



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Panorama das Alterações nos Padrões de Precipitação e Erosão diante de Mudanças Climáticas: Revisão de Literatura

Ana Paula Kiefer¹, Rafaela Mattos Costa², Carina Petsch³, Anderson Augusto Volpato Scoti⁴

¹Graduada em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima 1000, CEP 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul. anapaulakiefer@gmail.com (autor correspondente). ²Mestranda em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 8807, Centro Polar e Climático, CEP 91501-970, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. (51) 3308-7327. raffaellamattos@hotmail.com. ³Professor Adjunto I, Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima 1000, CEP 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul. carinapetsch@gmail.com. ⁴Professor Adjunto I, Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima 1000, CEP 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul. ascoti2@gmail.com

Artigo recebido em 31/12/2020 e aceito em 23/05/2021

RESUMO

Os efeitos das mudanças climáticas na erosividade possivelmente afetarão os processos erosivos no século 21, tornando emergente a discussão dessa temática. Sendo assim, os objetivos desta revisão de literatura são: traçar as relações entre a variação de perda de solos e erosividade diante de mudanças climáticas, apresentando produtos cartográficos das décadas passadas e para todo o século 21; apresentar um panorama geral de pesquisas (publicadas entre 2016 e 2021); e demonstrar quais são os desafios e próximos passos na pesquisa sobre essa temática. Para tanto, a pesquisa de artigos foi realizada nas plataformas do Portal de Periódicos da CAPES, Google Scholar e Science Direct, totalizando 78 artigos. Foram consideradas pesquisas de natureza conceitual, com revisões de literatura sobre os temas, e de natureza procedimental, com cálculos do fator R e estimativas de perda de solos. Os trabalhos consultados mostram que a erosividade estimada e a taxa de perda de solos devem aumentar e diminuir em função das futuras mudanças climáticas. Embora em escala global, há estimativas do aumento de erosividade para a área tropical do planeta, atingindo majoritariamente países em desenvolvimento como o Brasil. Isso demonstra a emergência da elaboração de estudos para o país, em escala regional, de bioma e de bacias hidrográficas. Nesse sentido, ressaltamos a importância da abordagem sistêmica, que pode ser proporcionada pela Geografia nos estudos dessa temática, visto que os desafios se relacionam à dificuldade de integrar diversos fatores ambientais e obter dados de campo nas modelagens preditivas de perda de solo.

Palavras-chave: erosividade, eventos extremos de precipitação, modelos climáticos globais.

Overview of Changes in Rainfall and Erosion Patterns in the Face of Climate Change: Literature Review

ABSTRACT

The effects of climate change on erosivity are likely to affect erosion processes in the 21st century, which makes the discussion emerging. Thus, the goals of this literature review are: to trace the relationship between the variation in soil loss and erosivity in the face of climate change, presenting cartographic products from the past decades and for the entire 21st century; present an overview of research (published between 2016-2021); demonstrate challenges and next steps in research on this topic. Therefore, the search for papers was carried out on the platforms of the CAPES Journal Portal, Google Scholar and Science Direct, totaling 78 papers. Conceptual researches was considered, with literature reviews on the themes and procedural researches with calculations of the R factor and soil loss estimate. The consulted papers show that the estimated erosivity and the rate of soil loss are expected to increase and decrease as a result of future climate changes. Although, on a global scale, there are estimates of the increase in erosivity for the tropical area of the planet, mainly affecting developing countries like Brazil. This demonstrates the emergence of studies for the country, on a regional scale, of biomes and hydrographic basins. In this sense, we emphasize the importance of the systemic approach, which can be provided by Geography in the studies of this theme, since the challenges are related to the difficulty of integrating various environmental factors and obtaining field data in predictive models of soil loss.

Keywords: erosivity, extreme precipitation events, global climate models

Introdução

Ao passo que mais evidências sobre as mudanças climáticas induzidas pelo homem se adensam, a atenção dos pesquisadores em todo o mundo tem sido voltada para os seus potenciais impactos sobre o meio ambiente (Giang et al., 2017; Hatfield et al., 2020). Nessa perspectiva, o relatório especial do IPCC (2019) – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas -, intitulado “Mudanças climáticas e Terra”, apresentou as mudanças climáticas relacionadas a assuntos como desertificação, degradação do solo e intensificação dos processos erosivos, como também corrobora Panagos et al. (2018), que destacam que o solo está sujeito a várias ameaças no futuro. A erosão do solo – foco deste estudo – é a maior ameaça global para a degradação do solo e para a sustentabilidade ambiental (Jiang et al., 2019; Borrelli et al., 2020; Bhattacharya et al., 2020).

Salienta-se, contudo, que a erosão do solo é um processo natural (Guo et al., 2018) e, segundo Kourgialas et al. (2016), trata-se do transporte do solo pelas forças do vento e/ou da água – erosão eólica e hídrica, respectivamente - que ocorre a uma taxa mais rápida do que os vários processos de formação do solo. Nesse viés, a erosão do solo afeta de maneira negativa a sua estrutura, a retenção de água e nutrientes, o conteúdo de matéria orgânica e, por fim, sua fertilidade (Montanarella et al., 2016).

E como as mudanças climáticas irão agravar esse processo natural? Li e Fang (2016) e IPCC (2019) afirmam que variações no padrão e a intensidade da precipitação deverão impactar a erosão do solo diretamente. Dessa forma, a proteção dos solos em escala mundial é um desafio diante do pronunciado aumento da erosão, principalmente induzida pela atividade humana e por mudanças climáticas, que foram reconhecidas como os principais fatores que aumentarão as taxas de erosão do solo no futuro (Li e Fang, 2016; Mondal et al., 2016a; Borrelli et al., 2017; Zhu et al., 2019a).

Variações no padrão de chuvas causarão uma maior taxa de erosão devido a diferentes fatores: a capacidade de desagregar as partículas do solo por conta do impacto das gotas de chuva, o escoamento superficial direto e o transporte de sedimentos (Mondal et al., 2016a; Pal e Chakraborty, 2019; Riquetti et al., 2020). Ademais, com as mudanças climáticas, espera-se um aumento de eventos extremos de precipitação, o que provocará o aumento da erosão em vários locais da Terra, com sérias implicações para os sistemas ambientais e para a atividade humana

(Eekhout et al., 2018; Ohba e Sugimoto, 2018; Eekhout e Vente, 2019; Duan et al., 2020).

Contudo, ressaltamos que, embora os impactos da mudança na distribuição temporal da chuva sejam frequentemente combinados com os efeitos do uso da terra, a temperatura também desempenha um papel ao afetar o degelo e a cobertura vegetal, por exemplo (Kourgialas et al., 2016; Li e Fang, 2016). Nesse viés, de acordo com Panagos et al. (2016) outras variáveis se fazem presentes nesse processo e devem ser consideradas:

[...] as principais causas da erosão do solo pela água são fatores geomorfológicos que envolvem infiltração e escoamento em encostas íngremes; combinados com risco climático como a erosividade da chuva, aumento do número de dias secos combinados com intensos eventos extremos; e atividades humanas como por exemplo, mudanças no uso da terra, desmatamento, sobrepastoreio e intensificação da agricultura (Panagos et al., 2016, p.01).

Devido às interações entre esses fatores, os mecanismos que ditam a perda de solo são complexos (Zhu et al., 2019a). O número de fatores ambientais envolvidos é amplo (Mahala, 2018), o que torna difícil a análise da erosão do solo causada por mudanças climáticas e, nesse sentido, salientamos que a variabilidade e as interações são dinâmicas e variáveis no tempo e no espaço. Entre esse conjunto de fatores de risco à erosão do solo, a erosividade da chuva e a cobertura/manejo do solo são apontadas como os fatores mais dinâmicos durante o ano e de variabilidade ao redor do mundo devido às diferentes características do clima (Li e Fang, 2016; Mondal et al., 2016a; Ballabio et al., 2017). Já a topografia e os solos são conhecidos como fatores estáticos porque não experimentam mudanças consideráveis em um longo período de tempo (Li e Fang, 2016). Sendo assim, as taxas de erosão do solo podem aumentar ou diminuir diante de mudanças climáticas, dependendo da localização geográfica, de cenários climáticos, padrões de precipitação, condições topográficas e práticas de manejo do solo.

Sobretudo, os impactos da intensificação da erosão devem ser avaliados no âmbito das consequências diretas na sobrevivência humana. Kopittke et al. (2019) ressaltam que os solos estão sujeitos a uma pressão sem precedentes, principalmente em relação à demanda para

produção de alimentos, fibras, energia e suporte físico para infraestrutura. Um aumento na produção agrícola mundial é essencial para suprir o aumento previsto da população mundial (Parajuli et al., 2016; Kopittke et al., 2019). Ademais, é necessário preservar os solos, visto que possuem diversas funções, como o armazenamento de biomassa, nutrientes, organismos e água (Stoessel et al., 2018; Sonderegger et al., 2020), desempenhando um papel único para sustentar todos os ecossistemas, para animais, plantas e seres humanos (Breure et al., 2018).

Refletir sobre os cuidados dos solos é fundamental para a garantia de sobrevivência humana e também para a manutenção econômica de muitos países. Espera-se que as mudanças climáticas sejam mais severas em países em desenvolvimento, desencadeando desastres ambientais em comunidades e ecossistemas vulneráveis (Mal et al., 2018; Miheretu e Yimer, 2018) com baixa capacidade de se adaptar aos novos cenários ambientais. A erosão do solo pode diminuir sua fertilidade e reduzir a camada arável (Silva et al. 2018), enquanto as mudanças climáticas podem agravar a situação (Parajuli et al., 2016) e gerar prejuízos locais que atingem diretamente os agricultores por meio da perda de terras férteis (Panagos et al., 2018).

Além disso, “a dinâmica da erosão dos solos é um processo cíclico, equilibrado e contribui para a transformação do modelado da paisagem” (Caldas, et al. 2019, p. 1416). Entretanto, a ação humana intensifica a perda de materiais dos solos. Como exemplo, na América do Sul extensas áreas são utilizadas para o agronegócio, principalmente na região centro-sul do Brasil, sudeste do Paraguai e centro-leste/norte da Argentina, que estão entre as maiores regiões produtoras de grãos do mundo. Dessa forma, essas regiões necessitam do desenvolvimento de pesquisas científicas visando a manutenção da produtividade do solo por meio de práticas de conservação (Riquetti et al., 2020). Para o Brasil, especificamente, as mudanças climáticas podem modificar a aptidão agrícola de várias regiões do país, além de inviabilizar o cultivo em algumas porções, visto que “a erosão do solo e a degradação das terras representam um grande problema” (Dornellas et al., 2019, p.2).

Além disso, a erosão custa caro! A erosão hídrica é a principal responsável pela degradação global do solo e pelos declínios de produtividade (Wei et al., 2017). Nesse viés, Sartori et al. (2019) buscaram estimar o impacto econômico da erosão hídrica do solo na economia mundial, e o valor projetado foi de um custo anual de 8 bilhões de dólares para o PIB (Produto Interno Bruto) global. Outros impactos levantados por Sartori et al.

(2019) se referem à segurança alimentar, na medida em que é prevista a redução da produção agroalimentar global em 33,7 milhões de toneladas e, além disso, o aumento nos preços agroalimentares mundiais de 0,4% a 3,5%, variando entre a categoria de produtos. Sendo assim, em um planeta com oito bilhões de pessoas que enfrentam as ameaças críticas das mudanças climáticas, escassez de água e esgotamento da fertilidade do solo, a economia agrícola tem o desafio de manter a segurança alimentar, respeitando as fronteiras ambientais e ecológicas (Altieri e Nicholls, 2017). Ademais, enfrentaremos o problema do aumento da erosão que também contribuirá para o carreamento de sedimentos e solos férteis, inviabilizando o uso da terra para a produção de alimentos. A erosão do solo constitui uma preocupação mundial em regiões agricultáveis, sendo que os prejuízos possivelmente serão gigantescos em termos econômicos e para a manutenção da vida.

Para monitorar e avaliar temporalmente e espacialmente a variação de perda de solos em uma determinada área, são utilizados amplamente modelos de previsão de erosão hídrica ao redor do mundo (Eekhout et al., 2021). Considerando que o monitoramento da erosão do solo exige demasiado tempo e auxílio financeiro, a modelagem pode ser realizada por investigação remota, não apenas representando as condições atuais, mas também auxiliando na previsão de possíveis cenários para o século XXI (Zare et al., 2016; Luetzenburg et al., 2020). Os impactos potenciais das mudanças climáticas sobre a erosão do solo podem ser avaliados inserindo diversos dados, como os tipos de solos, os usos da terra, as práticas de manejo e conservação, a declividade das vertentes, o comprimento de rampa, a erosividade da chuva (será discutida adiante) e a erodibilidade do solo, entre outros.

De acordo com Panagos et al. (2017b) e Liu et al. (2020), a erosão do solo é difícil de ser estimada e prevista em grandes escalas de maior detalhe. Sendo assim, os modelos contemplam comumente as escalas regional, nacional e continental, embora os estudos com modelos em escala global sejam de extrema importância, já que a erosão e a impermeabilização do solo constituem a maior ameaça à sustentabilidade do planeta, causando problemas na segurança hídrica e alimentar (Panagos et al., 2017b) conforme discutido acima.

Vários estudos foram realizados para avaliar as alterações da erosão do solo em resposta às mudanças nas condições climáticas considerando a variação na precipitação em

diferentes modelos climáticos globais (MCG) (Giang et al., 2017). Os MCG determinam os efeitos das alterações nas concentrações de gases de efeito estufa nas variáveis climáticas globais, como temperatura, precipitação, umidade, evapotranspiração e velocidade do vento (Leta et al., 2016), considerando, portanto, as mudanças em vários sistemas, como o atmosférico, o oceânico e o terrestre no Planeta. Existem mais de 40 MCG em todo o mundo, dos quais cinco são mais comumente usados (Li e Fang, 2016). Embora a resolução diária seja suficiente na maioria dos estudos de modelagem de erosão, algumas variáveis climáticas relevantes para os processos de erosão, como intensidade de chuva em 30 minutos e temperatura máxima e mínima diária, estão ausentes.

