos em ações de políticas públicas, principalmente no ordenamento territorial desta paisagem. As novas dinâmicas ambientais revelam novas fragilidades, como áreas fontes de material sedimentar, e potencialidades, considerando-se que o aporte de material sedimentar pode renovar o caráter fértil do solo, oportunizando atividades econômicas na área.

AGRADECIMENTOS

Este artigo faz parte da tese de doutorado em Geografia do primeiro autor. Ao Laboratório de Geoprocessamento e Estudos Ambientais (LAGEAMB) da UFPR. Ao Laboratório de Biogeografia e Solos (LABS) da UFPR. Ao Centro de Pesquisas Aplicadas em Geoinformação (CEPAG) da UFPR. Ao Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR) da UFPR. Ao Laboratório de Estudos Costeiros (LECOST) da UFPR.

REFERÊNCIAS

- ANGULO, R. J. Mapa do Cenozóico do litoral do Estado do Paraná. **Boletim Paranaense de geociências**, v. 55, n. 1, p. 25–42, 2004. <http://dx.doi.org/10.5380/geo.v55i0.4281>
- AVILA-DIAZ, A.; BENEZOLI, V.; JUSTINO, F.; TORRES, R.; WILSON, A. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, v. 55, n. 5, p. 1403–1426, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>.
- ÁVILA, A.; JUSTINO, F.; WILSON, A.; BROMWICH, D.; AMORIM, M. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 11, p. 114029, 2016. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/114029>.
- BOLDRINI, E. B.; PAULA, E. V. **Gestão Ambiental Portuária: Subsídio para o licenciamento das Dragagens**. 1. ed. Antonina: ADEMADAN, 2009.
- BORGA, M.; STOFFEL, M.; MARCHI, L.; MARRA, F.; JAKOB, M. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. **Journal of Hydrology**, v. 518, p. 194–205, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Arquitectura e propriedades físicas do solo. In: BRADY, N. C.; WEIL, R. R. (Eds.). **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. Porto Alegre: Bookman, 2013. p. 106–145.
- BIGARELLA, J. J. Movimentos de massa. In: **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Volume 3 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2003. p. 1024–1098.
- CAMARGO, M. G. SYSGRAN: um sistema de código aberto para análises granulométricas do sedimento. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n. 2, p. 371–378, 2006. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2006362371378>
- COSTA, J. E. Physical Geomorphology of Debris Flows. In: COSTA, J. E.; FLEISHER, P. J. (Eds.). **Developments and Applications of Geomorphology**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1984a. p. 268–317. https://doi.org/10.1007/978-3-642-69759-3_9
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.
- ECOVIA @ecovia. BR 277 - Alagamento da Ponte Jacaré, no Km 18, interdita totalmente as pistas. Não paginado. Disponível em: <https://twitter.com/ecovia/status/46297826665312256>. Acesso em: 26 jan. 2022.
- ESRI. ArcGIS 10.4.1. 2016. Versão estudante. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/get-started/setup/arcgis-desktop-quick-start-guide.htm>. Acesso em 19 mai. de 2021.
- DUANE, D. B. Significance of skewness in recent sediments, western Pamlico Sound, North Carolina. **Journal of Sedimentary Research**, v. 34, n. 4, p. 864–874, 1964. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/sepm/jsedres/article-abstract/34/4/864/95805/Significance-of-skewness-in-recent-sediments?redirectedFrom=PDF> Acesso em: 12/8/2020.
- FACURI, G. G.; PICANÇO, J. L. Evaluationas and proposals for the debris flow hazard mapping method of the GIDES Project. **Landslides**, v. 18, n. 1, p. 339–352, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01480-w>.
- FELIX, A.; HORN FILHO, N. O. Propriedade dos Sedimentos. In: **Apostila Sedimentologia**. 1. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2020. p. 29–39. Disponível em: <https://geocost.ufsc.br/>. Acesso: Janeiro 26, 2022
- FRIEDMAN, G. M. Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics. **Journal of Sedimentary Research**, v. 31, n. 4, p. 514–529, 1961. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/sepm/jsedres/article-abstract/31/4/514/95526/Distinction-between-dune-beach-and-riversands?redirectedFrom=PDF> Acesso em: 11/5/2022.
- FROUDE, M. J.; PETLEY, D. N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 18, n. 8, p. 2161–2181, 2018. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- GRAMANI, M. F. CORRIDAS DE MASSA NA SERRA DA MANTIQUEIRA: DESCRIÇÃO E AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA NO CÓRREGO DO BRAÇO. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, v. Spe., p. 15, 2018. Disponível em: <http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/sistema/index.php/revista/article/view/387>. Acesso em: 28 fev. 2022.
- HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, v. 69, n. 1, p. 14–47, 1981. <https://doi.org/10.1109/PROC.1981.11918>
- HUNGR, O. Classification and terminology. In: JAKOB, M.; HUNGR, O. (Eds.). **Debris-flow Hazards and Related Phenomena**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. p. 9–23. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_2
- HUNGR, O.; LEROUÉIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**, v. 11, n. 2, p. 167–194, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>

