



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

de Mello, Carlos Rogério; Ribeiro Viola, Marcelo; Curi, Nilton; da Silva, Antônio Marciano
**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO E DA EROSIVIDADE DA CHUVA MENSAL E
ANUAL NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO**

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 36, núm. 6, 2012, pp. 1878-1891

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180225136026>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO E DA EROSIVIDADE DA CHUVA MENSAL E ANUAL NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO⁽¹⁾

Carlos Rogério de Mello⁽²⁾, Marcelo Ribeiro Viola⁽³⁾, Nilton Curi⁽⁴⁾ & Antônio Marciano da Silva⁽²⁾

RESUMO

O mapeamento da erosividade da chuva e da precipitação pluvial consiste de um instrumento prático e indispensável para o planejamento do uso do solo em escalas regionalizadas, como países, Estados ou grandes bacias hidrográficas. Nesse contexto, objetivou-se neste estudo analisar a continuidade espacial do potencial erosivo da chuva e da precipitação pluviométrica, nas escalas de tempo mensal e anual, e posterior mapeamento destas, para o Estado do Espírito Santo, visando fornecer informações básicas ao planejamento de uso e manejo sustentável do solo. Para isso, 129 estações pluviométricas foram empregadas no estudo; a erosividade da chuva foi calculada tendo-se como base equações de Fournier ajustadas para os Estados vizinhos, porém com características climáticas semelhantes. Observou-se forte estrutura de dependência espacial das variáveis regionalizadas, especialmente da erosividade da chuva, com predomínio do modelo de semivariograma exponencial. Quanto à precipitação pluvial, os valores do grau de dependência espacial foram inferiores aos obtidos para a erosividade; contudo, foi possível classificar a estrutura de dependência como moderada a forte. A região do Rio Doce foi classificada como de “alto” a “muito alto” potencial erosivo, cuja erosividade média anual variou de 7.000 a 11.460 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Nessa região, os solos, além de ocorrerem em relevo disseccado e serem pobres em nutrientes, apresentam déficit hídrico pronunciado, dificultando o estabelecimento da vegetação, e são aqueles de maior vulnerabilidade natural à erosão hídrica.

Termos de indexação: potencial erosivo da chuva, geoestatística, mapeamento, conservação do solo e da água.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 12 de março de 2012 e aprovado em 08 de outubro de 2012.

⁽²⁾ Professor, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Caixa Postal 3037. CEP 37200-000 Lavras (MG). E-mail: crmello@deg.ufla.br; marciano@deg.ufla.br

⁽³⁾ Professor, Universidade Federal do Tocantins, Campus Gurupi, Rua Badejós, Chácaras 69 e 72, Lote 07. Caixa Postal 66. CEP 77402-970 Gurupi (TO). E-mail: mrviola@uft.edu.br

⁽⁴⁾ Professor Titular, Departamento de Ciência do Solo, UFLA. E-mail: niltcuri@dcs.ufla.br

**SUMMARY: SPATIAL DISTRIBUTION OF MONTHLY AND ANNUAL
RAINFALL AND RAINFALL EROSION IN ESPIRITO SANTO,
BRAZIL**

The mapping of rainfall erosivity and rainfall is a practical and indispensable tool to plan the soil and water management on a regional scale, such as countries, states or basins. The purpose of this study was to analyze the spatial continuity of erosive potential of rainfall and rainfall, considering monthly and annual mean values, and to map them for the State of Espírito Santo, Brazil, providing basic information for the planning of sustainable soil use and management. To this end, 129 weather stations were used and monthly values of rainfall erosivity were calculated using Fournier's equations. A strong spatial dependency structure was observed, especially for rainfall erosivity, with data fitting to the exponential semivariogram model. For rainfall, the spatial dependence degree values were slightly lower than for rainfall erosivity, however, a moderate to strong spatial dependence degree was obtained. The rainfall erosivity potential of the Rio Doce region was classified as "strong" and "very strong", varying from 7,000 to 11,460 MJ mm $ha^{-1} h^{-1} year^{-1}$. In this region, the natural vulnerability to water erosion of soils with a dissected relief, low natural fertility and a pronounced water deficit hampering vegetation establishment, is higher.

Index terms: erosive potential of rainfall, geostatistics, mapping, soil and water conservation.

INTRODUÇÃO

A erosão acelerada do solo é uma das grandes preocupações ambientais no Brasil, por se tratar do maior impacto ambiental em muitos Estados do País. O comportamento espacial e temporal das chuvas consiste no fator determinístico para o processo erosivo em áreas agrícolas, bem como no tocante aos deslizamentos de massas de solo em áreas cuja geomorfologia é reconhecidamente de risco, como áreas montanhosas e de topografia íngreme, sem uma eficiente cobertura vegetal.

O Estado do Espírito Santo está localizado na região Sudeste do Brasil, na costa leste, com área de 45.597 km² (0,53 % da área total do Brasil), e apresenta sete grandes bacias hidrográficas: São Mateus, Itaúnas e Barra Seca (norte e nordeste do Estado), Rio Doce (baixa bacia hidrográfica do Rio Doce), Atlântico Sudeste (centro do Estado), e Itapemirim e Itabapoana (sul e sudeste do Estado). O Estado tem aproximadamente 70 % de áreas em relevo dissecado e 30 % em relevo aplainado (Atlas..., 2008). As áreas accidentadas, além de substancial variabilidade nas precipitações pluviométricas, apresentam grande variabilidade de temperatura. As áreas suavizadas tendem a se concentrar nas partes mais baixas, coincidentes com os Tabuleiros Costeiros e planícies litorâneas (restingas e manguezais), com precipitações relativamente não muito elevadas.

O Espírito Santo faz divisa com Minas Gerais a oeste, com o Rio de Janeiro ao sul, com a Bahia ao norte e é banhado, em toda a sua faixa leste, pelo oceano Atlântico. O crescimento da economia do Estado nos últimos anos tem sido impulsionado pela exploração agrícola do solo, silvicultura e mineração. Esse processo tem levado a alguns inconvenientes da

sustentabilidade ambiental, especialmente no tocante à erosão do solo e ocorrência, cada vez mais frequente, de áreas degradadas.

O desenvolvimento de mapas visando à distribuição espacial de variáveis climáticas e, ou, derivadas destas, como o potencial erosivo da chuva, constitui-se em ferramenta indispensável ao planejamento em macroescala de atividades associadas, principalmente, à agricultura e mineração. Nesse sentido, há vários estudos desenvolvidos em muitos países objetivando o mapeamento da variável erosividade da chuva, destacando-se os trabalhos de Mannaerts & Gabriels (2000) para Cabo Verde (África), Odudo-Afriyie (1996) para Ghana (África), Qi et al. (2000) para a Coreia do Sul, Salako (2010) para a Nigéria, Meusburger et al. (2012) para a Suíça, entre outros. Quanto ao Brasil, têm-se os estudos desenvolvidos por Silva (2004) para todo o território brasileiro, Mello et al. (2007) para o Estado de Minas Gerais e Montebeller et al. (2007) para o Estado do Rio de Janeiro. Especialmente nos trabalhos de Meusburger et al. (2012), Mello et al. (2007) e Montebeller et al. (2007) para o desenvolvimento de mapas, foram utilizadas técnicas geoestatísticas com aplicação do interpolador krigagem ordinária.

De acordo com Akkala et al. (2010), os quais fizeram uma vasta exploração da literatura científica sobre o desempenho de interpoladores espaciais, o interpolador krigagem ordinária é um dos mais interessantes para o mapeamento de grandezas climáticas, por conciliar efetividade estatística (variância mínima e soma dos pesos sempre iguais a 1, ou seja, ele não apresenta viés) e simplicidade e por consistir de uma combinação linear dos pesos de krigagem, os quais são estatísticos. No entanto, conforme Vieira (2000) e Goovaerts (1999), é imprescindível que haja uma modelagem eficaz do semivariograma, uma vez que todo o processo

subsequente de interpolação depende do fato de essa modelagem representar a estrutura de continuidade espacial do fenômeno em estudo. Nesse aspecto, a amostragem é fator determinístico, sobretudo em pequena escala, devido à descontinuidade do semivariograma a pequenas distâncias (Isaaks & Srivastava, 1989).