Salienta-se que há uma necessidade imediata de desenvolver pesquisas visando a conservação do solo nos próximos anos diante das mudanças climáticas que impulsionam o aumento do risco de erosão (Xia et al., 2020). Por conseguinte, os modelos de erosão do solo também são úteis para aumentar a compreensão dos processos ambientais e podem prover apoio na tomada de decisões (Panagos e Katsoyiannis, 2019), buscando aumentar a produtividade e melhorando o manejo de diferentes áreas (Caldas et al., 2019). Outrossim, a conservação do solo é essencial para reduzir a probabilidade de inundação e sedimentação de reservatórios e canais de drenagem, em função do transporte de sedimentos erodidos (Roy, 2018). A erosão do solo pode ser controlada ou até reduzida usando técnicas de gestão sustentável da terra e incentivos políticos adequados (Borrelli et al., 2020), mas para isso é necessário conhecer e mapear as áreas que já são mais vulneráveis. Sendo assim, diante da grande quantidade de modelos de previsão de erosão do solo, a escolha do método adequado deve ser baseada na disponibilidade de dados e no respectivo foco de pesquisa (Pandey et al., 2016).

Destarte, nossas hipóteses se configuram em três ideias centrais: (i) ainda há uma escassez de trabalhos com escalas de detalhe associando as taxas de perda de solo por erosão hídrica às mudanças climáticas; (ii) acredita-se que as pesquisas científicas possuem concentração em alguns países desenvolvidos, como os europeus e os Estados Unidos da América (EUA); (iii) e que há resultados apontando para o aumento e também a diminuição de erosividade e perda de solos para as próximas décadas (2020-2100), variando de acordo com a escala do estudo, área geográfica,

MCG considerado e o modelo matemático de previsão.

Nossa revisão de literatura justifica-se na medida em que procuramos investigar quais são os panoramas e resultados apresentados no cenário global e brasileiro a partir de uma publicação em língua portuguesa. A partir dos pressupostos apresentados, os objetivos do artigo consistem em: (i) traçar as relações entre a variação de perda de solos e erosividade diante de mudanças climáticas; (ii) entender quais são os impactos das mudanças climáticas na erosão do solo a nível mundial, continental e nacional, apresentando produtos cartográficos das décadas passadas e para todo o século 21; (iii) apresentar um panorama geral de pesquisas (publicadas entre 2016 e 2021) que documentam alterações na erosão do solo e erosividade da precipitação, que estão ligadas às mudanças climáticas; e (iv) apresentar quais são os desafios e próximos passos que devem ser seguidos na pesquisa sobre esta temática.

Material e métodos

O presente trabalho segue os parâmetros de uma pesquisa qualitativa do gênero “revisão de literatura”. Nesse sentido, o corpus de análise da pesquisa constitui-se a partir de um levantamento de pesquisas brasileiras e internacionais na temática de mudanças climáticas, erosividade e perda de solos. A busca foi encerrada em 04 de maio de 2021 e limitou-se a artigos do período 2016-2021. Para a elaboração deste trabalho, a pesquisa científica bibliográfica foi realizada utilizando os termos em inglês “erosivity and climate change”, “soil loss and climate change”, “erosion and climate change”, “predicting soil loss and climate change”, “rainfall erosivity climate change impacts” e “soil loss, climate change and Brazil” nos bancos de dados do Science Direct e Google Scholar. Para as produções em língua portuguesa, os trabalhos foram pesquisados nas plataformas Portal de Periódicos da CAPES e Google Scholar, com os termos “erosividade e mudanças climáticas”, “perda de solos e mudanças climáticas”, “erosão e mudanças climáticas” e “fator R e mudanças climáticas”.

Os artigos foram considerados aptos a serem inclusos nesta revisão de literatura se: (1) além de haver um cálculo do fator R e perda de solos para períodos anteriores a 2020, também houvesse a estimativa para o futuro; (2) a pesquisa contemplasse somente dados de fator R para o passado, mas possuísse uma escala global, visto que forneceria um panorama geral da erosividade nas últimas décadas, servindo também como uma linha base para o leitor; (3) as pesquisas possuíssem

natureza conceitual, com revisões bibliográficas sobre os temas, e fossem de natureza

procedimental, com cálculos do fator R e estimativas de perda de solos.

Breve análise dos artigos consultados

Considerando os 78 artigos consultados, os anos de 2019 e 2020 representam o maior número de pesquisas, com 17 (21,5%) artigos para cada ano (Figura 1-A). Quanto aos autores que mais tiveram trabalhos citados, destacaram-se Panagos e Borrelli, cada um com participação em 6 pesquisas. Ballabio apresentou 4 pesquisas e Nearing e Poesen com 3. Salienta-se que somente 5 pesquisas foram desenvolvidas com autores de uma mesma instituição, sendo que a maioria foi realizada com parcerias de diferentes instituições dentro do país, ou parcerias entre instituições de diversos países. Destacam-se no Brasil as seguintes instituições e grupos de pesquisas: Embrapa Pantanal, Corumbá, MS; Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP; Pós-Graduação em Meio Ambiente, Universidade Anhanguera, Campo Grande, MS; Departamento de Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Corumbá, MS; Instituto Federal do Paraná, Campus Assis Chateaubriand, PR; Agência Nacional de Águas, Gestão e Supervisão da Rede Nacional de Hidrometeorologia, Brasília, DF; Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais; Universidade Federal de Pelotas; Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; Universidade Federal do Pará; Universidade

Federal Rural da Amazônia; Centro de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Minas Gerais; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial e de Sistemas-MEPROS, Pontifícia Universidade Católica de Goiás e Universidade de Brasília. Quanto ao cenário internacional, destaca-se a predominância de autores de instituições chinesas; autores da European Commission, Joint Research Centre, Directorate for Sustainable Resources, localizada na Itália; e outros autores ligados a instituições norte-americanas.

Foram apresentados artigos de 48 periódicos diferentes. A revista com maior número de artigos consultados foi a *Science of Total Environmental* com 8 pesquisas (10%); o periódico *Water* teve 7 (8,8%) e a revista CATENA com 6 (7,5%) (Figura 1-B). Quanto as palavras-chave mais utilizadas (Figura 1-D), destacam-se “erosão e erosão do solo” com 98 usos; mudanças climáticas com 91; erosividade com 84; agricultura com 72; e bacias hidrográficas com 68. Quanto a escala de estudo, as bacias hidrográficas constituem as unidades de análise mais utilizadas, com 45%; estudos regionais correspondem a 32% (Figura 1-C).

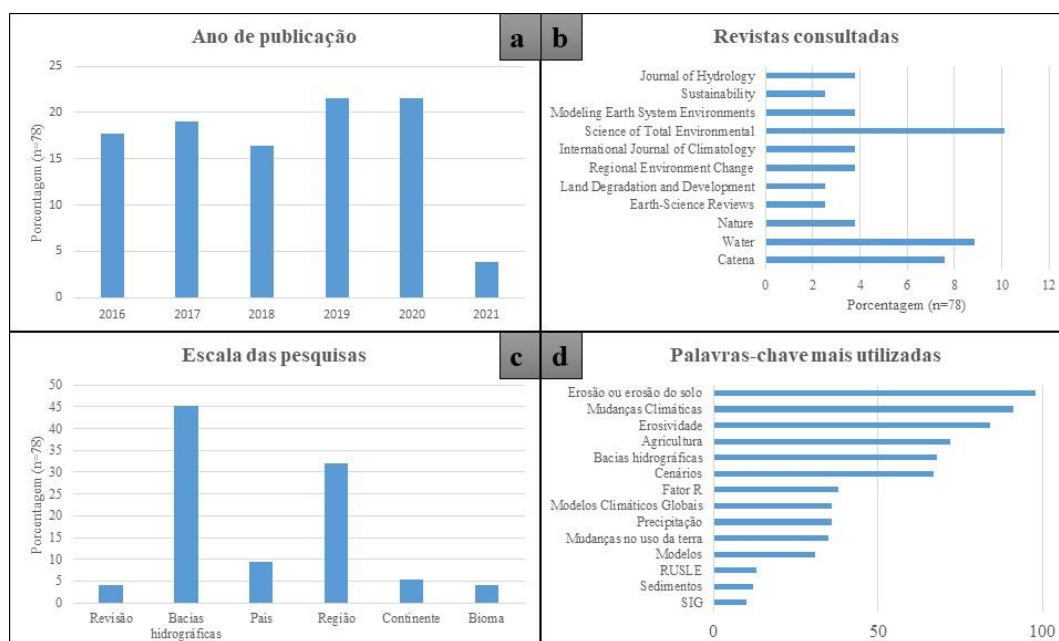


Figura 1: Breve análise estatística dos 78 artigos consultados: A – refere-se ao ano de publicação; B – representa as revistas consultadas; C – demonstra a escala das pesquisas (predominância da unidade de análise de bacias hidrográficas); d – mostra as palavras-chave mais utilizadas.

Pressupostos teóricos: mudanças climáticas, erosividade e perda de solos

As mudanças climáticas têm um efeito expressivo em vários processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica (Marhaento et al., 2018; Nilawar e Waikar, 2019). A interação entre a erosão e as mudanças climáticas é complexa, visto que ambas representam mudanças abruptas em sistemas que se encontram (ou se encontravam) em equilíbrio dinâmico. A influência do aumento da temperatura e da mudança nos padrões de chuva nos processos erosivos é mostrada na Figura 2 (traduzida de Li e Fang, 2016). Assim como no aumento da temperatura, as mudanças na precipitação geram alterações em sistemas que, constantemente, estão em busca de equilíbrio. Por se tratar de mudanças sistêmicas, ou seja, interligadas de forma holística, a análise das modificações demanda uma discussão dialética que será apresentada a seguir.

O aumento das taxas pluviométricas pode resultar no aumento ou diminuição da biomassa

vegetal. Essas alterações podem aumentar a umidade do solo, ampliar sua vedação e potencializar o escoamento superficial. Ou seja, haverá aumento dos processos erosivos causados pela precipitação. Com o aumento das temperaturas, a matéria orgânica, importante item da composição dos solos, que tem papel crucial tanto na fertilidade do solo quanto na estabilidade física e química de microagregados e macroagregados, acaba sendo sintetizada de uma forma mais rápida, ocasionando perdas de fertilidade e desestabilização de compostos minerais, amplificando, ainda, as taxas de carbono na atmosfera. A queda nas taxas de matéria orgânica do solo associada à amplificação das precipitações pluviométricas ocasiona a desestabilização dos horizontes superiores, e a força motriz, gerada pelo impacto das gotas de chuva, assim como os fluxos laminares e concentrados, carrega os sedimentos para os níveis de base.

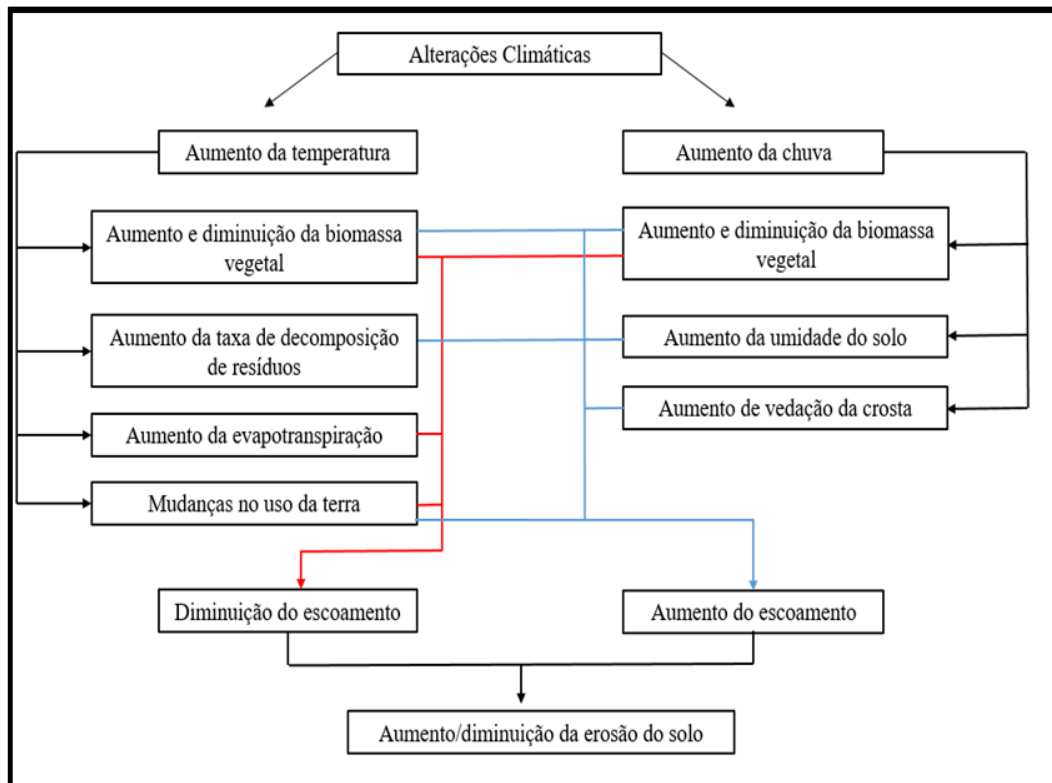


Figura 2: Ilustração do mecanismo de impacto das mudanças climáticas na erosão do solo. As linhas em vermelho indicam diminuição e as linhas em azul indicam o aumento. Fonte: Li e Fang (2016)

Tradução: Autores.

Conforme já apresentado, nesta revisão de literatura iremos focar na erosão causada pelas águas da chuva, que está ligada ao conceito de

erosividade. A erosividade da chuva (fator R) é um índice que descreve o poder da chuva de causar erosão do solo considerando sua duração,

quantidade e intensidade (Nearing et al., 2017; Gericke et al., 2019). Refere-se a uma energia cinética gerada a partir das gotas de chuva na superfície (Li e Ye, 2018), portanto indica a “agressividade” da chuva em separar as partículas do solo dos materiais originais (Nunes et al., 2016). A erosividade da chuva é um dos parâmetros mais importantes a serem inseridos em modelos de previsão de erosão de solo, especialmente na USLE (Universal Soil Loss Equation) e RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), além de ser um dos fatores climáticos que mais condicionam a erosão hídrica (Gupta e Kumar, 2017; Panagos et al., 2017a; Pal et al., 2021). A RUSLE é amplamente utilizada em estudos envolvendo estimativas de perdas de solo em função de mudanças climáticas (Teng et al., 2018; Pal e Chakraborty, 2019; Chuenchum et al., 2020; Bhattacharya et al., 2020; Borelli et al., 2020).