- IAT - Instituto Água e Terra. **Base planialtimétrica da porção central do litoral do Paraná**. Curitiba, 2016. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/>. Acesso em: 28 fev. 2022.
- INAPAR - Instituto das Águas do Paraná. **Base hidrográfica do estado do Paraná na escala 1:50.000**. 2012. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=81&SUMARIO=1228>. Acesso em: 28 fev. 2022.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha municipal**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malas-territoriais/15774-malas.html?=&t=downloads>. Acesso em: 28 fev. 2022.
- JAKOB, M. A size classification for debris flows. **Engineering Geology**, v. 79, n. 3, p. 151–161, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.01.006>
- KISSNER, O. **Rio Jacaréi após os deslizamentos**. Agência Estadual de Notícias do Paraná. 2011. 1 fotografia, color.
- KOBIYAMA, M.; MICHEL, G. P.; ENGSTER, E. C.; PAIXÃO, M. A. Historical analyses of debris flow disaster occurrences and of their scientific investigation in Brazil. **Labor e Engenho**, v. 9, n. 4, p. 76–89, 2015. <https://doi.org/10.20396/lobore.v9i4.8639477>
- KUMARI, S.; CHAUHAN, A.; SHANKAR, V. Assessment of climate change implications on landslides in mid and high hills of Himachal Pradesh, India. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, n. 14, p. 1323, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07668-1>.
- LI, Y.; WANG, B.; ZHOU, X.; GOU, W. Variation in grain size distribution in debris flow. **Journal of Mountain Science**, v. 12, n. 3, p. 682–688, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11629-014-3351-3>
- MACHADO, R. **Vista em sobrevoo da comunidade de florestas após os movimentos de massa**. SECJ. 2011. 1 fotografia, color.
- MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; BARROS, L. F. P. Depósitos fluviais e feições deposicionais. In: MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; BARROS, L. F. P. (Eds.). **HIDROGEOMORFOLOGIA: Formas, processos e registros sedimentares fluviais**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020. p. 259–278.
- MANCINI, F. Mapeamento e Reconhecimento de Rochas Sedimentares. In: NADALIN, R. J. (Ed.). **Tópicos Especiais em Cartografia Geológica**. Curitiba: Departamento de Geologia - UFPR, 2016. p. 181–204.
- MINEROPAR – Minerais do Paraná. **Atlas geológico do Estado do Paraná - Folha de Curitiba (SG-22-X-D) MINERAIS DO PARANÁ AS**. 1. ed. Curitiba, 2006. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Mapeamento-Geologico>. Acesso: Janeiro 26, 2022
- MINEROPAR - Minerais do Paraná. **MAPEAMENTO GEOLÓGICO–GEOTÉCNICO DA PORÇÃO LESTE DA SERRA DO MAR DO ESTADO DO PARANÁ**. 1. ed. 102p. 2011. Curitiba. Disponível em: <https://www.documentador.pr.gov.br/documentador/pub.do?action=d&uuid=@gtf-escriba-minerop@26e14cdc-3820-4658-8bbe-560f106c019b>. Acesso: Agosto 17, 2020
- ORTEGA, J. A.; GARZÓN HEYDT, G. Geomorphological and sedimentological analysis of flash-flood deposits: The case of the 1997 Rivillas flood (Spain). **Geomorphology**, v. 112, n. 1, p. 1–14, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.05.004>
- PAREDES, J. M.; OCAMPO, S. M.; FOIX, N.; OLAZÁBAL, S. X.; VALLE, M. N.; MONTES, A.; ALLARD, J. O. **Geomorphic and Sedimentological Impact of the 2017 Flash Flood Event in the City of Comodoro Rivadavia (Central Patagonia, Argentina)**. (P. Bouza, J. Rabassa, A. Birmes, Eds.) Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina. **Anais...** Cham: Springer International Publishing, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66161-8_1
- PAULA, E. V. **Análise da produção de sedimentos na área de drenagem da Baía de Antonina/PR: uma abordagem geopedológica**. Tese (Doutorado em Geografia) – Curitiba: UFPR. 2010.
- PAULA, E. V. **Análise da Produção de Sedimentos na Área de Drenagem da Baía de Antonina, Paraná: Contribuições ao planejamento do território**. In: REIS, R. A. et al. (Eds.). **Litoral do Paraná: Território e Perspectivas**. Curitiba: Brazil Publishing, 2016. p. 11–35.
- PAZ, O. L. S.; PAULA, E. V. **PLANÍCIE DO RIO JACAREÍ APÓS OS MOVIMENTOS DE MASSA DE 2011: CONSIDERAÇÕES A PARTIR DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE TRINCHEIRA E MUDANÇAS DO CANAL**. **Revista Cerrados**, v. 19, n. 1, p. 83–99, 2021. <https://doi.org/10.46551/rc24482692202106%20>
- PICANÇO, J. L.; NUNES, L. H. A severe convective episode triggered by accumulated precipitation in the coast of Paraná state, Brazil. 2013. In: European Conference on Severe Storms, 7. p. 3–7. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305699009_A_Severe_convective_episode_triggered_by_accumulated_precipitation_in_the_coast_of_Parana_State_Brazil Acesso em: 15/5/2020.
- PINTO, R. C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S. C. Classificação dos movimentos de massa ocorridos em março de 2011 na Serra da Prata, Estado do Paraná. **Geoinf: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia**, v. 4, n. 1, p. 3–27, 2012. <https://doi.org/10.4025/geoinf.v4i1.49152>
- PINTO, R. C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S. C. Movimentos de Massa como Processos Naturais de Evolução das Encostas, Estudo de Caso: Bacia do Rio Jacaréi, Municípios de Morretes e Paranaguá–PR. **Geoinf: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia**, v. 6, n. 1, p. 23–45, 2014. <https://doi.org/10.4025/geoinf.v6i1>
- REGMI, N. R.; GIARDINO, J. R.; MCDONALD, E. V.; VITEK, J. D. A Review of Mass Movement Processes and Risk in the Critical Zone of Earth. In: GIARDINO, J. R.; HOUSER, C. (Eds.). **Developments in Earth Surface Processes**. Elsevier, 2015. v. 19p. 319–362.