Diante do exposto, este trabalho objetivou estudar a continuidade espacial das grandezas precipitação pluviométrica e erosividade da chuva, em escala de tempo mensal e anual, bem como produzir os respectivos mapas delas para o Estado do Espírito Santo, aplicando procedimentos de geoestatística.

MATERIAL E MÉTODOS

Base de dados e cálculo da erosividade

O cálculo da erosividade da chuva foi conduzido aplicando-se relações entre a erosividade média da chuva, em escala mensal, e o índice de Fournier modificado (MFI), conforme proposto por Renard & Freimund (1994), as quais foram ajustadas para algumas localidades específicas por diferentes autores (Figura 1). Essas relações possuem a seguinte estrutura:

$$EI_{30m} = aMFI^b \text{ ou } EI_{30m} = a + bMFI \quad (1)$$

$$MFI = \left(\frac{P_m^2}{P_a} \right) \quad (2)$$

$$EI_{30a} = \sum_{m=1}^{12} (EI_{30m}) \quad (3)$$

em que EI_{30m} corresponde à erosividade média do respectivo mês m ($MJ ha^{-1} mm h^{-1}$), MFI é o índice de Fournier Modificado (mm), P_m é a precipitação média do mês m (mm), P_a é a precipitação média anual (mm), EI_{30a} corresponde à erosividade média anual e a e b são os coeficientes de ajuste da equação. Com base em dados médios de precipitação mensal e de precipitação média anual, calculados a partir de séries históricas constituídas por dados diários de precipitação, calculam-se os valores mensais de MFI. A partir desses valores, e com base na equação mais apropriada para cada posto pluviométrico (Figura 1), estima-se a erosividade mensal com a respectiva relação $EI_{30m} \times MFI$. A soma dos valores médios mensais de erosividade fornece seu valor médio anual. É importante realçar que essas equações devem ser aplicadas para estimativa de valores médios mensais de erosividade da chuva, os quais são realizados com base em dados médios de precipitação, necessitando-se de pelo menos 10 anos consecutivos de dados de precipitação diária para cálculo da média dos respectivos valores mensais e do valor médio anual de precipitação.

O procedimento de cálculo da erosividade utilizando equações baseadas no MFI tem sido bastante comum quando se visa ao desenvolvimento de mapas de

erosividade, devido à pequena quantidade de estações pluviográficas no território brasileiro como um todo, (Silva, 2004; Mello et al., 2007; Salako, 2010). Em particular, no Estado do Espírito Santo, há apenas quatro estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com séries históricas representativas; portanto, a disponibilidade de séries de erosividade oriundas de pluviogramas no Estado fica limitada, dificultando o mapeamento dessas grandezas sem a aplicação do conceito desenvolvido com base no índice de Fournier modificado (MFI).

Na figura 1 está apresentado o mapa do Estado do Espírito Santo, com a distribuição espacial dos postos pluviométricos aplicados ao estudo da erosividade da chuva e da precipitação, cujos dados foram extraídos do Hidroweb/ANA e consistem apenas de dados diários de precipitação (total de 129 estações), bem como da identificação, para cada posto pluviométrico, das equações que foram aplicadas nos cálculos associados à erosividade da chuva a partir do MFI. As estações pluviométricas foram selecionadas tendo-se como base a representatividade das séries históricas, em termos temporais (foram buscadas séries com pelo menos 10 anos de dados) e que estas fossem atuais. Assim, alguns postos pluviométricos, para os quais o monitoramento sofreu interrupções permanentes, com as séries sendo finalizadas na década de 1980, não foram empregados no estudo.

No Estado do Espírito Santo existem sete grandes bacias hidrográficas (Figura 1), conforme apresentado anteriormente. Para efeito de apresentação dos resultados e discussões comparativas destes, optou-se, neste trabalho, por um agrupamento por regiões, da seguinte forma: São Mateus (São Mateus, Itaunas e Barra Seca), Rio Doce, Itapemirim/Itabapoana e Atlântico Sudeste. Às duas últimas regiões incluem-se as áreas de serra do Estado. Para cada uma destas regiões foram aplicadas equações do tipo $EI_{30m} = f(MFI)$ desenvolvidas em outros Estados, porém procurando-se associá-las às condições climáticas do Estado do Espírito Santo, uma vez que essa condição é fundamental para o uso desse tipo de equação. Assim, para a região do Rio Doce foi aplicada a equação desenvolvida por Oliveira et al. (2009) especificamente para a bacia do Rio Doce, no Estado de Minas Gerais; para a região São Mateus, foi usada a equação apresentada por Silva (2004) para Juazeiro (BA), visto que as condições ambientais são semelhantes, como déficit hídrico mais pronunciado, elevada concentração de chuvas e temperaturas médias anuais mais elevadas; especificamente para as áreas de serra do Estado, foi aplicada a equação desenvolvida por Carvalho et al. (2005) para a região serrana do Rio do Janeiro; e para as demais áreas das regiões Itapemirim-Itabapoana e Atlântico Sudeste, incluindo toda a região litorânea delas, foi aplicada a equação desenvolvida por Carvalho et al. (2005) para Seropédica (RJ), dada a similaridade das condições litorâneas e climáticas destes Estados.

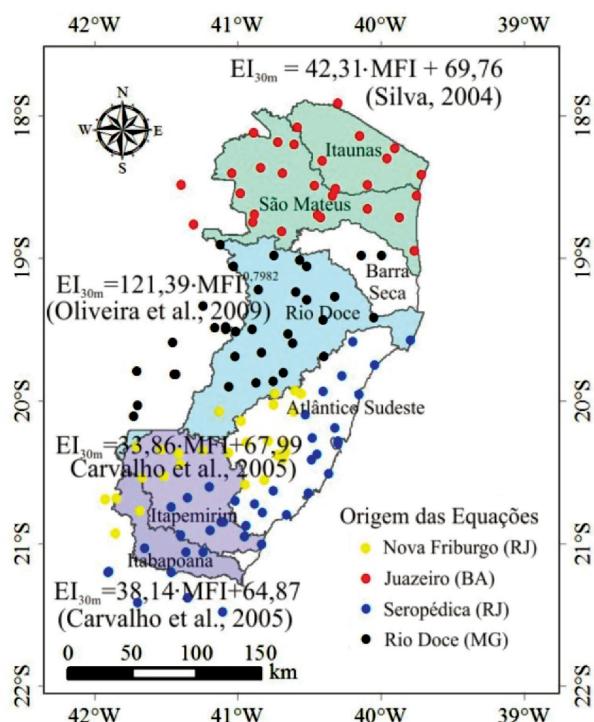


Figura 1. Principais bacias hidrográficas do Estado do Espírito Santo, distribuição espacial dos postos pluviométricos empregados no estudo e respectivas equações $EI_{30m} \times MFI$ aplicadas e respectivos autores.

Análise geoestatística

A identificação de tendências regionalizadas é extremamente importante para a continuidade dos processos em geoestatística, uma vez que a existência dessas tendências significa que é provável haver mascaramento da estrutura de dependência espacial, o que, segundo Clark (1979), pode levar a uma falsa dependência espacial dos dados. A identificação de tendências e a posterior remoção delas foram executadas, conforme Ribeiro Junior & Diggle (2001), aplicando-se o software R, com o pacote de geoestatística GeoR.