Destaca-se que a taxa de erosão do solo apresenta uma relação não linear com a erosividade da chuva, que depende principalmente do tamanho das gotas, sua intensidade e duração (Das et al., 2018). Dessa forma, Nearing et al. (2017) conceituam a perda de solo como a quantidade de sedimento que atinge o final de uma encosta que está sofrendo erosão hídrica, ou ainda, é a massa de solo perdida por unidade de área e tempo. Sendo assim, algumas pesquisas se restringem ao cálculo do potencial da precipitação em causar a erosão hídrica, enquanto outros autores trazem estudos avaliando, além da erosividade, outros fatores integrados em um modelo matemático de previsão de perda de solo.

As mudanças climáticas podem alterar a erosividade da chuva devido à alteração dos padrões dela (Azim et al., 2016; Mondal et al., 2016a; Riquetti et al., 2020). Essas mudanças resultam no aumento da intensidade da chuva, o que aumenta o seu poder erosivo (erosividade) e, portanto, aumenta a probabilidade de erosão

hídrica (IPCC, 2019), conforme também apontado no item “Introdução”; conseqüentemente ocorrem alterações nos processos hidrológicos e erosivos (Panagos et al., 2017b). O fator R é um indicador climático que pode sofrer alterações devido às mudanças climáticas ao longo do século XXI e seu estudo será fundamental para o gerenciamento das atividades agrícolas (Riquetti et al., 2020). Dessa forma, o estudo da erosividade atrelada à perda de solo por erosão hídrica é fundamental para a compreensão direta de como as mudanças climáticas irão se materializar em nosso cotidiano, configurando a necessidade de refletir sobre estratégias de conservação do solo.

Erosividade e perda de solos: estimativas a nível global

Li e Fang (2016) realizaram um trabalho de revisão relacionando os conceitos de erosão hídrica e mudanças climáticas e apontam que o número de publicações sobre o tema era menor que 25 em 1990 e passou de 250 em 2014 de acordo com o *Web of Science Core Collection*. Com o desenvolvimento de MCG para predição de erosão, o número de artigos publicados a respeito dos impactos das mudanças climáticas na erosão do solo tem aumentado desde os anos 2000 em todo o mundo (Li e Fang, 2016).

Avaliando ainda o panorama em relação aos países que concentram as publicações (Figura 3), temos a predominância dos países desenvolvidos, como os Estados Unidos da América e a China - entre 213 e 705 estudos - como os principais produtores de estudos sobre mudanças climáticas e erosividade do solo, com destaque também para o Canadá e a Austrália, entre 102-212 trabalhos. Entretanto, no Brasil, percebe-se ainda a necessidade de maior número de estudos, abrangendo diferentes áreas do território e utilizando diferentes modelos voltados à previsão da perda de solos.

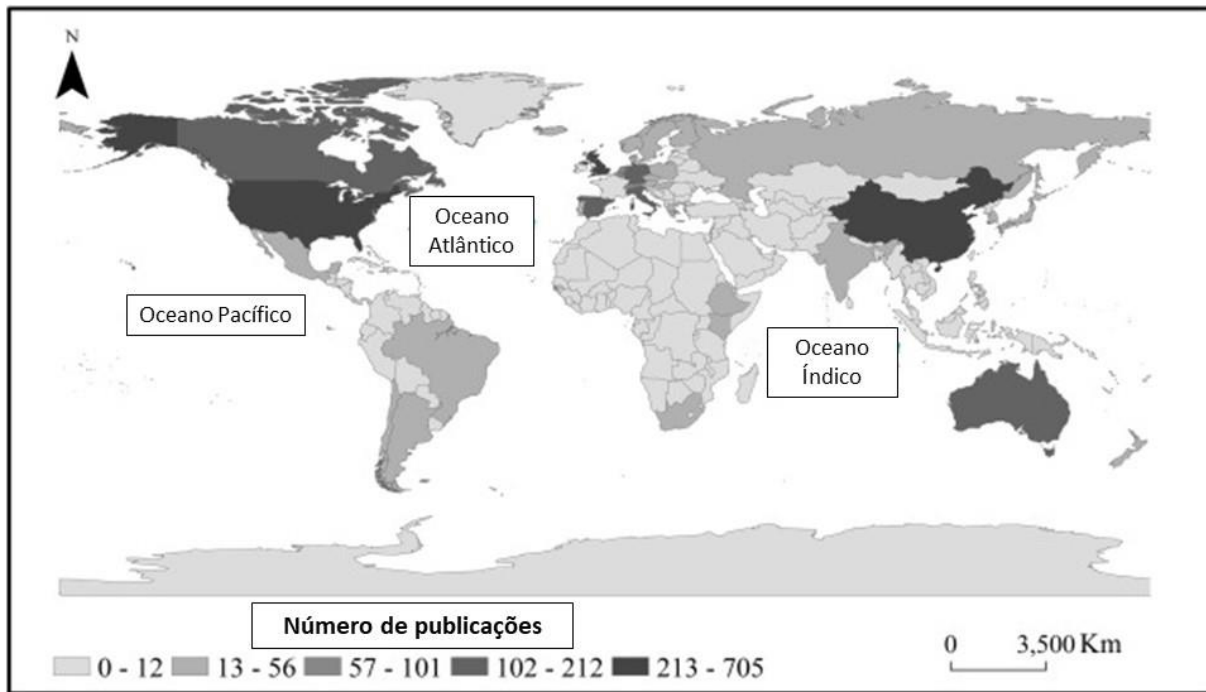


Figura 3. Distribuição espacial das publicações sobre o impacto das mudanças climáticas na erosão do solo em todo o mundo. Retirado de Li e Fang (2016) Fonte de dados: Web of Science Core Collection Tradução: Autores

Outro resultado considerável da revisão de literatura de Li e Fang (2016) apontou para a unidade de estudo utilizada. A maioria dos estudos que tratam dos impactos das mudanças climáticas na erosão do solo considerou a escala da bacia hidrográfica, enquanto alguns estudos se concentraram na escala da encosta (Li e Fang, 2016). Ambas unidades são comumente usadas para estudos geográficos, o que nos faz pensar na importância de a Geografia protagonizar, com outras ciências, os estudos sistêmicos envolvendo as bacias hidrográficas nessa relação de erosão hídrica modificada pelas mudanças climáticas.

De acordo com Li et al. (2021, p.1) “as bacias hidrográficas são a unidade básica do sistema de superfície terrestre da Terra e, na maioria dos casos, são caracterizadas por complexas interações humano-naturais”, com entrada e saída de matéria e energia. A principal energia atuante na bacia hidrográfica está ligada à força gravitacional e a matéria é representada pela água e por sedimentos. Destaca-se que as mudanças climáticas globais podem afetar o processo de evapotranspiração, o escoamento e o transporte de sedimentos nas bacias hidrográficas (Dias et al., 2018). Sendo assim, a adoção dessa unidade como escala de estudo para avaliar os impactos das mudanças climáticas é primordial, pois garante uma visão integrada e sistêmica do ambiente avaliado.

O estudo de revisão de Li e Fang (2016) também traz dados sobre a previsão da quantidade de solos que será perdida entre os anos de 2030 e . Kiefer, A. P.; Costa, R. M.; Petsch, C.; Scotti, A. A. V

2100. Os autores avaliaram 205 estudos de modelos preditivos de erosão utilizando MCGs que foram submetidos ao processo de redução de escala (*downscaling*), sendo que 136 estudos previam taxas de erosão do solo maiores em suas respectivas áreas de estudo. Além disso, os resultados indicam que quase todos os locais terão taxa de perda de solo atuais acima de 1 t ha^{-1} . O aumento percentual nas taxas de erosão deverá variar entre 1,2% e 1600%, enquanto 49 estudos projetam aumento de mais de 50%.

Em relação à erosividade, o trabalho de Panagos et al. (2017b) apresentou um estudo em escala global (Figura 4), chamado “Global Rainfall Erosivity Database” (GloREDA) com dados dos últimos anos. A pesquisa compilou valores de erosividade de 3.625 estações distribuídas em 63 países. O número de estações, segundo o autor, se concentra em alguns continentes: a Europa teve a maior concentração, com 1.725 estações (48% do total); a América do Sul teve o menor número de estações (141 estações - aproximadamente 4% do total); na Ásia e no Oriente Médio, os dados de 1.220 estações foram considerados (aproximadamente 34% das estações); a África apresentou somente 5% do total - aproximadamente 180 estações (Panagos et al., 2017b).

A média do fator R global é de $2.190 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. De acordo com o mapa de erosividade global de Panagos et al. (2017b), os valores mais altos concentram-se na região equatorial, em locais como na Floresta Amazônica

(Figura 4), no centro da África e nas ilhas da Oceania, e os menores valores se localizam em regiões do norte da África. Comparando os continentes, a América do Sul apresentou o maior fator R médio (5.874 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹), seguida pela África (3.053 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹), Ásia e o meio Leste (1.487 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹). Esses valores altos para países em desenvolvimento são preocupantes, já que a alta erosividade pode causar uma maior quantidade de perda de solos, tornando várias áreas inutilizáveis, repercutindo em fatores econômicos e de sobrevivência. Conforme já discutido, se pensarmos na alta quantidade de população residente nesses países, a situação pode ser ainda mais grave se estes padrões de erosividade se mantiverem. O continente africano exibiu as estimativas de erosividade mais altas em nível de país. Maurício e Camarões têm os maiores valores de erosividade anual média mundial, com

um fator R próximo a 20.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹.

Na América do Sul, os valores variam conforme as regiões (Panagos et al., 2017b). Na Amazônia, por exemplo, o fator R chega a ser maior que 7400 (MJ mm)/(ha h ano), entretanto, no sul do Chile e na Argentina, o valor decai para 400-700 (MJ mm)/(ha h ano). Realizando a análise conforme o clima, o tropical apresentou maior erosividade, seguido pelo clima temperado. Logo, o clima frio obteve a menor média estimada. Os dados corroboram o estudo de Marziali et al. (2017) ao afirmar que, em um contexto global, os padrões de precipitação variam no tempo e no espaço, com aumento esperado em áreas tropicais e subtropicais.

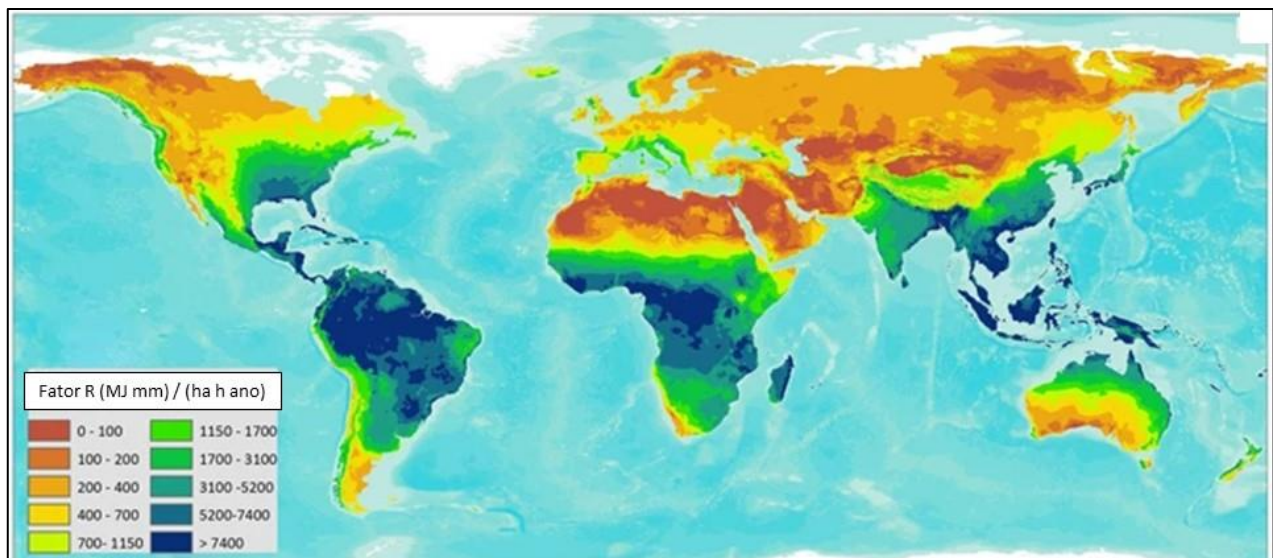


Figura 4. Mapa de erosividade global da precipitação (resolução espacial de 30 segundos de arco). As classes de erosividade foram determinadas segundo o método de quantis. Fonte: Panagos et al. (2017b). Tradução: Autores.

Liu et al. (2020) apresentaram um método para padronizar o modelo de erosividade para diferentes regiões do mundo, contudo, a escala adotada foi desenvolvida a partir de dados de precipitação diária. O método se baseou em uma revisão bibliográfica para levantamento de locais com dados ao redor do mundo. Os autores aplicaram um modelo para comparar as mudanças de erosividade da chuva média global anual e mensal entre os períodos de 1980-1999 (A) e 2000-2017 (B).

De maneira geral, 55,4% da área de estudo passou por uma diminuição da erosividade, comparando A com B. Comparando os continentes, a África apresentou a menor erosividade média

(2.589 no período A e 2.039 no período B), o que difere completamente de Panagos et al. (2017b), que apontaram este continente como o de segundo maior valor de R. A América do Sul teve o maior valor de R, assim como foi estimado por Panagos et al. (2017b), embora países como o Brasil e a Argentina tenham apresentado grande redução de R comparando os dois períodos. Para o Brasil, somente a região do Pantanal e porções costeiras do norte e nordeste apresentam aumento no valor de erosividade da chuva. De acordo com os dados de Liu et al. (2020) a região amazônica apresentou redução significativa e a mais pronunciada do Brasil, com valores entre -18 000 e 38011 MJ mm/hm²*h. Além disso, no estudo de Liu et al.

(2020) não é possível verificar comportamentos latitudinais quanto a padrões ligados aos climas tropical e temperado, assim como apontado por Panagos et al. (2017b) e Marziali et al. (2017).

Dando continuidade à análise, iremos trazer dois estudos (Borrelli et al., 2017; Borrelli et al., 2020) que calcularam os valores de perda de solo em função das mudanças climáticas. Fazendo uma análise do comportamento passado da perda do solo (2001-2012) em escala global, Borrelli et al. (2017) calcularam estimativas quantitativas da erosão do solo utilizando o modelo RUSLE (Figura 5). Ao invés de tratarem da erosão do solo como um processo estático, os autores consideraram os impactos da mudança global em relação ao uso do solo no século XXI. Os resultados apontaram que a erosão ocorre em todos os continentes, com exceção da Antártica, e em todas situações climáticas.