- <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63369-9.00011-2>
- ROSS, J. L. S.; FIERZ, M. S. M. A Serra do Mar e a Planície Costeira em São Paulo: morfogênese, morfodinâmica e as suas fragilidades. **Boletim Paulista de Geografia**, n. 100, p. 17–38, 2018. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/index.php/boletim-paulista/article/view/1497>. Acesso: Janeiro 26, 2022
- RUTYNA, B. B.; SOARES, C. R.; WROBLEWSKI, C. A.; PAULA, E. V. Assoreamento nas baías de Antonina e de Paranaguá – PR: análise integrada das áreas fontes de sedimentação e obras de dragagem. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 2, p. 676–693, 2021. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p676-693>
- SALAZAR JUNIOR, O. **Vista em sobrevoo das cicatrizes na Serra da Prata no desastre águas de março**. MINEROPAR - Minerais do Paraná. 2011a. 1 fotografia, color.
- SALAZAR JUNIOR, O. **Vista em sobrevoo da ponte destruída da BR 277 sobre o rio Jacareí**. MINEROPAR - Minerais do Paraná. 2011b. 1 fotografia, color.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.
- Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Paranaguá (SEMMA). **Imagem pancromática WorldView-1**. Litoral do Paraná, 2019. Imagem de satélite. WorldView-1, 2 mai 2011.
- SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; SCHILIPACK, P.; DIAS, S. M. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar Paranaense apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, 2014. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v15i1.366>
- SILVEIRA, C. T. DA; FIORI, A. P.; FERREIRA, A. M.; GÓIS, J. R. DE; MIO, G. DE; SILVEIRA, R. M. P.; MASSULINI, N. E. B.; LEONARDI, T. M. H. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacareí, Paraná. **Sociedade & Natureza**, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000300014>
- STEVANUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. **Geomorfologia fluvial**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. Trends in the Frequency of Intense Precipitation Events in Southern and Southeastern Brazil during 1960–2004. **Journal of Climate**, v. 24, n. 7, p. 1913–1921, 2011. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3511.1>
- VIEIRA, B. C.; GRAMANI, M. F. Serra do Mar: the most “tormented” relief in Brazil. In: **Landscapes and landforms of Brazil**. Springer, 2015. p. 285–297. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_26
- WANG, B.; LI, Y.; LIU, D.; LIU, J. Debris flow density determined by grain composition. **Landslides**, v. 15, n. 6, p. 1205–1213, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0912-x>
- YANG, T.; LI, Y.; ZHANG, Q.; JIANG, Y. Calculating debris flow density based on grain-size distribution. **Landslides**, v. 16, n. 3, p. 515–522, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-01130-2>
- ZAPATA, R.; SIMIANO, L. F.; PINHEIRO, E. G. O EVENTO ÁGUAS DE MARÇO E SUA AVALIAÇÃO DE DANOS E PERDAS. In: PINHEIRO, E. G.; PEDROSO, F. F. F. (Eds.). **CONSTRUINDO UM ESTADO RESILIENTE: O MODELO PARANAENSE PARA A GESTÃO DO RISCO DE DESASTRES**. 1. ed. Curitiba: CEPED/FUNESPAR, 2016. p. 34–51.
- ZERI, M.; S. ALVALÁ, R.C.; CARNEIRO, R.; CUNHA-ZERI, G.; COSTA, J.M.; ROSSATO SPATAFORA, L.; URBANO, D.; VALL-LLOSSERA, M.; MARENGO, J. Tools for Communicating Agricultural Drought over the Brazilian Semiarid Using the Soil Moisture Index. **Water**, v. 10, p. 1–15, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10101421>

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Otacílio Lopes de Souza da Paz: concebeu o estudo, desenvolveu a metodologia proposta, coletou e analisou os dados e redigiu o texto. Eduardo Vedor de Paula: concebeu o estudo e contribuiu com o texto. Realizou campanhas de campo e discussão dos resultados obtidos. Responsável pela aquisição de financiamento. Coordenador do laboratório onde esta pesquisa foi desenvolvida.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.