Após essas análises preliminares associadas à base de dados, procedeu-se ao desenvolvimento dos semivariogramas experimentais, permitindo avaliar o comportamento das semivariâncias como função da distância, ou seja, se há continuidade espacial dos dados. Essa etapa é fundamental para definir qual modelo teórico de semivariograma é mais apropriado para representar a estrutura de autocorrelação espacial. Assim, os modelos exponencial, esférico e gaussiano foram testados aplicando-se o método dos mínimos quadrados ponderados, e ajustes a olho foram também aplicados para corrigir possíveis distorções que métodos automáticos proporcionam (Angulo-Martinez et al., 2009). Após análise do ajuste dos modelos ao semivariograma experimental, estes foram

selecionados com base na validação cruzada e na análise visual do ajuste, especialmente no tocante ao comportamento dos parâmetros efeito pepita e alcance (Vieira, 2000; Lyon et al., 2010). O software GeoR também foi aplicado nas etapas descritas. Os mapas foram gerados com base na krigagem ordinária e, para garantir melhor qualidade destes, o programa ArcMap (ESRI, 2004) foi aplicado com base no modelo de semivariograma previamente ajustado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comportamento médio da precipitação pluviométrica e da erosividade da chuva

Na figura 2a estão apresentados gráficos nos quais se pode analisar a distribuição mensal da precipitação média e da respectiva erosividade média, nas quatro regiões representativas do Estado do Espírito Santo (Figura 1). Em todas as regiões é possível distinguir dois períodos específicos, sendo um chuvoso, entre outubro e março (verão), e outro characteristicamente mais seco, com totais médios mensais inferiores a 30 mm, entre abril e setembro (inverno). Essa característica é marcante das condições climáticas do Sudeste do Brasil, devido à influência do Anticiclone do Atlântico Sul, que se intensifica entre julho e setembro, influenciando a presença de frentes frias, e também em razão da menor ou mesmo inexistente presença de umidade oriunda da região amazônica, a qual é responsável tanto pela formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) quanto por linhas de instabilidade (chuvas convectivas) na região Sudeste do Brasil (Reboita et al., 2010).

O mês mais chuvoso e com maior erosividade média, em todas as regiões, é dezembro, seguido por novembro e janeiro, nessa ordem. A concentração de chuvas no verão é especialmente destacada na região do Rio Doce, onde 80,8 % do total precipitado ocorre entre outubro e março. Nas demais, tem-se menor percentual, sendo de 75,6 % para Itapemirim/Itabapoana, 77,1 % para São Mateus e 70,9 % para o Atlântico Sudeste. No tocante à erosividade, é possível observar maior concentração temporal do que para precipitação. No Rio Doce, 90,2 % do potencial erosivo está vinculado aos eventos de precipitação que ocorrem nos referidos meses (outubro-março). Nas outras regiões, tem-se 81 % para Itapemirim/Itabapoana, 83,9 % para São Mateus e 80,1 % para o Atlântico Sudeste, a qual engloba parte importante da região serrana do Espírito Santo.

Em termos do comportamento anual da precipitação e da erosividade (Figura 2b), observa-se que as regiões do Rio Doce e São Mateus apresentam totais anuais semelhantes em termos de precipitação (aproximadamente 1.100 mm), enquanto a região Itapemirim/Itabapoana apresenta 1.270 mm e o Atlântico Sudeste, 1.429 mm. No contexto da

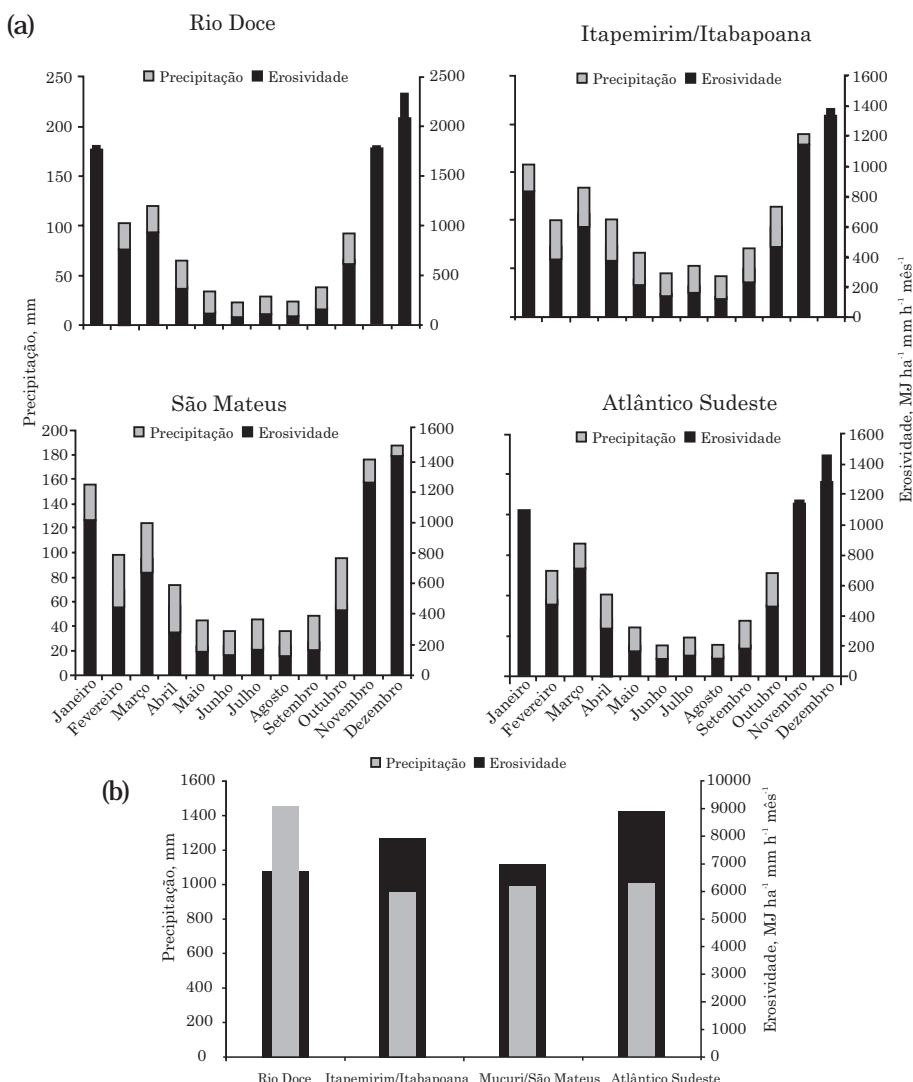


Figura 2. Distribuição média mensal (a) e anual (b) da precipitação e erosividade da chuva para as quatro regiões do Estado do Espírito Santo consideradas neste estudo.

erosividade anual, a região do Rio Doce é a que apresenta o maior valor médio anual ($> 9.000 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$), enquanto nas demais regiões esse valor é próximo a $6.000 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$. Contudo, é importante destacar que esses valores são médias para as regiões e que podem existir sub-regiões com valores mais altos ou mais baixos. Somente a distribuição espacial permitirá identificar com maior precisão esse comportamento.

Continuidade espacial da erosividade da chuva e da precipitação

O comportamento dos semivariogramas experimental e teórico, para a erosividade da chuva e para a precipitação, ambas anuais, no Estado do Espírito Santo, está apresentado na figura 3. É importante destacar, avaliando os respectivos semivariogramas experimentais, a existência de

dependência espacial de ambas as variáveis, especialmente para a erosividade. O ajuste do modelo teórico de semivariograma produziu grau de dependência de 100 % para essa variável, caracterizado pelo efeito pepita zero. Isso significa que o comportamento da semivariância como função da distância está sendo devidamente captado pelo modelo, ou seja, de crescimento até um determinado limite, conhecido como patamar, gerando um alcance de 251,5 km. O modelo exponencial foi o escolhido para ambas as variáveis devido à capacidade dele de descrever o comportamento da semivariância em detrimento dos modelos esférico e gaussiano, os quais também foram testados, porém esses ajustes não produziram resultados satisfatórios para as condições amostrais trabalhadas.

Analizando o comportamento de modelos de semivariograma para estudos relacionados à

distribuição espacial de precipitações intensas no Estado de Minas Gerais, Mello et al. (2008) concluíram pela melhor performance do modelo exponencial. Entretanto, Goovaerts (1999), analisando o comportamento da erosividade na região de Algarve (Portugal), aplicou o modelo esférico e também obteve bom ajuste, sem, contudo, fazer comparações entre os modelos. Estudando a erosividade da chuva no Estado de Minas Gerais, Mello et al. (2007) também aplicaram os modelos exponencial e esférico e obtiveram supremacia do primeiro, ponderando, no entanto, sobre o bom desempenho do modelo esférico para as condições estudadas. Montebeller et al. (2007), estudando a distribuição espacial da EI₃₀ anual no Estado do Rio Janeiro, também aplicaram o modelo exponencial para modelar a continuidade espacial da erosividade, obtendo bons ajustes, mas sem testar outros modelos. Silva et al. (2010) aplicaram os modelos gaussiano e exponencial para modelar a continuidade espacial da EI₃₀ mensal e anual no leste de Minas Gerais (bacia do Rio Doce) e obtiveram adequado desempenho de ambos, porém com superioridade do modelo gaussiano. Observa-se, portanto, que há diferentes estudos visando à espacialização da precipitação e erosividade da chuva em diferentes condições e que não há uma definição específica sobre qual modelo deve ser recomendado; contudo, a aplicação do modelo exponencial é notoriamente mais frequente e aceita.