Segundo Borrelli et al. (2017), de acordo com o cenário base, a América do Sul mostrou a

maior taxa média de erosão do solo ($3,53 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em 2001, seguida pela África ($3,51 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e Ásia ($3,47 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). América do Norte, Europa e Oceania mostraram valores consideravelmente mais baixos, totalizando 2,23, 0,92 e $0,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente. Em 2012, a América do Sul apresentou aumento da erosividade na Argentina (41,6%), Brasil (19,8%), Bolívia (37,8%) e Peru (5,9%). Considerando que esses países são importantes produtores agrícolas, conforme mencionado na introdução, que o número de estudos para estes países é baixo e que os maiores valores de erosão foram encontrados na América do Sul, é necessário aplicar modelos de previsão de erosão de solo para o futuro e refletir sobre as possíveis maneiras de conservar e proteger os solos sul americanos.

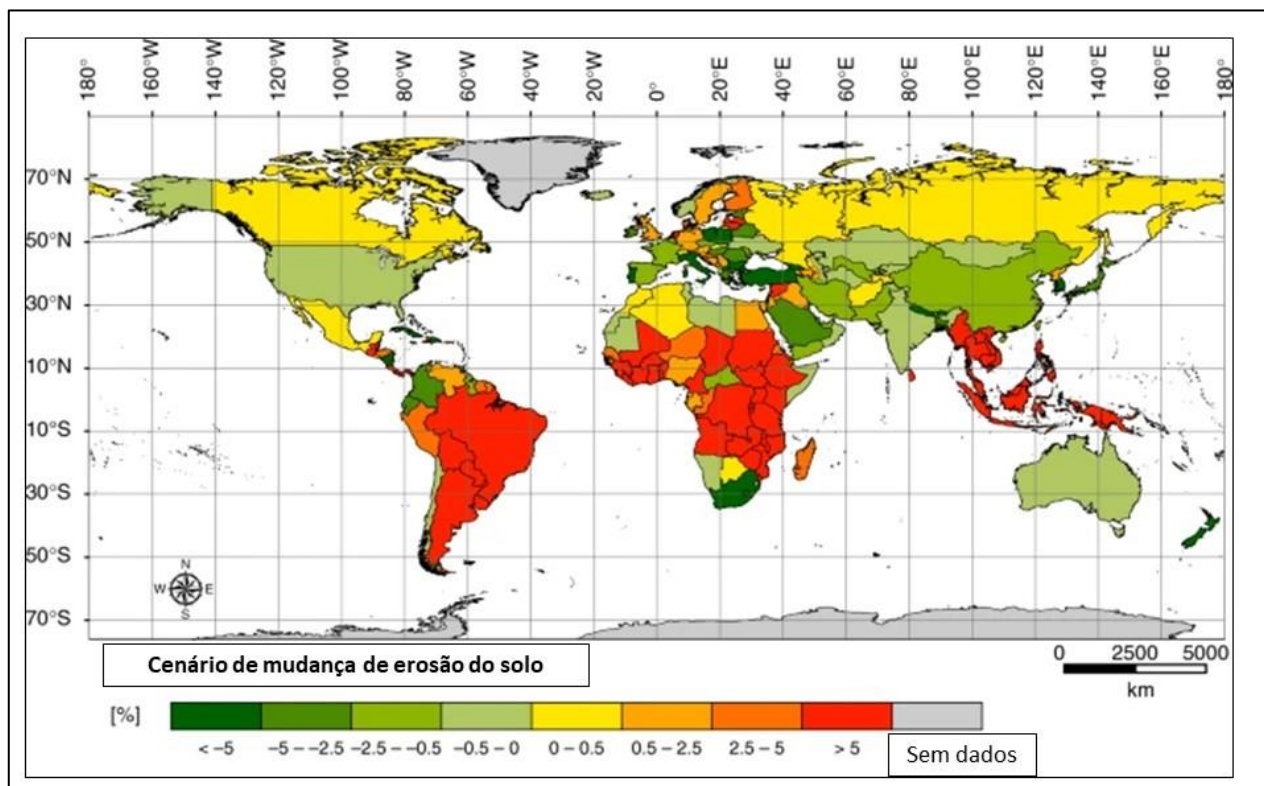


Figura 5. A alteração da erosão do solo entre 2001 e 2012 de acordo com o cenário de linha de base. Fonte: Borelli et al. (2017) Tradução: Autores.

Borelli et al. (2020) realizaram um estudo para estimar as taxas de erosão do solo futuras, para o qual foi utilizado uma plataforma de modelagem baseada em RUSLE de alta resolução ($250 \times 250 \text{ m}$) chamada “Global Soil Erosion Modeling” (GloSEM), com projeções futuras de uso do solo obtidas a partir de um sistema integrado e

erosividade da precipitação. A pesquisa de Borrelli et al. (2020) apresentou uma série de perguntas relacionando a questão da erosão às mudanças climáticas. Uma das mais pertinentes é “Qual é o padrão global de erosão do solo?”. O padrão espacial mundial de estimativa de erosão do solo

entre 2015 e 2070 está apresentado na Figura 6 (Borelli et al., 2020).

Eis que novamente os países em desenvolvimento são os que aparecem como os mais impactados de forma negativa pela erosão do solo, o que se torna uma barreira econômica para a agricultura sustentável (Miheretu e Yimer, 2018). Em relação às economias mais impactadas, os resultados de modelagem sugerem que a erosão hídrica é um fenômeno comum em todas as condições climáticas observadas e que tenderá a

continuar ocorrendo (Borelli et al., 2017; Borelli et al., 2020). No entanto, a distribuição espacial da perda do solo constitui padrões que sugerem que as maiores perdas irão ocorrer nos principais setores agrícolas, especialmente se acontecerem em conjunto com eventos de chuvas intensas e concentradas (Sul do Brasil, Argentina, Índia, Leste da China, Meio-Oeste dos Estados Unidos, Etiópia e Europa Mediterrânea) (Borelli et al., 2017; Borelli et al., 2020).

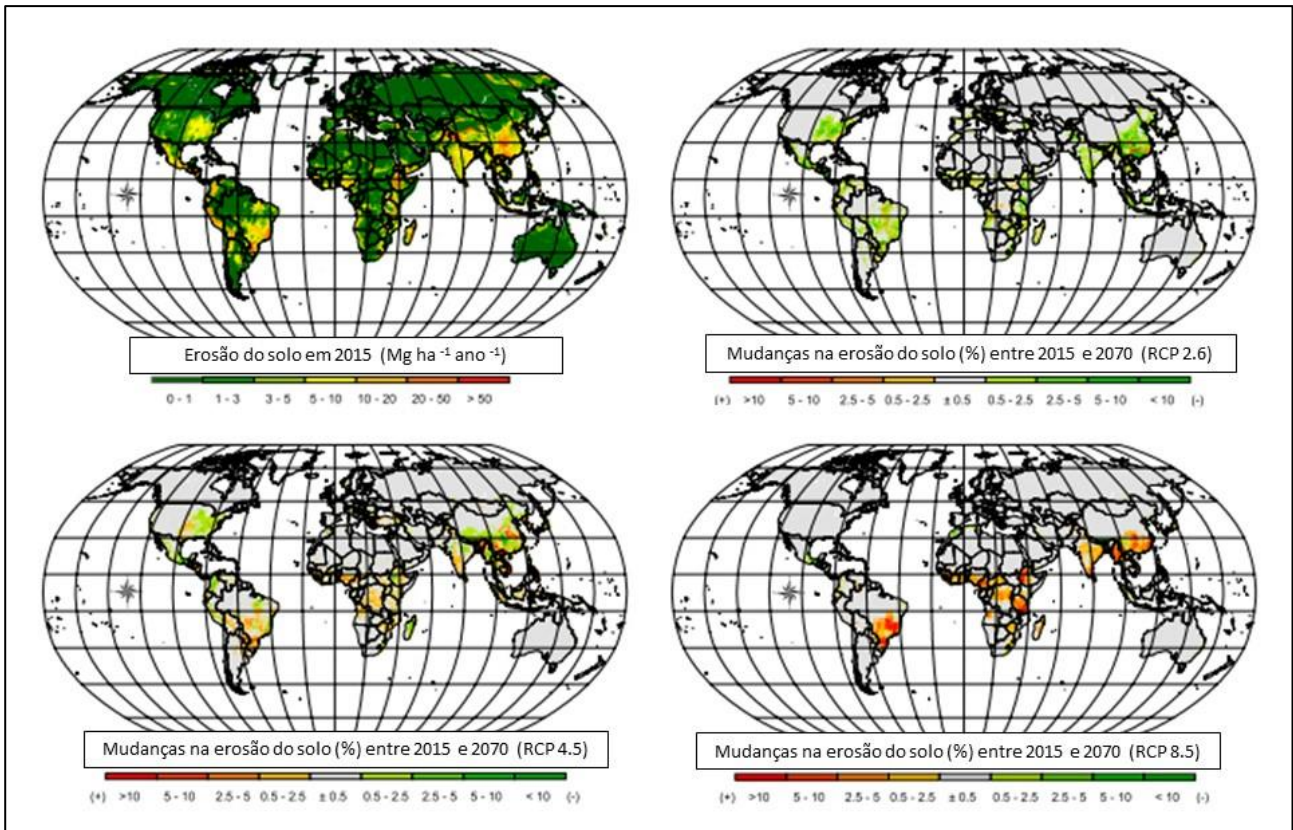


Figura 6. Estimativas de erosão do solo do projeto GloSEM de Borelli et al. (2020). (A) ilustra as taxas de erosão do solo divididas em sete classes de acordo com a classificação do European Soil Bureau. (B-D) ilustram as mudanças na erosão média anual do solo entre 2015 e 2070 para três trajetórias distintas dos gases de efeito estufa (RCP). As mudanças referem-se exclusivamente aos efeitos da mudança do uso da terra. Para essas simulações, o ano de 2015 foi tomado como base. (B-D) compartilham a mesma legenda. Fonte: Borelli et al. (2020) Tradução: Autores.

Pesquisas a nível continental

A partir dos estudos em escala global de Li e Fang (2016), Borelli et al. (2017), Panagos et al. (2017b); Borelli et al. (2020) e Liu et al. (2020), que abordam valores de erosividade da chuva e previsões de perda de solos com base em modelos matemáticos para as últimas e próximas décadas e as discrepâncias apresentadas, é necessário buscar estudos em outras escalas – continentais, regionais e de bacias hidrográficas – que possam corroborar ou contrapor os dados acima apresentados. Sendo assim, conforme exposto na seção de métodos . Kiefer, A. P.; Costa, R. M.; Petsch, C.; Scotti, A. A. V

desta pesquisa de referenciais teóricos, iremos proceder a uma análise de 78 artigos publicados nos últimos seis anos, contemplando todos os continentes, com exceção da Antártica. Salientamos que não faremos comparações diretas entre as pesquisas apresentadas, visto que elas diferem quanto ao uso do MCG, ou então, porque muitas vezes tem-se uma combinação de modelos climáticos globais, o método utilizado para o reescalonamento desses MCG, a trajetória de concentração de gases de efeito estufa, assim como

o modelo de perda de solos por erosão hídrica. Nosso intuito, nessa seção, é apresentar trabalhos em várias áreas do planeta e avaliar se os valores de erosividade, e conseqüentemente da perda de solos irão se manter ou não para o futuro.

O primeiro continente analisado foi o asiático e apresentamos inicialmente o estudo de Duulatov et al. (2019), que teve como objetivo analisar e prever o fator R para a região da Ásia Central. O autor utilizou quatro MCG (BCCCSM1-1, IPSLCM5BLR, MIROC5 e MPIESMLR) para os cenários do IPCC 2.6 e 8.5 por dois períodos de tempo, denominados por ele de futuro "próximo" (até 2029) e "distante" (2030 a 2070). Os resultados estimam um aumento na erosividade para todos os MCG. Espera-se uma mudança média de erosividade da chuva de cerca de 5,6% ($424,49 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em 2030 e de 9,6% ($440,57 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em 2070 em comparação com a linha de base de $402 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

A China aparece como um dos países com maior número de estudos relacionando variações na erosão e mudanças climáticas de acordo com Li e Fang (2016). Hu et al. (2020), em estudo integrado para o Planalto de Loess e a bacia hidrográfica do Rio Amarelo, avaliaram a influência das mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra na erosão hídrica. A taxa de contribuição das mudanças climáticas para as alterações de erosão do solo será de 84,8 a 91,1%, enquanto a taxa de contribuição das mudanças no uso da terra será somente de 8,9 a 15,2% segundo estimativas do autor. Cui et al. (2020) também estimaram a erosividade do Planalto de Loess usando dados do modelo HadGEM2-ES. Houve uma estimativa de aumento de precipitação e diminuição de erosividade. A erosividade da chuva para o período 2020–2100 para os cenários RCP 4.5 e 8.5 apresentou diminuição de 28,9 e 19,8%, respectivamente, em comparação com 1991–2010.

Também encontramos estudos relacionando as mudanças climáticas à produção de sedimentos e à erosão hídrica. Os dois estudos indicam aumento de sedimentos e precipitação para o futuro. Yang et al. (2019) buscaram avaliar os impactos de mudanças no uso da terra e das mudanças climáticas no escoamento sobre o curso superior da bacia hidrográfica do rio Luã, China. Os autores utilizaram cinco MCG para trajetórias de concentração de gases de efeito estufa (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5) para o período entre 2020–2030. A precipitação média anual nos cinco MCG deverá aumentar entre 1 e 7% (2020-2030) em relação aos valores do período da linha de base 1961–1979. Zhou et al. (2017) previram a produção de sedimentos suspensos, escoamento superficial e erosão em uma área de cabeceira do

extremo nordeste da China segundo duas trajetórias de concentração de gases de efeito estufa, RCP4.5 e RCP8.5, para o período de 2021 a 2050. A produção de sedimentos aumentaria 237% e 133%, respectivamente, para RCP4.5 e para RCP8.5, principalmente causada por mudanças de precipitação.

Ainda no continente asiático, Pal et al. (2021), utilizando a EUPS, estimaram os valores de perda de solo para o período até 2100 para toda a Índia. Os autores utilizaram valores médios de precipitação de 51 MCG. Os dados indicam o crescimento da perda de solos com o passar do tempo, sendo que entre 2080 e 2100 ocorrerá erosão nos solos em todos os RCPs (2.6, 4.5, 6.0 e 8.5). Outro dado pertinente da pesquisa é que os autores estimam que a substituição de florestas por lavouras poderá representar 26% do aumento da erosão do solo. Khare et al. (2017) realizaram um estudo para estimar o valor R e a perda de solos por erosão para o período de 2020-2080, para a bacia hidrográfica do rio Mandakini, localizada também na Índia. O valor de solo perdido praticamente deve dobrar no período avaliado, com a porcentagem de mudança nas décadas de 2020 e 2080 sendo maior do que em 2050, resultado que difere de Pal et al. (2021).

Mondal et al. (2016b) avaliaram a erosividade de uma parte da bacia hidrográfica do rio Narmada, localizada na Índia central. A precipitação foi estimada pelos MCG do HadCM3 (cenário A2 e B2) e CGCM3 (cenário A1B e A2) e a redução de escala foi feita com o *Statistical DownScaling Model*. A erosividade da chuva variou de -32,91% a 24,12% na década de 2020 (período considerado como linha base), de -18,82 a 75,48% em 2050, e de 20,95 a 202,40% para a década de 2080 considerando toda a área de pesquisa. Nesse estudo, observou-se a variação dos valores de erosividade, que não necessariamente irão sempre aumentar, embora para a década de 2080 isso tenha ocorrido, conforme apontado por Pal et al. (2021).

Plangoen e Udmale (2017) estimaram os impactos das mudanças climáticas na erosividade da chuva para a bacia hidrográfica de Huai Luang, Tailândia, utilizando modelos climáticos multivariados. A avaliação comparou os valores da erosividade da chuva de uma linha base de 1982–2005 com as décadas de 2030, 2050, 2070 e 2090. Os resultados indicaram, independente do MCG utilizado, o aumento da erosividade. As porcentagens de aumento foram de 12%, 24%, 43% e 41%, respectivamente, para 2030, 2050,

2070 e 2090. As décadas de 2070 e 2090 novamente aparecem como as de maior aumento do fator R, assim como em Mondal et al. (2016b) e Khare et al. (2017).

Giang et al. (2017) calcularam os valores de erosão do solo para a bacia hidrográfica transnacional do Rio Alto Ca do Laos, Vietnã, que possui aproximadamente 22.800 km². Prevê-se que a erosão do solo aumente significativamente no clima mais quente e úmido da estação chuvosa, com uma taxa de erosão anual estimada em aproximadamente 22,5 toneladas/ha/ano até 2030, 23,5 a 24,0 toneladas/ha/ano até 2060 e, por fim, 24,1 a 25,6 toneladas/ha/ano até 2090. Nesse estudo observa-se o aumento da perda de solos, contudo sem um aumento expressivo para a década de 2090. Chen et al. (2020) também realizaram pesquisa para uma bacia hidrográfica asiática, sendo o rio Gaoping o foco de estudo, que está entre os maiores do sul de Taiwan. O volume total de sedimentos estimados para a bacia hidrográfica sob o cenário A1B-S para vários períodos de retorno aumentaria de 4 a 65%, apresentando períodos de retorno de 2 a 200 anos. As mudanças climáticas possivelmente aumentariam ainda mais o volume de deposição, em 2–23% em relação à linha de base e em 13% em relação à média da linha de base. Destaca-se que é fundamental relacionar que os sedimentos erodidos serão carreados para os canais de drenagem, provocando alteração na hidrossedimentologia do canal.

Babur et al. (2020) realizaram um estudo para o reservatório de Mangla, o segundo maior reservatório do Paquistão, para o período 2011-2100. Os autores apontam que o reservatório teve sua capacidade de volume reduzida devido à rápida sedimentação. Chuenchum et al. (2020) realizaram um estudo para a bacia hidrográfica do rio Lancang-Mekong, sudeste da Ásia, para avaliarem a erosão anual do solo para cenários futuros, em 2030 e 2040, utilizando a RUSLE. Os resultados da produção de sedimentos apontam aumento potencial no futuro, cerca de 66,3% e 71,2% em 2030 e 2040, respectivamente, quando comparado a dados da linha de base.

Gafforov et al. (2020) calcularam a erosividade da chuva para a bacia hidrográfica de Chirchik – Akhangaran, localizada no nordeste da República do Uzbequistão. Os MCG utilizados foram direcionados para os cenários 4.5 e 8.5 do IPCC, durante os períodos de 2030, 2050 e 2070. Os resultados da avaliação mostram um aumento significativo na precipitação de aproximadamente 11,8%, 14,1% e 16,3% para todos os modelos para as décadas de 2030, 2050 e 2070, respectivamente, em relação à linha base, na medida em que a perda

de solo aumentou paralelamente à precipitação em 17,1 %, 20,5% e 23,3%, respectivamente.

Nasidi et al. (2020) projetaram o fator R para as Cameron Highlands na Malásia. O estudo considerou 20 MCG, quatro trajetórias de concentração de gases de efeito estufa para duas escalas de tempo: 2050 e 2080. As estações no monte Raja tiveram as maiores taxas de aumento (122,2%) em relação ao valor base, considerando o cenário RCP8.5 para 2080. A menor mudança na erosividade é esperada para a sub-bacia do Habu, com aumento projetado de 4,7% e 8,8% para os cenários RCP2.6 e RCP4.5.

Talchabhadel et al. (2020) estimaram o fator R a partir de dados diários de precipitação de cinco MCG para calcular a perda de solo na bacia hidrográfica do rio Westrapti, Nepal. Foram considerados os cenários RCPs 4.5 e 8.5 para os períodos de tempo futuros de 2025 a 2099. O fator R utilizado como linha de base foi de 3514,6 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e a estimativa futura indica aumento de 10% no fator R para o período de 2075 a 2099 segundo os dois cenários de aquecimento global. Para diferentes países temos o mesmo resultado, apontando aumento de precipitação e erosividade e, conseqüentemente do potencial significativo de perda de solos.

Azari et al. (2021) estimaram o fator R para todo o Irã utilizando três MCG para duas trajetórias de concentração de gases de efeito estufa, o RCPs 4.5 e 8.5. O fator R máximo no Irã se refere ao RCP 4.5 no período de 2040–2060 (297,8 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹) e o valor mínimo foi projetado para 2060–2080 no RCP 4,5 com um valor de 249,3 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Os dados estimados para o período de 2040–2060 para o RCP 4.5 indicam que aproximadamente 66,1% do Irã terá um aumento no fator R de 2,5 a 22,5%. As projeções para o RCP 4.5 no período de 2060–2080 mostraram que nas zonas áridas do Sudeste, Centro e Leste do Irã a erosividade da chuva diminuirá. Zare et al. (2016) realizaram um estudo de estimativa de erosão do solo para a bacia hidrográfica Kasilian, no norte do Irã, para os períodos de 2011–2030 e 2031–2050. Os autores estimam um aumento de 10-35% para a erosividade da chuva e 10-32% para perda de solo durante 2011–2030 em comparação com os valores de linha base, que foram estabelecidos em 21,82 toneladas ha⁻¹ ano⁻¹ para 1991 a 2010. Ressalta-se que nesse estudo todos os resultados indicam aumento no valor de erosão do solo para 2030 e 2050. Os resultados de Zare et al. (2016) se encaixam nos valores apresentados por Azari et al. (2021).

Para a Europa, Panagos et al. (2017a) mostram um cenário futuro de erosividade onde prevalece o aumento deste fator. Os autores

expõem que a partir dos Dados de Erosividade da Chuva em Escala Européia (REDES - sigla em inglês), aproximadamente 81% da área da Europa está prevista para ter um aumento da erosividade da chuva na década de 2050, enquanto que para os outros 19% a erosividade da chuva está prevista para diminuir em relação ao período de linha base (1950-2000). O modelo climático utilizado foi o HadGEM2 e a trajetória de concentração de gases de efeito estufa foi o RCP 4.5. O autor ressalta, ainda, que em quase 25% da Europa o fator R está aumentando em pelo menos 50% até o ano de 2050 em comparação com os dados de 2010. De acordo com Panagos et al. (2017a), as áreas europeias que irão sofrer uma diminuição do fator R se encontram em porções da Itália, Eslovênia, Croácia Ocidental (mar Adriático), Escócia, leste da Espanha, leste da Bulgária, leste da Romênia, Grécia Ocidental e noroeste da Península Ibérica. Por outro lado, as áreas que apresentarão os maiores aumentos estimados se localizam nos Alpes suíços, porção da costa do Atlântico francês, leste da Croácia e partes da Eslováquia e sul da Alemanha. A seguir, apresentaremos alguns estudos que focam em países europeus.

Kourgialas et al. (2016) estimaram taxas de perda do solo em áreas de culturas de árvores mediterrâneas, sob cenários atuais e futuros (A2 e B1), para o período entre 2030 e 2050. Os principais resultados dessa investigação apontam majoritariamente para o aumento de perdas de solos, especialmente no cenário B1. Para esse cenário poderá haver um aumento de 32,44% na perda de solos para o ano de 2030 e 50,77% para o ano de 2050 em comparação com a linha de base. O cenário A2 expõe uma situação de diminuição do fator R, com um decréscimo de 1,85% para o ano de 2030. Outro estudo que indicou a diminuição do fator R é o de Stefanidis e Stathis (2018), que avaliou as alterações na erosão do solo na bacia hidrográfica de Portaikos, localizada na Grécia Central, utilizando um MCG regional, o RegCM. Os resultados indicaram uma diminuição de 4,9% na taxa de erosão para o período 2074-2100 comparando ao período de 1974-2000.

Gericke et al. (2019) estimaram o fator R futuro de 188 estações climáticas para Brandenburg, na Alemanha. Para avaliar as incertezas, os autores consideraram oito cenários de 15 modelos climáticos e duas trajetórias de concentração de gases de efeito estufa. De forma geral, os cenários climáticos demonstram que a erosividade da chuva e o risco de erosão para toda Brandenburg poderão não retornar aos níveis de duas ou três décadas atrás. Berberoglu et al. (2020) buscaram prever o impacto das mudanças do uso e cobertura da terra e mudanças climáticas para a

erosão na Turquia usando o modelo *Pan-European Soil Erosion Assessment* (PESERA). A linha base se refere a dados para o período 1960-2000. Os resultados indicam que a erosão em pastagens, terras cultivadas e florestas diminuirá entre 2 e 47%, enquanto os cerrados enfrentarão um aumento de 30%.

Perovic et al. (2019) buscaram estimar os prováveis efeitos das mudanças no clima e no uso do solo para a região do Vale de Vranjska, Sérvia, para o século XXI, utilizando um modelo climático regional, o EBU-POM (*Eta Belgrade University-Princeton Ocean Model*). Foi estimada uma redução de 41,84% na perda média de solo até o final do século quando comparado ao período da linha de base, com destaque para a segunda metade do século, onde ocorrerá provavelmente a queda de 17,19% no total de precipitação. Por fim, Luetzenburg et al. (2020) compararam a erosividade estimada para duas pequenas bacias agrícolas na Europa com climas opostos: Can Revull, na Espanha, e Fugnitz, na Áustria. Essa pesquisa é integradora na medida em que considera, além das mudanças climáticas, as práticas de manejo. Os resultados apontam que as práticas de cultivo têm um efeito maior na erosão do solo do que os cenários de mudança climática, na medida em que técnicas de manejo podem reduzir em 75% a taxa de perda de solo em comparação com as práticas convencionais.

Para a Oceania, Zhu et al. (2019b) calcularam a erosividade da chuva e a erosão em encostas utilizando as projeções NSW/ACT *Regional Climate Modeling* (NARCLIM), com o método da RUSLE para as encostas na região alpina australiana. As projeções de erosividade da chuva e a erosão das encostas indicam um aumento potencial de aproximadamente 2 a 8% para o período 2020-2039 e aumento de 8 a 18% entre 2060-2079.

Para o continente africano, Chimdessa et al. (2019) avaliaram os impactos de mudanças no uso e cobertura do solo e mudanças climáticas no fluxo do rio Didessa (Etiópia), assim como perda de solo, sob os cenários de RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5. Os resultados indicam que para o cenário RCP 8.5, a perda média anual de solo pode aumentar em 124.546, 693.619 e 748.346 toneladas nos cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente. Amanambu et al. (2019) estimaram os valores de erosividade para a bacia hidrográfica do Baixo Níger, África Ocidental usando os MCG GFDLCM3, HADCM2, MIROC5 e MPIESMLR. Os resultados indicaram uma mudança média na erosividade da chuva de cerca de 14,1%, 19% e 24,2% para as décadas de 2030, 2050 e 2070, respectivamente, para todos os MCG.

Hipt et al. (2018) ressaltam que as mudanças previstas na erosão do solo podem sofrer alterações se houver a inclusão de outros fatores nos modelos preditivos de perda de erosão, como mudanças de cobertura da terra impulsionadas pelo clima e possíveis estratégias de adaptação agrícola. Nesse sentido, o autor salienta que é necessário elaborar previsões confiáveis de erosão do solo no oeste da África, que são dificultadas pela carência de dados adequados em termos de resolução espacial e temporal (Hipt et al., 2018). A região da África Ocidental está fortemente exposta ao efeito das mudanças climáticas devido à alta vulnerabilidade das sociedades que são predominantemente agrícolas (Serdeczny et al., 2017).

Para a América, quanto aos EUA, ressaltamos que é um dos países com maior número de estudos associando mudanças climáticas e erosão, segundo Li e Fang (2016), sendo que muitos dos estudos que consideram todo o país são anteriores a 2016, não sendo expostos neste levantamento. Hoomehr et al. (2016) calcularam o fator R para três cenários de mudanças climáticas, A1FI, A1B e B1, para a bacia hidrográfica de New River, no leste do Tennessee. O valor de R estimado como a linha base, entre 1959 e 2000, foi calculado em $4085 \text{ MJ mm h}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. Para o período 2010-2099 foi projetado um aumento entre 7% e 49% e foram estimados os valores de 4525.5,

5376.2 e $6281.3 \text{ MJ mm h}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ para B1, A1B, e A1FI, respectivamente. Wang et al. (2018) tiveram como objetivo em seu estudo quantificar as perdas de solo usando projeções de três MCG (GFDL, PCM, HadCM3) sob três cenários de mudanças climáticas (A2, A1B, B1) para a região dos Grandes Lagos, EUA, de 2000 a 2100. Previu-se a diminuição da perda de solo ao longo de três períodos futuros (2030, 2060 e 2090), entre 4,99% e 23,2% em relação ao período histórico (2000). O estudo estimou aumentos sazonais de perda de solo no outono e no inverno e diminuições na primavera e no verão.