Os semivariogramas ajustados para a erosividade e precipitação mensais estão apresentados nas figuras 4, 5 e 6, para os meses de janeiro a abril, maio a agosto e setembro a dezembro, respectivamente. Para essa situação, o modelo gaussiano também produziu alguns bons ajustes, especificamente para as erosividades mensais relativas ao período seco (junho-agosto) e para o mês de novembro. Contudo, houve supremacia do modelo exponencial, o qual produziu ajustes de alta qualidade, semelhantes aos da modelagem da continuidade espacial da erosividade anual. O modelo de semivariogramas que mais se destacou

relativamente à precipitação também foi o exponencial, com exceção dos meses de agosto (Figura 5d) e setembro (Figura 6a), seguindo a lógica obtida para a erosividade no que diz respeito ao melhor comportamento do modelo gaussiano para os meses do período seco.

No tocante à erosividade, os alcances estimados pelos modelos de semivariogramas foram superiores aos gerados pelos modelos ajustados para precipitação, além de melhor estrutura de continuidade espacial, o que pode ser comprovado pelos valores do grau de dependência espacial (GD) sempre superiores a 60 %, além da análise visual destes (Vieira, 2000). Os alcances para a erosividade mensal variaram de 126,1 a 296,2 km. É importante destacar que os maiores alcances foram obtidos para os meses mais chuvosos, durante os quais há predominância da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) no Estado do Espírito Santo; esse fenômeno meteorológico atinge grandes áreas, podendo influenciar todo o Estado durante um único episódio, induzindo a dependência espacial dos fenômenos associados à precipitação, uma vez que há maior semelhança do regime pluvial entre as diferentes regiões do Estado.

A análise variográfica da precipitação mensal para o Estado do Espírito Santo estimou alcances, de forma geral, menores do que para a erosividade (de 61,7 a 291,6 km), bem como o comportamento geral do GD. Essa situação caracteriza uma estrutura de continuidade espacial inferior, embora marcante, para todos os meses do ano, exceção feita ao mês de novembro.

Apesar das dificuldades inerentes ao ajuste de modelos de semivariogramas no tocante às suas características estruturais associadas ao comportamento das semivariâncias como função da distância e à observância das hipóteses estacionárias de primeira e segunda ordens, conforme relatam Vieira (2000) e Lee (1997), é importante destacar os

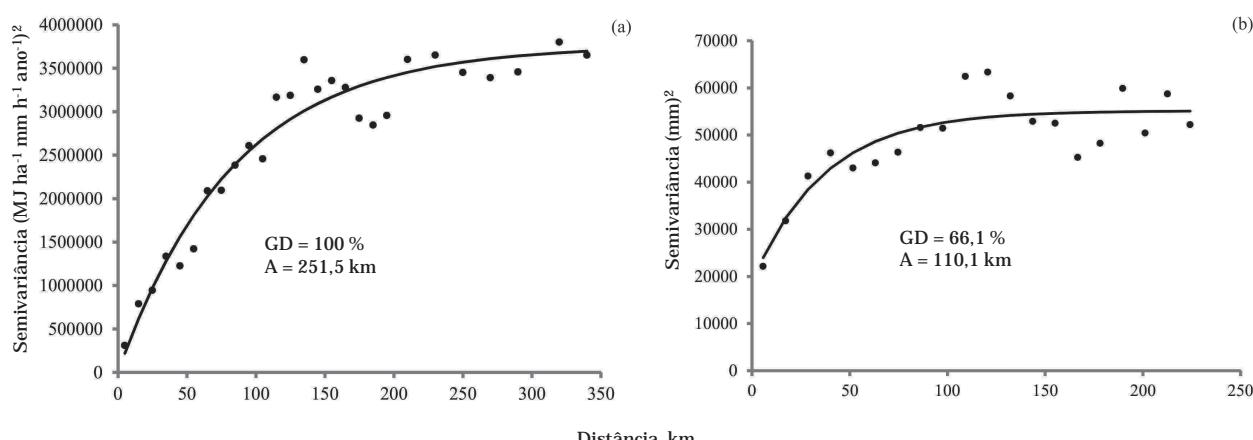


Figura 3. Semivariogramas ajustados para a erosividade anual (a) e precipitação anual (b) para o Estado do Espírito Santo (GD: grau de dependência espacial).

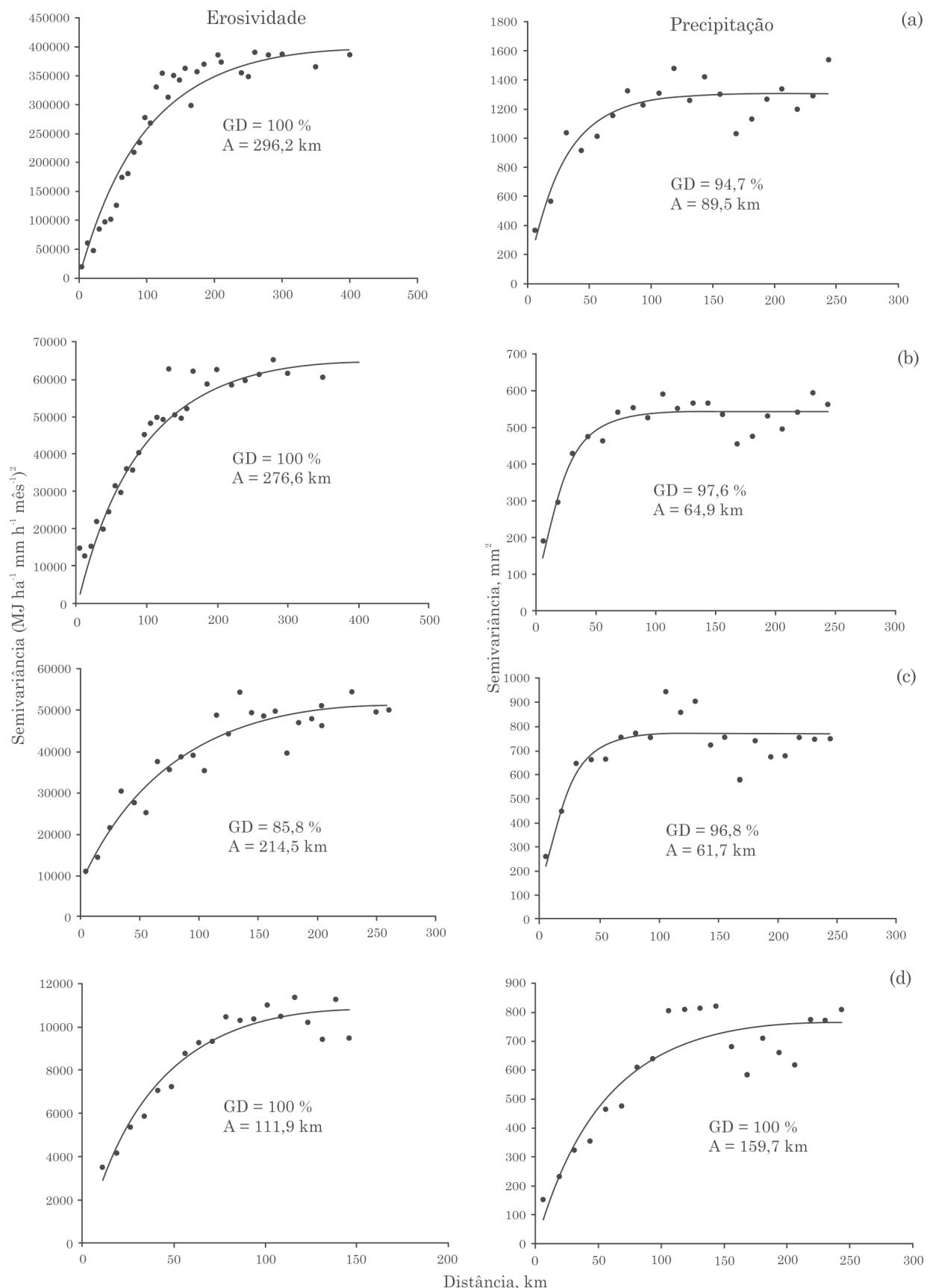


Figura 4. Semivariogramas ajustados para a erosividade e precipitação mensais para o Estado do Espírito Santo (a) janeiro; (b) fevereiro; (c) março; (d) abril.