Riquetti et al. (2020) realizaram um levantamento de literatura com o objetivo de representar os gradientes geográficos e climáticos da América do Sul, demonstrando valores de R para 233 locais distribuídos por todos os países, exceto para o Suriname, Guiana e Guiana Francesa. Ao analisar a Figura 6, o menor fator R foi obtido para o nordeste brasileiro, para a região do Paraguai e Bolívia e sul da Argentina e Chile, assim como os dados apresentados anteriormente por Panagos et al. (2017b). Os maiores valores se concentram na Amazônia e em todo o Brasil, praticamente. A figura 7 mostra os valores de R projetados para: a) 2010–2040, b) 2041–2070 e c) 2071–2099.

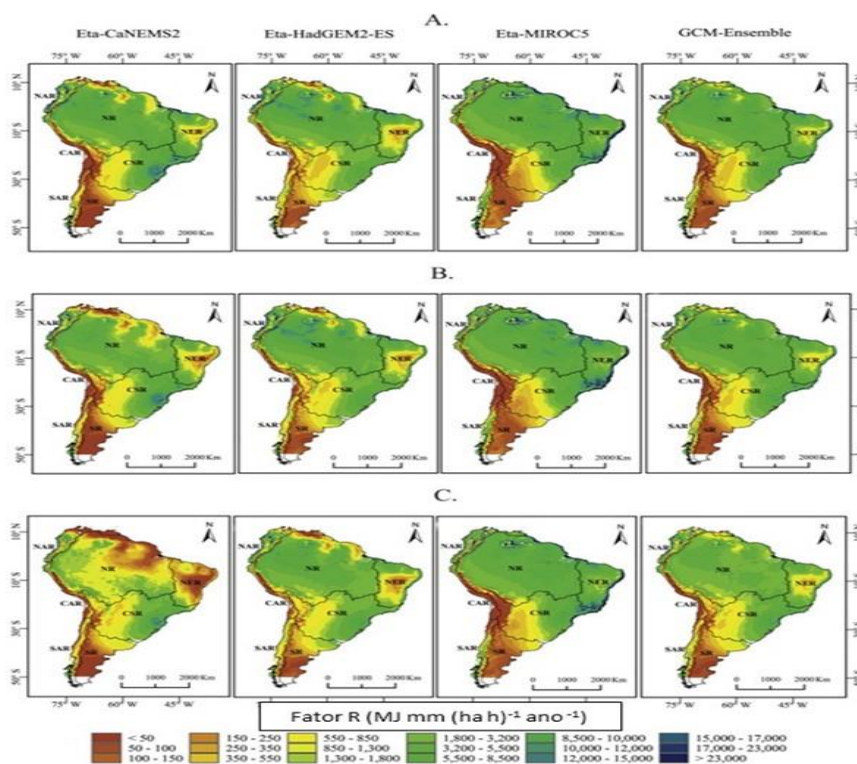


Figura 7. Mapas do fator R para a América do Sul gerados por GCMs sob RCP8.5 em diferentes intervalos de tempo ((a) 2010–2040, (b) 2041–2070, (c) 2071–2099). Fonte: Riquetti et al. (2020) Tradução: Autores.

Publicações associando mudanças climáticas e erosão hídrica no Brasil: cenário de algumas pesquisas produzidas no período de 2016 a 2021

O primeiro estudo considerado foi o de Almagro et al. (2017) que utilizou dados dos MCG *Hadley Center Global Environment Model version 2* (HadGEM2-ES) e *Model for Interdisciplinary Research On Climate version 5* (MIROC5) para estimar e mapear a erosividade das chuvas e suas mudanças projetadas em todo o Brasil (Figura 8). Avaliando os mapas, observa-se que, para a região Norte, estima-se a diminuição de 7% a 20% na erosividade média da chuva. A região nordeste apresenta a menor erosividade média das chuvas dentre as regiões brasileiras, confirmando os dados

projetados por Riquetti et al. (2020). Para a região Centro-Oeste os valores médios de erosividade da chuva são de $9.192 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $9.816 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no período de referência. A erosividade decai de -5% a -9% para essa região. A região sul obteve erosividade média da precipitação de base de $9.038 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $9.229 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Nesse sentido, ocorre uma diminuição da erosividade nas regiões norte, nordeste, centro-oeste e sudeste e, para a região sul, ocorre um aumento devido à intensificação da frequência e da magnitude do El Niño Oscilação Sul (Almagro et al., 2017).

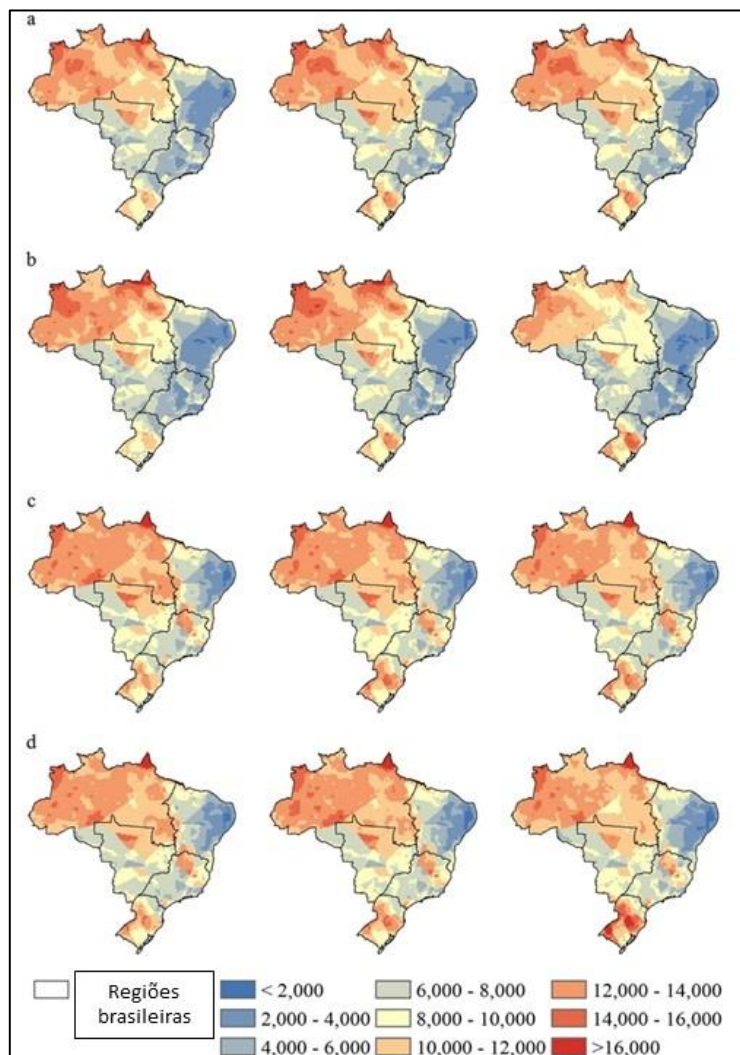


Figura 8. Erosividade estimada da chuva para regiões brasileiras ao longo do século XXI. (a) Cenário RCP4.5 do modelo HadGEM2-ES para três períodos (2007–2040, 2041–2070 e 2071–2099). (b) Cenário RCP8.5 do modelo HadGEM2-ES para três períodos (2007–2040, 2041–2070 e 2071–2099). (c) Cenário RCP4.5 do modelo MIROC5 para três períodos (2007–2040, 2041–2070 e 2071–2099). (d) Cenário RCP8.5 do modelo MIROC5 para três períodos (2007–2040, 2041–2070 e 2071–2099). Valores em $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Fonte: Almagro et al. (2017). Tradução: Autores.

Foram encontrados dois trabalhos envolvendo biomas brasileiros. Anache et al. (2018) estimaram os valores de erosão do solo para cenários climáticos futuros obtidos em 17 MCG para 2030, 2060 e 2090. As mudanças climáticas projetadas não afetaram significativamente o escoamento e a erosão do solo para os quatro usos de solo analisados para o Cerrado brasileiro, embora os autores salientem que as simulações usando o RCP 4.5, 6.0 e 8.5 mostraram aumento significativo na precipitação. Colman et al. (2019) estimaram taxas de erosão do solo para o Pantanal brasileiro com cenários projetados para 2020, 2035 e 2050. Estes autores também consideraram mudanças no uso da terra além das mudanças climáticas. Para o período de 2012 a 2050, os autores estimam um aumento de perda de solo de até 100% para o pior cenário de emissão de gases de efeito estufa e um aumento de 20 a 40% em áreas baixas, associadas ao crescimento de áreas destinadas à pecuária.

Outro fator preocupante para o Brasil consiste no desmatamento. De acordo com dados do PRODES, foi registrado para 2020 um valor de 11088 km² de área desmatada na Amazônia Legal. É o maior valor registrado da série 2009-2020, com um aumento de 9,5% em relação a 2019. O desmatamento possivelmente atuará na redução da quantidade de chuvas, o que irá alterar padrões de erosividade para algumas regiões do Brasil. Spera et al. (2016) e Bergier et al. (2018) apontam que poderá haver mudanças na transferência de umidade da Amazônia para o sudeste e sul do Brasil, também para o Pantanal e para outros países, como Bolívia, Paraguai e Argentina, devido à redução de fluxos de umidade na Amazônia. Debortoli et al. (2016) corroboram com o tema ao apontarem que estudos relacionados às mudanças climáticas mostram o deslocamento temporal da estação chuvosa e sua diminuição no sul da Amazônia e Pantanal.

Rosa et al. (2016) fizeram um estudo para estimar o fator R para a área urbana do município de Rondon, no Pará, utilizando o RegCM4 atrelado ao HADGEM2 para a trajetória RCP 4.5 de concentração de gases de efeito estufa. Para o período entre 2016-2035 o fator R foi de 13.038 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, sendo que o valor de linha base foi de 16.390 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ (1999-2015).

Considerando o período estimado para o futuro, janeiro, fevereiro, março e abril serão provavelmente os meses que concentrarão 85,73% do total da erosividade anual. O estudo aponta para a importância de realizar a análise da erosividade segundo um critério sazonal, principalmente para os tipos climáticos com estações bem marcadas.

Optamos por incluir estes estudos diante da situação sistêmica apontada na Figura 2, já que as variações na carga de sedimentos nos rios e a vazão ocorrem em função do aumento da taxa de erosão na bacia hidrográfica em questão. Oliveira et al. (2019) avaliaram os impactos das mudanças climáticas sobre o fluxo de rios e cargas de sedimentos na bacia hidrográfica do Alto Paranaíba, Sudeste do Brasil, utilizando multi-modelos. Os resultados indicam que a carga de sedimentos poderá sofrer aumento e diminuição em função do período seco e chuvoso na área de estudo. De forma geral, as projeções indicaram reduções nas cargas de sedimentos variando entre 33,3% e 55,2%. Oliveira et al. (2017), por sua vez, realizaram um estudo similar, ao estimarem mudanças na vazão na região das cabeceiras da bacia hidrográfica do rio Grande, Sudeste do Brasil, para o período 2007 e 2099, com foco para o potencial hidrelétrico. Os resultados indicaram a redução na vazão e consequentemente diminuição do potencial hidrelétrico, variando de 6,1 a 58,6% ao longo do século XXI.

Quais são os próximos passos? Desafios para a pesquisa sobre erosividade e perda de solo associada às mudanças climáticas

Diante da diversidade de estudos apresentados e da concordância e discordância dos dados, ainda é necessário avançar nas pesquisas que abordam a relação das mudanças climáticas e erosão hídrica. Nesse viés, Li e Fang (2016) ressaltam que a magnitude dos impactos das mudanças climáticas e o efeito de compensação de diferentes fatores ainda permanecem desconhecidos e difíceis de prever com precisão. São numerosos modelos climáticos, escalas de estudo, fatores ambientais e modelos de perda de erosão envolvidos procurando representar cenários futuros. A seguir, apontamos algumas possíveis soluções para auxiliar estudos envolvendo essas temáticas, aumentando a acurácia dos dados obtidos sobre a perda de solos. Parsons (2019) ressaltou que a combinação de investigações baseadas em campo e dados *in situ* é crucial para elucidar os complexos *feedbacks* da erosão do solo dentro dos modelos preditivos. Pal e Chakraborty (2019) corroboram ao levantarem a discussão sobre a qualidade dos dados obtidos, apontando que, além da estimativa da erosão do solo, a validação com as informações empíricas observadas é essencial para manter a qualidade do trabalho e a precisão adequada.

Li e Fang (2016) complementam que ainda há uma necessidade urgente de estudos de modelagem integrados e Sherriff et al. (2018)

ressaltam que o risco de erosão do solo em bacias hidrográficas com alta conectividade hidrológica aumentará caso estratégias eficazes de gestão não forem consideradas no futuro. Nesse sentido, diversas pesquisas salientam a importância da inserção das mudanças da cobertura vegetal nos modelos preditivos de perda de solos, como simulações com diferentes rotações de cultura, datas de plantio e colheita, tipos de safra e até preços de safra e a própria mudança de cobertura induzida pelo clima, com um uso do solo ou modelo de vegetação dinâmico (Li e Fang, 2016; Parajuli et al., 2016; Ruiz-Pérez et al., 2016). Ruiz-Pérez et al. (2016) avançaram nesse sentido ao implementaram um modelo de vegetação dinâmico, com um sistema de modelagem integrado considerando as mudanças no uso/cobertura da terra. Marhaento et al. (2018) consideraram as alterações no uso da terra para o futuro. Mais estudos considerando outras variações das mudanças climáticas devem ser elaborados no futuro.

Além disso, a distinção entre a erosão laminar e linear por voçorocas também é fundamental para a prospecção da estimativa de perda de solos. Alguns estudos exploraram o impacto das mudanças nos padrões de precipitação para a expansão das voçorocas. A maioria desses estudos projetam taxas de erosão de voçorocas mais altas devido à chuva intensa ou maior quantidade de precipitação, segundo Li e Fang (2016). As taxas de erosão em ravinas, em todo o mundo, podem aumentar de 27 a 300% segundo as projeções de aumento de precipitação para o período de 2060–2089 (Li e Fang, 2016; Vanmaercke et al., 2016). Sendo assim, é fundamental diferenciar os dois tipos de erosão, quantificando as taxas de acréscimo no volume de sedimentos/solos carregados por esses processos através de uma ampliação nas taxas pluviométricas, o que acarreta uma maior entrada de energia e matéria (água) no sistema.