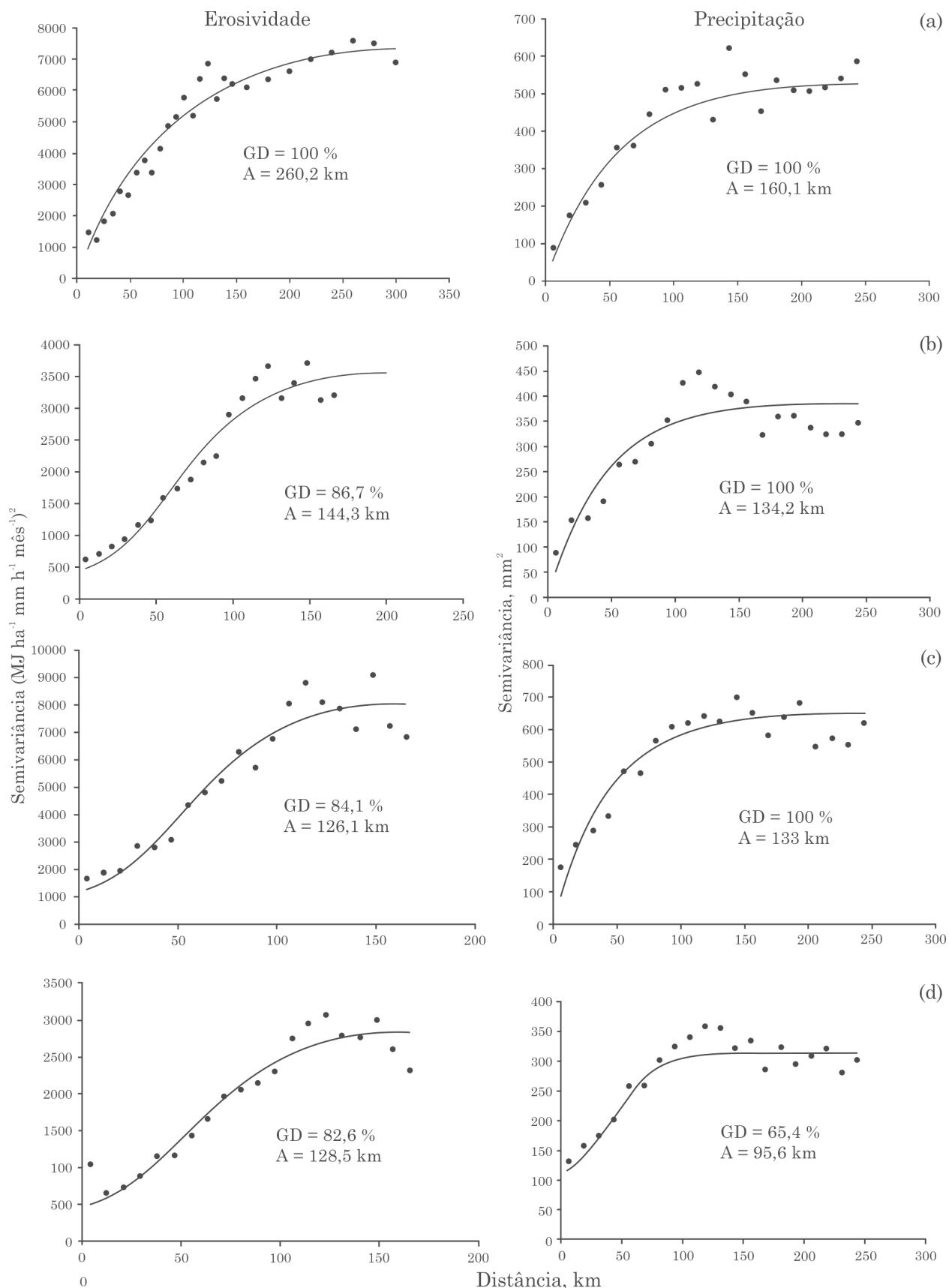


Figura 5. Semivariogramas ajustados para erosividade e precipitação mensais para o Estado do Espírito Santo (a) maio; (b) junho; (c) julho; (d) agosto.

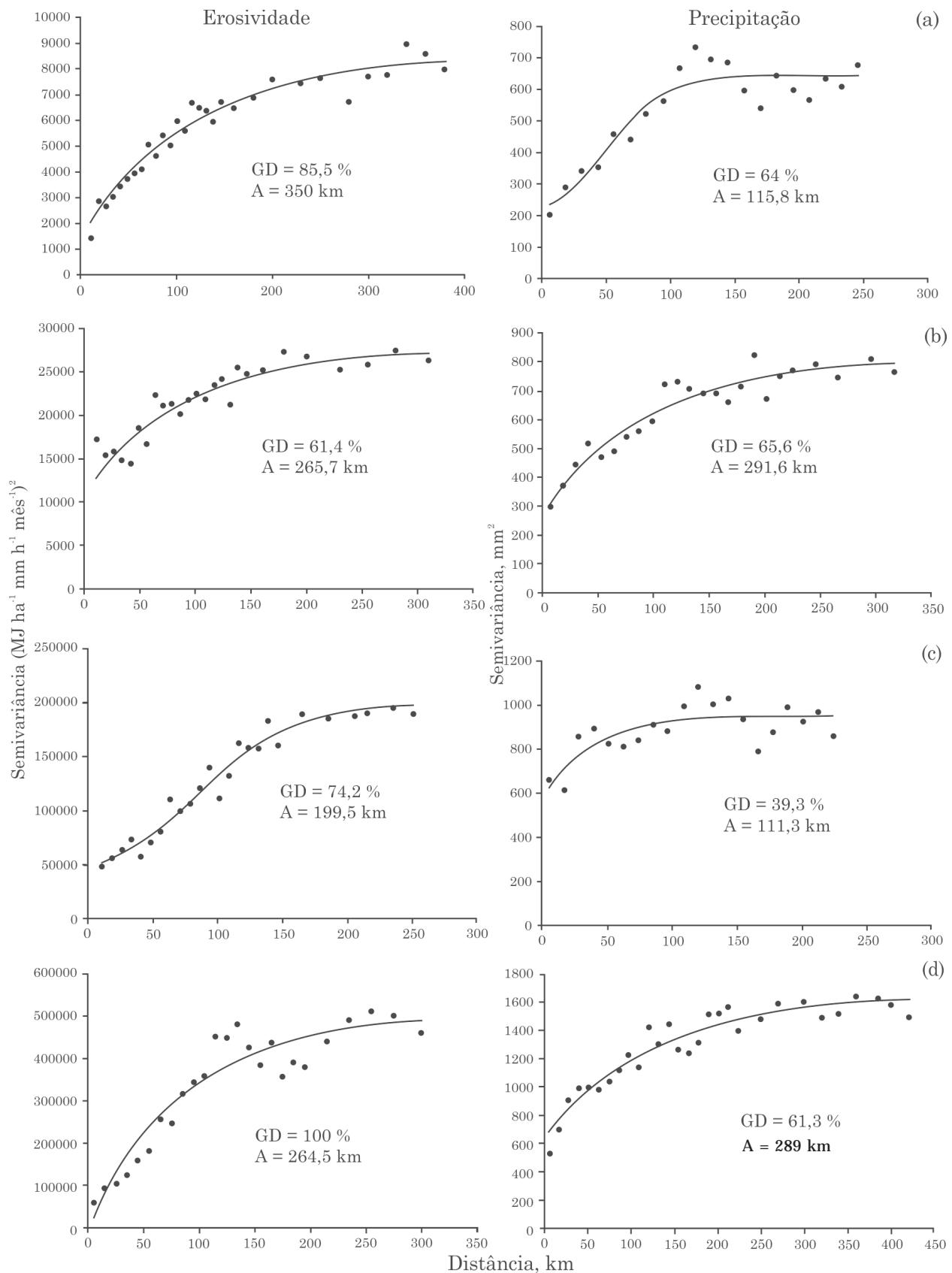


Figura 6. Semivariogramas ajustados para erosividade e precipitação mensais para o Estado do Espírito Santo (a) setembro; (b) outubro; (c) novembro; (d) dezembro.

adequados ajustes obtidos, com descrição matemática da estrutura de continuidade espacial para ambas as variáveis. Isso significa que a geração de mapas de boa qualidade, tanto para a erosividade quanto para a precipitação, é plausível, permitindo descrever espacialmente duas grandezas fundamentais para o planejamento e manejo sustentável do solo e da água no referido Estado.

Mapeamento da precipitação e erosividade da chuva

A distribuição espacial da erosividade da chuva (a), esta mesma distribuição, porém seguindo a classificação proposta por Foster et al. (1981) (b), e da precipitação (c), ambas anuais, para o Estado do Espírito Santo, está apresentada na figura 7. Observa-se que a região do Rio Doce é a que apresenta os maiores valores de erosividade anual, variando de pouco mais de 7.000 até 11.460 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ ano⁻¹, com grande concentração de valores superiores a 8.287 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ ano⁻¹. Essa constatação permite enquadrar a região, predominantemente, como tendo forte a muito forte potencial erosivo; contudo, não apresenta os maiores totais anuais de precipitação do Estado do Espírito Santo, os quais oscilam entre 768 e 1.148 mm, aumentando à medida que se aproxima do litoral. Mello et al. (2008), mapeando chuvas máximas com duração de 30' (I_{30}) no Estado de Minas Gerais, observaram que, na região sob influência do Rio Doce, entre as latitudes de 18 e 19°S, foi verificada a predominância dos maiores valores, significando que o seu regime pluvial possui um dos mais altos potenciais erosivos do Estado.

Com base nos dados levantados, é possível constatar que a região do Rio Doce no Estado do Espírito Santo é a que apresenta a maior concentração de chuvas e que esse fato propicia a formação de eventos com maior

poder erosivo. A formação de eventos de precipitação mais concentrados nessa região é explicada pela presença marcante da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a qual, segundo Reboita et al. (2010), é o principal agente causador de precipitações intensas em boa parte do Sudeste do Brasil, especialmente entre novembro e janeiro. De acordo com Kodama (1992), que analisou o comportamento tanto da ZCAS quanto da Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS), a primeira atua especialmente numa faixa de latitudes entre 15 e 18°S, significando que sua presença no Sudeste do Brasil é especialmente relevante nesta faixa de latitudes, provocando maior concentração de chuvas. É importante mencionar ainda que os eventos de chuvas convectivas também têm grande importância nos aspectos relacionados à erosividade e que sua formação, nas condições do Estado do Espírito Santo, é altamente relevante, tendo em vista as elevadas temperaturas predominantes no Estado, bem como a influência adicional do oceano Atlântico como uma das fontes principais de umidade.

Ainda no que concerne à erosividade anual, para a região do Rio Doce no Estado de Minas Gerais, Mello et al. (2007) caracterizaram-na com valores entre 9.810 e 12.050 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ ano⁻¹, também trabalhando com geoestatística. Além disso, Silva et al. (2010), estudando especificamente a região do Rio Doce em Minas Gerais, obtiveram valores de erosividade anual, oriundos de análise de pluviogramas, variando de 8.000 a 16.000 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ ano⁻¹, assim como Oliveira et al. (2009), que obtiveram valores de até 13.000 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ ano⁻¹ para a mesma região. Todos estes estudos demonstram o elevado potencial erosivo das chuvas na região do Rio Doce, apesar de os totais anuais de precipitação serem inferiores aos de outras regiões do Estado do Espírito Santo.

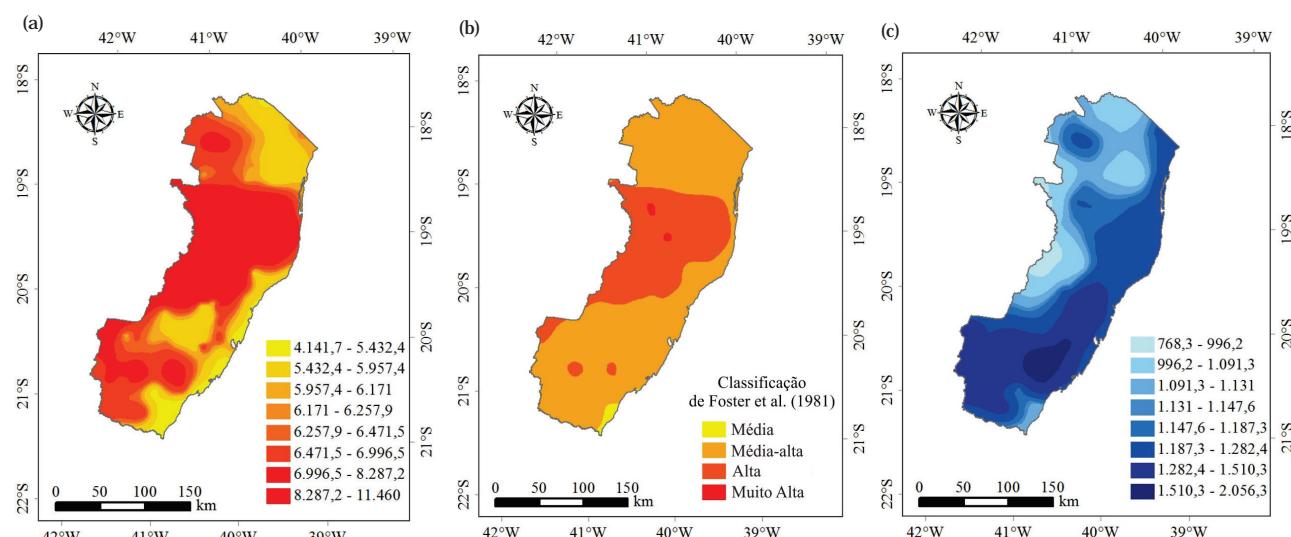


Figura 7. Mapas de erosividade anual (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹) (a), de erosividade anual conforme classificação de Foster et al. (1981) (b) e precipitação anual (mm) (c), para o Estado do Espírito Santo.

Em parte da região Itapemirim/Itabapoana, especificamente na divisa com o Estado do Rio de Janeiro, foram obtidos valores de erosividade anual inferiores aos do Rio Doce, apesar de os totais anuais de precipitação serem superiores, especialmente nas áreas de serra desta região e no seu litoral. Esses valores de erosividade variaram de 4.142 (na divisa com o Rio de Janeiro) a mais de 8.287,2 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ ano⁻¹ (nas áreas de serra), permitindo enquadrar a região como tendo moderado potencial erosivo pela classificação de Foster et al. (1981), em grande parte de sua área. Analisando a distribuição espacial da erosividade anual para o Estado do Rio de Janeiro, Montebeller et al. (2007) encontraram valores entre 2.000 e 6.000 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ ano⁻¹ para a região norte deste Estado, também trabalhando com abordagem geoestatística, porém com intensidade amostral inferior à do presente estudo. Portanto, os valores obtidos para o sul do Espírito Santo (exceção das regiões de serra) são compatíveis com os obtidos pelo trabalho de Montebeller et al. (2007), apesar de os referidos autores terem obtido por interpolação, em alguns pontos, valores inferiores.

Para as áreas de serra do Espírito Santo, encontradas nas regiões Itapemirim/Itabapoana e Atlântico Sudeste, foram observados valores oscilando de 4.141 a 8.287 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, permitindo um enquadramento de “moderado” potencial erosivo. No entanto, os totais anuais de precipitação variaram de 1.282 a 1.510 mm, indicando melhor distribuição dos eventos de chuva do que para a região do Rio Doce. Esse comportamento encontra subsídio teórico nos trabalhos de Meusburger et al. (2012), os quais analisaram a distribuição espacial da erosividade, usando geoestatística, para a Suíça; Nel et al. (2010), que estudaram o comportamento da EI₃₀ na região montanhosa da África do Sul; e Mello et al. (2012), que estudaram o comportamento da erosividade da chuva em regiões montanhosas do Estado de Minas Gerais. Em todos estes estudos foi verificada melhor distribuição temporal da precipitação causada pela influência da altitude, a qual promove a ocorrência de temperaturas mais amenas e, como consequência, menor pressão de saturação de vapor d’água, reduzindo o potencial para eventos convectivos mais intensos.