Por fim, a implementação de medidas de adaptação e mitigação buscando evitar as consequências das mudanças climáticas é essencial para melhorar a produção agrícola e a preservação do solo (Parajuli et al., 2016; Chuenchum et al., 2020; Kebede et al., 2021). Os agricultores precisam estar cientes das alterações climáticas futuras para que realizem medidas preventivas. As técnicas mais eficazes para prevenir ou reduzir as taxas de erosão do solo são: cultivo em contorno, terraços, reflorestamento de encostas, uso de resíduos de plantas - matéria orgânica - como cobertura protetora, plantio direto, plantio de grama e camadas de arbustos (Panagos et al., 2016; Poesen, 2018). Por conseguinte, as práticas de

preparo do solo controlam as taxas de erosão reduzindo a perda de solo ao interceptar a chuva, minimizando a erosão e promovendo a recuperação da estrutura e função do ecossistema (FAO, 2019; Kaura et al., 2019).

Conclusão

De acordo com os dados e discussões apresentados ao longo do trabalho, concluímos que:

1. Os estudos apontam diminuição e aumento da erosividade e taxas de perda de solo por erosão hídrica para os cenários futuros, com pesquisas convergindo e divergindo, demonstrando a complexidade do assunto. Para o Brasil, por exemplo, os estudos em escala nacional apontam aumento de erosividade e perda de solos; na escala de bacias hidrográficas e biomas, o cenário apontado pelas pesquisas estimou variação - aumento e diminuição - nos valores de fator R, perda de solos, sedimentos e vazão, em quatro dos seis estudos apresentados. Destaca-se, ainda, o reduzido número de pesquisas sobre o assunto para o Brasil, o que confirma a hipótese inicial da revisão de literatura;

2. O panorama de estudos apresentado demonstra que, muitas vezes, as pesquisas estão concentradas em alguns continentes quando se trata de estudos que fazem análises globais e aglomerados em alguns países como EUA, China, Canadá e Austrália. Entretanto, o cenário global apontado por alguns estudos mostrou que para as últimas décadas o fator R teve valores mais expressivos para a zona tropical do globo terrestre, atingindo vários países em desenvolvimento, inclusive o Brasil. Para o século XXI, essa tendência deve permanecer. Isso demonstra a emergência de avançarmos nos estudos dessa temática nos países em desenvolvimento e especialmente no Brasil, buscando compreender alterações em nível regional e de bacias hidrográficas e procurando estabelecer estratégias de conservação do solo;

3. Para o Brasil, ainda destacamos que, com o aumento pronunciado do desmatamento, e se o cenário se mantiver nos próximos anos, teremos importantes modificações na transferência de umidade amazônica para outras regiões, alterando os valores de erosividade. É algo que merece atenção da comunidade científica nos próximos anos;

4. Em nossa revisão de literatura observamos que 34 estudos (45%) apresentavam a bacia hidrográfica como área de estudo e quanto as palavras-chave, 68 vezes houve menção a este termo. Os estudos considerando a bacia

hidrográfica como unidade de análise devem se sobressair na avaliação de perda de solos relacionadas às mudanças climáticas e a Geografia deve ser uma ciência presente no desenvolvimento desses estudos, integrando diversas variáveis ambientais, fornecendo dados de campo e conferindo um aspecto holístico à interpretação dos dados. A integração destes dados ainda é um desafio segundo os estudos citados nesta revisão de literatura;

5. Diante da complexidade do assunto, é fundamental que a sociedade esteja atenta às mudanças climáticas e disposta a traçar e executar estratégias de conservação do solo. Ainda que vários estudos venham a ser desenvolvidos apontando cenários futuros de erosividade e perda de solos, a conscientização dos agricultores é essencial para garantir que a pesquisa seja, de fato, aplicada.

Agradecimentos

O trabalho em questão foi desenvolvido como parte do projeto “Avaliação temporal dos processos erosivos na bacia do rio Santa Maria (RS) em resposta a mudanças climáticas” financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) por meio do Edital ARD (Auxílio Recém Doutor) 04/2019.

Referências

Almagro, A., Oliveira, P.T.S., Nearing, M.A., Hagemann, S., 2017. Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil. *Nature - Scientific Reports* 7, 01-12.

Altieri, M.A., Nicholls, C. I., 2017. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climate Change* 140, 33-45.

Amanambu, A. A., Li, L., Egbinola, C. N., Obarein, O. A., Mupenzi, C., Chen, D., 2019. Spatio-temporal variation in rainfall-runoff erosivity due to climate change in the Lower Niger Basin, West Africa. *Catena* 172, 324-334.

Anache, J. A. A., Flanagan, D. C., Srivastava, A., Wendland, E. 2018. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. *Science of The Total Environment* 622–623, 140-151.

Azari, M., Oliaye, A., Nearing, M. A., 2021. Expected climate change impacts on rainfall erosivity over Iran based on CMIP5 climate models. *Journal of Hydrology* 593, 1-11.

Azim F., Shakir A.S., Habib-ur-Rehman K.A. 2016. Impact of climate change on sediment yield for Naran watershed, Pakistan.

International Journal of Sediment Research 31, 212–219.

Babur, M., Shrestha, S., Bhatta, B. Datta, A., Ullah, H., 2020. Integrated assessment of extreme climate and landuse change impact on sediment yield in a mountainous transboundary watershed of India and Pakistan. *Journal of Mountain Science* 17, 624 – 640.

Ballabio, C., Borrelli, P., Spinoni, J., Meusburger, K., Michaelides, S., Beguería, S., Klik, A., Petan, S., Janeček, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumitrescu, A., Tadić, M. P., Diodato, N., Kostalova, J., Rousseva, S., Banasik, K., Alewell, C., Panagos, P. 2017. Mapping monthly rainfall erosivity in Europe. *Science of The Total Environment* 579, 1298-1315.

Bhattacharya, R. K.; Chatterjee, N. D.; Das, K. 2020. Sub-basin prioritization for assessment of soil erosion susceptibility in Kangsabati, a plateau basin: a comparison between MCDM and SWAT models. *Science of Total Environment* 734, 1-21.

Berberoglu, S., Cilek, A., Kirkby, M., Irvine, B., Donmez, C., 2020. Spatial and temporal evaluation of soil erosion in Turkey under climate change scenarios using the Pan-European Soil Erosion Risk Assessment (PESERA) model. *Environmental Monitoring and Assessment* 192, 1-22.

Bergier, I., Assine, M.L., McGlue, M.M., Alho, C.J.R., Silva, A., Guerreiro, R.L., Carvalho, J.C. 2018. Amazon rainforest modulation of water security in the Pantanal wetland. *Science of the Total Environment* 619–620, 1116-1125.

Borrelli, P., Robinson, D.A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J.E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., Ballabio, C. 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, 21994-22001.

Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schutt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Oost, K.V., Montanarella, L., Panagos, P. 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature* 8, 1-13.

Breure A., Lijzen J., Maring L. 2018. Soil and land management in a circular economy. *Science of the Total Environment* 624, 1125 – 1130.

Caldas, V. I. S. P., Silva, A. S., Santos, J. P. C. 2019. Suscetibilidade a erosão dos solos da Bacia Hidrográfica Lagos – São João, no estado do Rio de Janeiro – Brasil, a partir do método

- AHP e análise multicritério. *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 1415-1430.
- Chen, C. N., Tfwala, S. S., Tsai, C. H., 2020. Climate Change Impacts on Soil Erosion and Sediment Yield in a Watershed. *Water* 12, 1-21.
- Chimdessa, K., Quraishi, S., Kebede, A., Alamirew, T., 2019. Effect of Land Use Land Cover and Climate Change on River Flow and Soil Loss in Didessa River Basin, South West Blue Nile, Ethiopia. *Hydrology* 2, 1-20.
- Chuenchum, P., Xu, M., Tang, W. 2020. Predicted trends of soil erosion and sediment yield from future land use and climate change scenarios in the Lancang–Mekong River by using the modified RUSLE model. *International Soil and Water Conservation Research* 8, 213-227.
- Chuenchum, P., Xu, M., Tang, W., 2020. Predicted trends of soil erosion and sediment yield from future land use and climate change scenarios in the Lancang–Mekong River by using the modified RUSLE model. *International Soil and Water Conservation Research* 8, 213-227.
- Colman, C.B., Oliveira, P.T.S., Almagro, A., Soares-Filho, B.S., Rodrigues, D.B.B. 2019. Effects of Climate and Land-Cover Changes on Soil Erosion in Brazilian Pantanal. *Sustainability* 11, 1-16.
- Cui, Y., Pan, C., Liu, C., Luo, M., Guo, Y, 2020. Spatiotemporal variation and tendency analysis on rainfall erosivity in the Loess Plateau of China. *Hydrology Research* 51 (5), 1048 – 1062.
- Das, B., Paul, A., Bordoloi, R, Tripathi, O.P., Pandey, P.K. 2018. Soil erosion risk assessment of hilly terrain through integrated approach of RUSLE and geospatial technology: a case study of Tirap District, Arunachal Pradesh. *Modeling Earth Systems and Environment* 4, 373–381.
- Debortoli, N.S., Dubreuil, V., Hirota, M., Filho, S.R., Lindoso, D.P. Nabucet, J. 2016. Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. *International Journal of Climatology* 37, 2889-2900.
- Dias, de S., Pereira da Luz, M., Medero, G.M., Nascimento, T. F. 2018. An Overview of Hydropower Reservoirs in Brazil: Current Situation, Future Perspectives and Impacts of Climate Change. *Water* 10, 592. 1-18.
- Dornella, P. C., Seabra, V. S., Xavier, R. A., Silva, R. M, 2019. Vulnerabilidade à erosão dos solos na Bacia do Alto Rio Paraíba, Semiárido Paraibano. In: Pinheiro, L. S., Gorayeb, A. (Org), *Geografia Física e as Mudanças Globais*. Editora UFC, Fortaleza, pp. 1-12.
- Duan, J., Liu, Y. J., Yang, J., Tang, C. J., Shi, Z. H. 2020. Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in citrus orchards of southern China. *Journal of Hydrology* 582, 124290, 1-10.
- Duulatov, E., Chen, X., Amanambu, A.C., Ochege, F.U., Orozbaev, R., Issanova, G., Omurakunova, G. 2019. Projected Rainfall Erosivity Over Central Asia Based on CMIP5 Climate Models. *Water* 11, 1-16.
- Eekhout, J.P.C, Millares-Valenzuela, A., Martínez-Salvador, A, García-Lorenzo, R., Pérez-Cutillas, P., Conesa-García, C., de Vente, J. 2021. A process-based soil erosion model ensemble to assess model uncertainty in climate-change impact assessments. *Land Degradation & Development* 32, 2409– 2422.
- Eekhout, J. P. C., Vente, J. 2019. The implications of bias correction methods and climate model ensembles on soil erosion projections under climate change. *Earth Surface Process and Landforms* 44, 1137– 1147.
- Eekhout, J. P. C., Hunink, J. E., Terink, W., Vente, J. 2018. Why increased extreme precipitation under climate change negatively affects water security. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 5935-5946.
- FAO – Food and Agriculture Organization. 2019. Erosão do solo: o maior desafio para o manejo sustentável do solo. Organização para a Alimentação e Agricultura das Nações Unidas. Disponível em:<http://www.fao.org/agora/fundo/publications/pt/> Acesso: 30 dez. 2020.
- Gafforov, K.S., Bao, A., Rakhimov, S., Liu, T., Abdullaev, F., Jiang, L., Durdiev, K., Duulatov, E., Rakhimova, M., Mukanov, Y. 2020. The Assessment of Climate Change on Rainfall-Runoff Erosivity in the Chirchik – Akhangaran Basin, Uzbekistan. *Sustainability* 12, 1-21.
- Gericke, A., Kiesel, J., Deumlich, D., Venohr, M., 2019. Recent and Future Changes in Rainfall Erosivity and Implications for the Soil Erosion Risk in Brandenburg, NE Germany. *Water* 11, 1-18.
- Giang, P. Q., Giang, L. T., Toshiki, K., 2017. Spatial and Temporal Responses of Soil Erosion to Climate Change Impacts in a Transnational Watershed in Southeast Asia. *Climate* 5, 1-15.
- Guo, S., Zhu, Z., Lyu, L. 2018. Effects of Climate Change and Human Activities on Soil Erosion in the Xihe River Basin, China. *Water* 10, 1-14.
- Gupta, S., Kumar, S., 2017. Simulating climate change impact on soil erosion using RUSLE model– a case study in a watershed of mid-