Os menores valores de erosividade anual, bem como de precipitação anual, foram observados para a região São Mateus (norte do Espírito Santo), os quais variaram de 4.142 a 6.258 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ ano⁻¹, e, para precipitação, foram registrados valores inferiores a 1.091 mm anuais, com exceção da sua faixa litorânea. Contudo, a região pode também ser enquadrada, em grande parte, como tendo moderado potencial erosivo. Para a região nordeste de Minas Gerais, que faz divisa com a referida região do Espírito Santo, Mello et al. (2007) verificaram baixos valores anuais de erosividade: inferiores a 5.000 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ ano⁻¹, os quais são similares aos obtidos no presente estudo. Esta região, conforme Carvalho et al. (2008),

trabalhando no âmbito do Zoneamento Ecológico-Econômico de Minas Gerais, apresenta totais anuais de precipitação inferiores a 1.000 mm, com elevada demanda evapotranspirativa, ou seja, uma região com clima tipicamente subúmido. No entanto, não se pode desconsiderar o fato de que a região pode ser afetada por eventos de precipitação com alto impacto no comportamento da erosão hídrica do solo, devido ao fato de que há uma tendência, semelhante à do Rio Doce, de concentração das chuvas em apenas alguns meses do ano - aspecto de suma importância para planejamento de ações visando à sustentabilidade ambiental.

A distribuição espacial da erosividade e da precipitação, ambas mensais, para o Estado do Espírito Santo está apresentada nas figuras 8, 9 e 10, para janeiro a abril, maio a agosto e setembro a dezembro, respectivamente. É possível notar, na figura 8 (a,b,c) e na figura 10 (c,d), que os maiores valores mensais de EI₃₀ foram obtidos para a região do Rio Doce, ou seja, especificamente nos meses mais chuvosos, a referida região apresenta os valores mais elevados. Essa situação é ainda mais nítida para dezembro (Figura 10d), janeiro e março (Figura 8a,c). Esse comportamento é explicado pela intensificação da ZCAS sobre o Sudeste do Brasil, especialmente nas latitudes que delimitam a região do Rio Doce, conforme comentado. No entanto, é importante destacar que neste período há concentração significativa de umidade, bem como temperaturas elevadas, além da proximidade com o litoral, o que significa condições atmosféricas apropriadas para a formação de eventos de chuva convectivos, os quais apresentam alto potencial erosivo devido à sua curta duração e alta intensidade. Os valores de EI₃₀ para os meses mencionados, na região do Rio Doce, variaram de 1.710 a 3.480 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ ano⁻¹, sendo dezembro o mês mais chuvoso e com maior erosividade. Situação semelhante, tanto em termos da distribuição espacial quanto de valores da erosividade, foi observada por Mello et al. (2007) na região leste de Minas Gerais, com destaque para os meses de dezembro, novembro e janeiro, nessa ordem.

Os mapas de precipitação mensal, durante o verão e início do outono (janeiro-maio), apresentaram predominância dos maiores totais mensais para a região Atlântico Sudeste, especialmente nas áreas de serra; à medida que o período de outono-inverno avança, a faixa litorânea passa a apresentar os maiores valores de precipitação e, como consequência, os maiores valores de erosividade. Esse fato deve-se à presença de umidade oriunda do oceano Atlântico, mas que, devido à intensificação do Anticiclone do Atlântico Sul na direção oeste (Reboita et al., 2010), fica restrita à faixa litorânea, fazendo com que no Estado do Espírito Santo haja um período seco mais característico na sua faixa oeste, englobando as regiões do Rio Doce e São Mateus, além das áreas de serra das regiões Itapemirim/Itabapoana e Atlântico Sudeste.

Tendo como base os mapas gerados para erosividade da chuva e precipitação, ambos em escala anual e

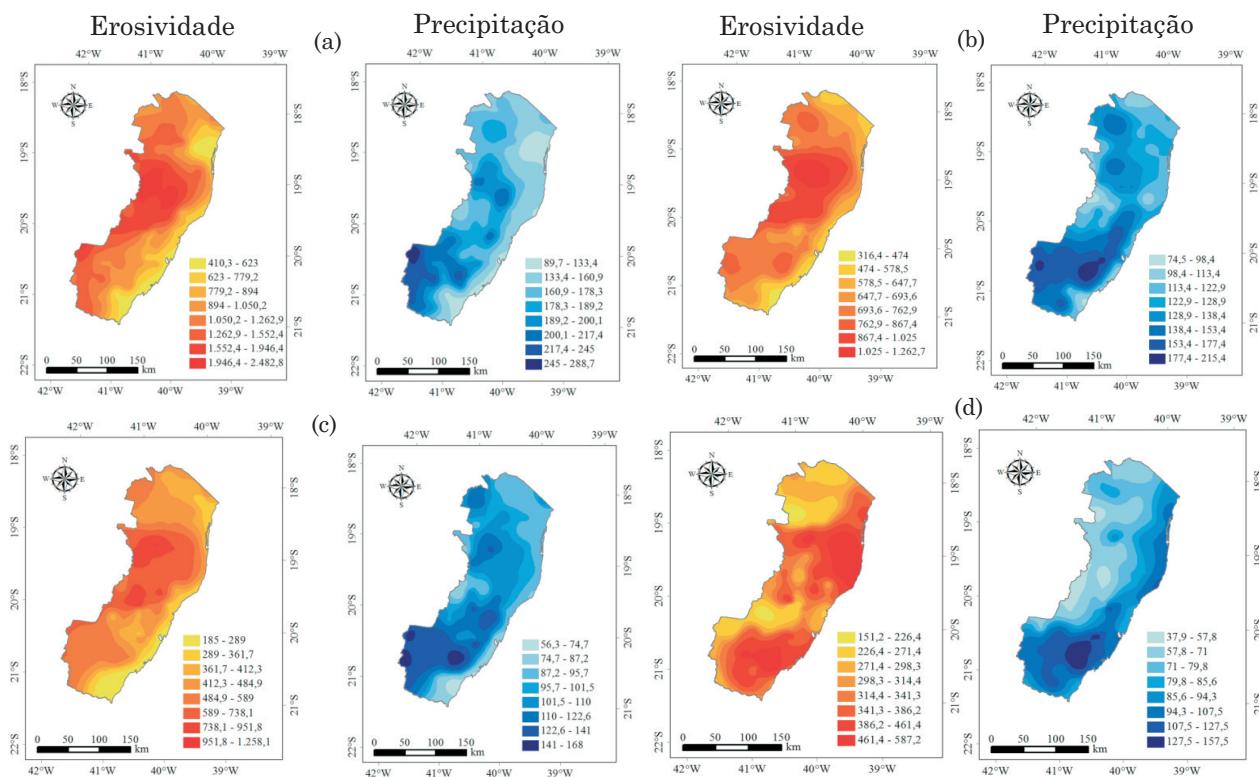


Figura 8. Mapas de erosividade ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{ano}^{-1}$), e precipitação (mm), ambos mensais, para o Estado do Espírito Santo (a) janeiro; (b) fevereiro; (c) março; (d) abril.