- Himalayan landscape. *Journal of Earth System Science* 126, 1-20.
- Hatfield, J.L., Antle, J., Garrett, K. A., Izaurralde, R. C., Mader, T., Marshall, E., Nearing, M., Robertson, G. P., Ziska, L. 2020. Indicators of climate change in agricultural systems. *Climatic Change* 163, 1719–1732.
- Hipt, F.O., Diekkrüger, B., Steup, G., Yira, Y., Hoffmann, T., Rode, M. 2018. Modeling the impact of climate change on water resources and soil erosion in a tropical catchment in Burkina Faso, West Africa. *CATENA* 163, 63-77.
- Hoomehr, S., Schwartz, J.S., Yoder, D.C., 2016. Potential changes in rainfall erosivity under GCM climate change scenarios for the southern Appalachian region, USA. *CATENA* 136, 141-151.
- Hu, Y., Gao, M., Batunacun, 2020. Evaluations of water yield and soil erosion in the Shaanxi-Gansu Loess Plateau under different land use and climate change scenarios. *Environmental Development* 34, 1-16.
- Huynh, C.V., Pham, T.G., Nguyen, T.Q., Nguyen, L.H.K., Tran, P.T., Le, Q.N.P., Nguyen, M. T.H. 2020. Understanding Indigenous Farming Systems in Response to Climate Change: An Investigation into Soil Erosion in the Mountainous Regions of Central Vietnam. *Applied Science* 10, 1-24.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019. Special Report: Special Report on Climate Change and Land. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/>. Acesso em 30 dez. 2020.
- Jiang, C., Zhang, H., Zhang, Z., Wang, D. 2019. Model-based assessment soil loss by wind and water erosion in China's Loess Plateau: Dynamic change, conservation effectiveness, and strategies for sustainable restoration. *Global and Planetary Change* 172, 396-413
- Kaura, M., Arias, M., Benjamin, J. Oeurng, C. Cochrane, T. 2019. Benefits of forest conservation on riverine sediment and hydropower in the Tonle Sap Basin, Cambodia. *Ecosystem Services* 39, 1-13.
- Kebede, Y. S, Endalamaw, N. T., Sinshaw, B. G., Atinkut, H. B., 2021. Modeling soil erosion using RUSLE and GIS at watershed level in the upper beles, Ethiopia. *Environmental Challenges* 2, 1-9.
- Khare, D., Mondal, A., Kundu, S. Mishra, P. K. 2017. Climate change impact on soil erosion in the Mandakini River Basin, North India. *Applied Water Science* 7, 2373–2383.
- Kirkpatrick, S.P, Pitmana, A. 2018. Extreme events in the context of climate change. *Public Health Research & Practice* December 28(4), e2841825, 1-4.
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., Lombi, E., 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International* 132, 1-8.
- Kourgialas, N.N., Koubouris, G.C., Karatzas, G.P., Metzidakis, I. 2016. Assessing water erosion in Mediterranean tree crops using GIS techniques and field measurements: the effect of climate change. *Natural Hazards* 83, 65-81.
- Leta, O. T., El-Kadi, A. I., Dulai, H., Ghazal, K. A., 2016. Assessment of climate change impacts on water balance components of Heeia watershed in Hawaii. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 8, 182-197.
- Li, Z., Fang, H. 2016. Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews* 163, 94-117.
- Li, X., Zhang, L., Zheng, Y., Yang, D., Wu, F., Tian, Y., Han, F., Gao, B., Li, H., Zhang, Y., Ge, Y., Cheng, G., Fu, B., Jia, X., Song, C., Zheng, C. 2021. Novel hybrid coupling of ecohydrology and socioeconomy at river basin scale: A watershed system model for the Heihe River basin. *Environmental Modelling & Software* 141, 1-15.
- Li, X., Ye, X. 2018. Variability of rainfall erosivity and erosivity density in the Ganjiang River Catchment, China: characteristics and influences of climate change. *Atmosphere (Basel)* 9, 1-18.
- Liu, Y., Zhao, W., Liu, Y., Pereira, P. 2020. Global rainfall erosivity changes between 1980 and 2017 based on an erosivity model using daily precipitation data. *Catena* 194, 1-12.
- Luetzenburg, G., Bittner, M.J., Calsamiglia, A., Renschler, C.S., Estrany, J., Poepl, R. 2020. Climate and land use change effects on soil erosion in two small agricultural catchment systems Fugnitz – Austria, Can Revull – Spain. *Science of The Total Environment* 704, 1-15.
- Mahala, A. 2018. Soil erosion estimation using RUSLE and GIS techniques—a study of a plateau fringe region of tropical environment. *International Journal of River Basin Management*. 11 (13), 1-18.
- Mal, S., Singh, R.B., Huggel C., Grover A. 2018. Introducing Linkages Between Climate Change, Extreme Events, and Disaster Risk Reduction. In: Mal S., Singh R., Huggel C. (eds) *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction. Sustainable Development Goals Series*. Springer, Cham, pp. 1-14.
- Marhaento, H., Booi, M. J., Hoekstra, A. Y. 2018. Hydrological response to future land-use change and climate change in a tropical

- catchment, *Hydrological Sciences Journal* 63:9: 1368-1385.
- Marziali, L., Tartari, G., Salerno, F. Valsecchi, L., Bravi, C., Lorenzi, E., Genoni, P., Guzzella, L. 2017. Climate change impacts on sediment quality of Subalpine reservoirs: implications on management. *Water (Switzerland)* 9, 1-18.
- Miheretu, B.A., Yimer, A.A. 2018. Estimating soil loss for sustainable land management planning at the Gelana sub-watershed, northern highlands of Ethiopia. *International Journal of River Basin Management* 16, 41-50.
- Mondal, A., Khare, D., Kundu, S., 2016a. Impact assessment of climate change on future soil erosion and SOC loss. *Natural Hazards* 82, 1515-1539.
- Mondal, A., Khare, D., Kundu, S., 2016b. Change in rainfall erosivity in the past and future due to climate change in the central part of India. *International Soil and Water Conservation Research* 4, 186-194.
- Montanarella, L., Pennock, D. J., Mckenzie, N., Badraoui, M., Chude, v., Baptista, I., mamo, T., Yemefack, M., Singh Aulakh, M., Yagi, K., Young Hong, S., Vijarnsorn, P., Zhang, G.-L., Arrouays, D., Black, H., Krasilnikov, P., Sobocká, J., Alegre, J., Henriquez, C. R., de Lourdes Mendonça-Santos, M., Taboada, M., Espinosa-Victoria, D., Alshankiti, A., Alavipanah, S. K., Elsheikh, E. A. E. M., Hempel, J., Camps Arbertain, M., Nachtergaele, F. , Vargas, R. 2016. World's soils are under threat. *Soil* 2, 79-82.
- Nasidi, N.M., Wayayok, A., Abdullah, A.F. Kassim, M. S. M., 2020. Spatio-temporal dynamics of rainfall erosivity due to climate change in Cameron Highlands, Malaysia. *Modeling Earth Systems and Environment*.
- Nearing, M. A., Yin, S., Borrelli, P., Polyakov, V. O., 2017. Rainfall erosivity: An historical review, *Catena* 157, 357 – 362.
- Nilawar, A. P., Waikar, M. L. 2019. Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India. *Science of The Total Environment* 650, 2685-2696.
- Nunes, A.N., Lourenço, L., Vieira, A., Bento-Gonçalves, A. 2016. Precipitation and Erosivity in Southern Portugal: seasonal variability and trends (1950–2008). *Land Degradation and Development*, 27, 1-26.
- Ohba, M., Sugimoto, S. 2019. Differences in climate change impacts between weather patterns: possible effects on spatial heterogeneous changes in future extreme rainfall. *Climate Dynamics* 52, 4177–4191.
- Oliveira, V. A. de, Mello, C. R. de, Beskow, S., Viola, M. R., Srinivasan, R., 2019. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. *Ecological Engineering* 133, 20-31.
- Oliveira, V. A. de, Mello, C. R. de, Viola, M. R., Srinivasan, R., 2017. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. *International Journal of Climatology* 37, 5005-5023.
- Pal, S. C., Chakraborty, R., 2019. Simulating the impact of climate change on soil erosion in sub-tropical monsoon dominated watershed based on RUSLE, SCS runoff and MIROC5 climatic model. *Advances in Space Research* 64, 352-377.
- Pal, S. C., Chakraborty, R., Roy, P., Chowdhuri, I., Das, B., Saha, A., Shit, M. 2021. Changing climate and land use of 21st century influences soil erosion in India. *Gondwana Research* 94, 164-185.
- Panagos, P., Ballabio, C., Meusburger, K., Spinoni, J., Alewell, C., Borrelli, P. 2017a. Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. *Journal of Hydrology* 548, 251-262.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K. 2017b. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports* 7, 1-12.
- Panagos, P., Imeson, A., Meusburger, K., Borrelli, P., Poesen, J., Alewell, C., 2016. Soil conservation in Europe: wish or reality? *Land Degradation & Development* 27, 1547-1551.
- Panagos, P., Katsoyiannis, A., 2019. Soil erosion modelling: The new challenges as the result of policy developments in Europe. *Environ Research* 172, 470-474.
- Panagos, P., Standardi, G., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., Bosello, F. 2018. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. *Land Degradation & Development* 29, 471– 484.
- Parajuli, P. B., Jayakody, P., Sassenrath, G. F., Ouyang, Y., 2016. Assessing the impacts of climate change and tillage practices on stream flow, crop and sediment yields from the Mississippi River Basin. *Agricultural Water Management* 168, 112-124.
- Pal, S. C., Chakraborty, R. 2019. Simulating the impact of climate change on soil erosion in sub-tropical monsoon dominated watershed based on RUSLE, SCS runoff and MIROC5 climatic

- model. *Advances in Space Research* 64, 352-377.
- Parsons, A. J., 2019. How reliable are our methods for estimating soil erosion by water? *Science of the Total Environment* 676, 215-221.
- Perović, V., Kadović, R., Djurdjević, V., Braunović, S., Čakmak, D., Mitrović, M., Pavlović, P., 2019. Effects of changes in climate and land use on soil erosion: a case study of the Vranjska Valley, Serbia. *Regional Environment Change* 19, 1035-1046.
- Plangoen, P., Udmale, P. 2017. Impacts of Climate Change on Rainfall Erosivity in the Huai Luang Watershed, Thailand. *Atmosphere* 8, 1-18.
- Poesen, J. 2018. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms* 43, 64- 84.
- Riquetti, N. B., Mello, C. R., Beskow, S., Viola, M. R., 2020. Rainfall erosivity in South America: Current patterns and future perspectives. *Science of The Total Environment* 724, 1-14.
- Rosa, A. G., Sousa, A. M. L. de, Costa, J. A. da, Souza, E. Barreiros de., 2016. Erosividade da chuva em Rondon do Pará, PA, Brasil de 1999 a 2015 e projetada para 2035. *Revista Ambiente & Água* 11(4), 1006-1021.
- Ruiz-Pérez, G., González-Sanchis, M., Del Campo, A.D., Francés, F. 2016. Can a parsimonious model implemented with satellite data be used for modelling the vegetation dynamics and water cycle in water-controlled environments? *Ecological Modelling* 324, 45-53.
- Sartori, M., Philippidis, G., Ferrari, E., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., Panagos, P. 2019. A linkage between the biophysical and the economic: Assessing the global market impacts of soil erosion. *Land Use Policy* 86, 299-312.
- Serdeczny, O., Adams, S., Baarsch, F., Coumou, D., Robinson, A., Hare, W., Schaeffer, M., Perrette, M., Reinhardt, J. 2017. Climate change impacts in Sub-Saharan Africa: from physical changes to their social repercussions. *Regional Environmental Change* 17, 1585-1600.
- Silva, J. R. I., Souza, E. S., Souza, R., Santos, E. S., Antonino, A. C. D. 2019. Efeito de diferentes usos do solo na Erosão hídrica em Região Semiárida. *Revista Engenharia na Agricultura* 27, 272-283.
- Sherriff, S.C., Rowan, J.S., Fenton, O., Jordan, P., Uallacháin, D. 2018. Sediment fingerprinting as a tool to identify temporal and spatial variability of sediment sources and transport pathways in agricultural catchments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 267, 188-200.
- Sonderregger, T., Pfister, S., Hellweg, S. 2020. Assessing Impacts on the Natural Resource Soil in Life Cycle Assessment: Methods for Compaction and Water Erosion. *Environmental Science Research* 54, 6496–6507.
- Spera, S.A., Galford, G.L., Coe, M.T., Macedo, M.N., Mustard, J.F. 2016. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. *Global Change Biology* 22, 3405-3413.
- Stefanidis, S., Stathis, D., 2018. Effect of Climate Change on Soil Erosion in a Mountainous Mediterranean Catchment (Central Pindus, Greece). *Water* 10, 1-12.
- Stoessel, F., Sonderegger, T., Bayer, P., Hellweg, S. 2018. Assessing the Environmental Impacts of Soil Compaction in Life Cycle Assessment. *Science of Total Environment* 630, 913-921.
- Talchabhadel, R., Nakagawa, H., Kawaike, K. 2020. Evaluating the rainfall erosivity (R-factor) from daily rainfall data: an application for assessing climate change impact on soil loss in Westrapti River basin, Nepal. *Modeling Earth System Environments* 6, 1741-1762.
- Teng, H., Liang, Z., Chen, S., Liu, Y., Rossel, R.A V., Chappell, A., Yu, W., Shi, Z. 2018. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models, *Science of The Total Environment*, 635: 673-686,
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Mele, B.V., Demuzere, M., Bruynseels, A., Golosov, V., Bezerra, J.F.R., Bolysov, S., Dvinskih, A., Frankl, A., Fuseina, Y., Guerra, A.J.T., Haregeweyn, N., Ionita, I., Imwangana, F.M., Moeyersons, J., Moshe, I., Samani, A.N., Niacsu, L., Nyssen, J., Otsuki, Y., Radoane, M., Rysin, I., Ryzhov, Y.V., Yermolaev, O. 2016. How fast do gully headcuts retreat? *Earth-Science Reviews* 154. 336-355.
- Wang, L., Cherkauer, K. A., Flanagan, D. C., 2018. Impacts of Climate Change on Soil Erosion in the Great Lakes Region. *Water* 10 (6), 1-16.
- Wei, S.C., Zhang, X.P., McLaughlin, N.B., Chen, X.W., Jia, S.X., Liang, A.Z., 2017. Impact of soil water erosion processes on catchment export of soil aggregates and associated SOC. *Geoderma* 294, 63-69.
- Xia, L., Bi, R, Song, X, Lu, C. 2020. Dynamic changes in soil erosion risk and its driving mechanism: A case study in the Loess Plateau of China. *European journal of soil science* 20, 1312-1331
- Yang, W., Long, D., Bai, P., 2019. Impacts of future land cover and climate changes on runoff in the mostly afforested river basin in North China, *Journal of Hydrology* 570, 201-219.
- Zare, M., Nazari Samani, A.A., Mohammady, M., Teimurian, T., Bazrafshan, J., 2016. Simulation of soil erosion under the influence of climate

- change scenarios. *Environmental Earth Science* 75, 558-572.
- Zhou, Y., Xu, Y. J., Xiao, W., Wang, J., Huang, Y., Yang, H., 2017. Climate Change Impacts on Flow and Suspended Sediment Yield in Headwaters of High-Latitude Regions—A Case Study in China's Far Northeast. *Water* 9, 1-17.
- Zhu, G., Tang, Z., Shangguan, Z., Peng, C., Deng, L., 2019. Factors affecting the spatial and temporal variations in soil erodibility of China. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 124, 737-749.
- Zhu, Q., Yang, X., Ji, F., Liu, D. L., Yu, Q., 2019. Extreme rainfall, rainfall erosivity, and hillslope erosion in Australian Alpine region and their future changes. *International Journal of Climatology* 40, 1-15.