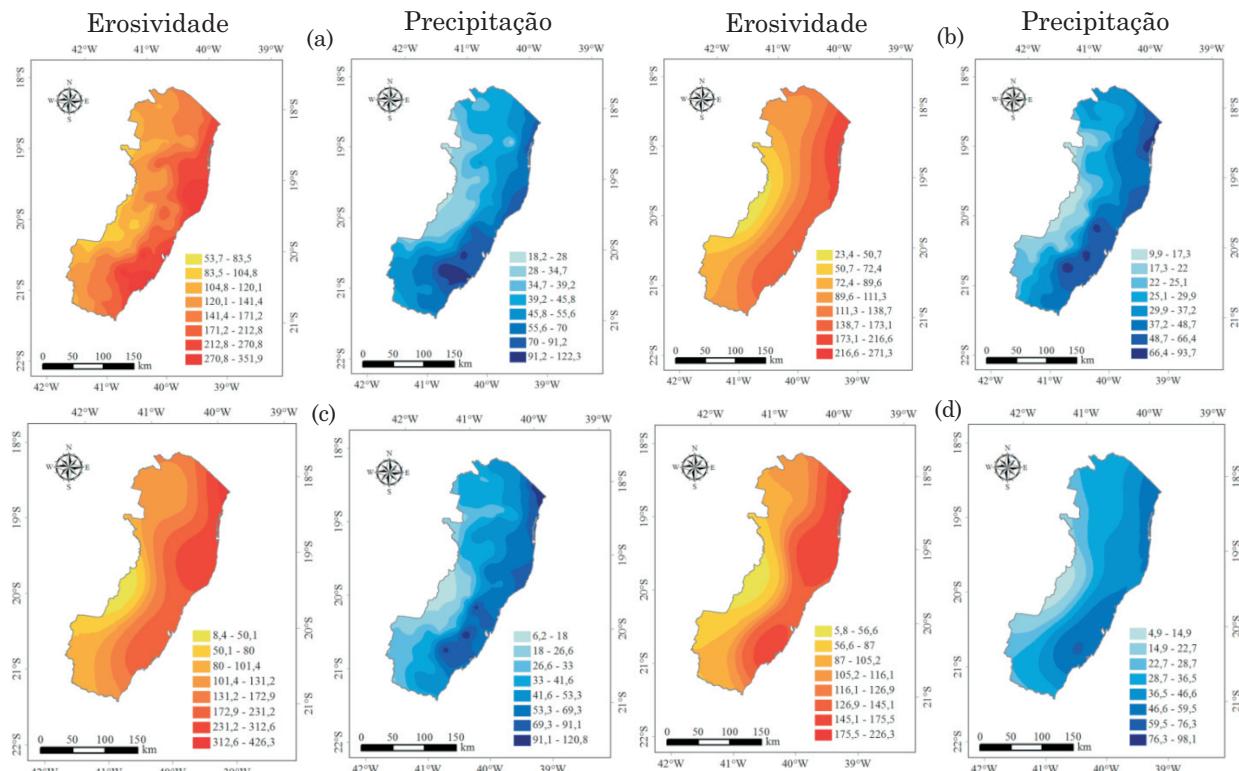


Figura 9. Mapas de erosividade ($\text{MJ ha}^{-1} \text{mm h}^{-1} \text{ano}^{-1}$) e precipitação (mm), ambos mensais, para o Estado do Espírito Santo (a) maio; (b) junho; (c) julho; (d) agosto.

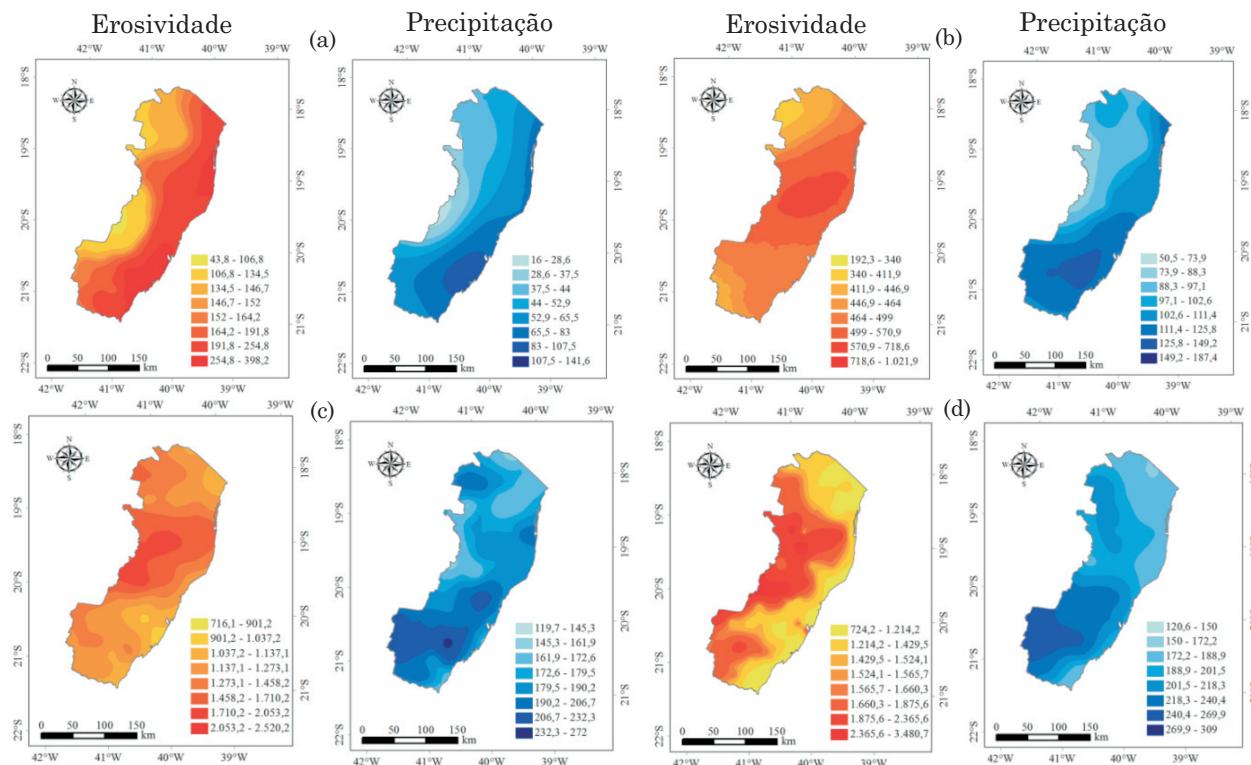


Figura 10. Mapas de erosividade ($MJ\ ha^{-1}\ mm\ h^{-1}\ ano^{-1}$) e precipitação (mm), ambos mensais, para o Estado do Espírito Santo (a) setembro; (b) outubro; (c) novembro; (d) dezembro).

mensal, o Estado do Espírito Santo é especialmente vulnerável na região do Rio Doce, a qual apresenta o mais alto potencial erosivo das chuvas. Nesse sentido, este trabalho identifica espacialmente áreas cujo regime pluvial é particularmente preocupante durante o verão, fornecendo subsídios para o planejamento, em macroescala, do uso e manejo sustentável do solo, bem como para implementação de ações de conservação do solo e da água com ênfase na condição de solos em relevo dissecado e pobres em nutrientes e que apresentam déficit hídrico pronunciado, dificultando o estabelecimento da vegetação e implicando maior vulnerabilidade natural à erosão hídrica. Esses solos são principalmente Latossolos Vermelho-Amarelos, profundos, bastante degradados (áreas desnudas de topo e voçorocas esparsamente distribuídas nas paisagens) e cobertos principalmente por pastagens (Feitoza et al., 2001; Atlas..., 2008).

CONCLUSÕES

1. O comportamento espacial da erosividade da chuva e da precipitação pluviométrica no Estado do Espírito Santo apresentou estrutura de continuidade espacial de moderada a forte, podendo ser caracterizada pelos modelos de semivariograma exponencial e gaussiano.

2. A região do Rio Doce apresentou o maior valor de erosividade anual, sendo possível enquadrá-la como tendo “forte” a “muito forte” potencial erosivo; esta região apresenta áreas com solos acidentados, pobres em nutrientes e com maior déficit hídrico, dificultando o estabelecimento da vegetação, merecendo maiores cuidados conservacionistas; as demais regiões apresentaram valores inferiores, com potencial erosivo enquadrado como “moderado”.

3. Apesar da maior erosividade, as regiões do Rio Doce e São Mateus apresentaram os menores valores anuais e mensais de precipitação; as áreas de serra e parte da região Atlântico Sudeste mostraram os maiores valores de precipitação, além de melhor distribuição desta no verão.

LITERATURA CITADA

- AKKALA, A.; DEVABHAKTUNI, V. & KUMAR, A. Interpolation techniques and associated software for environmental data. *Environ. Progress. Sust. Energy*, 29:134-141, 2010.
- ANGULO-MARTINEZ, M.; LÓPEZ-VICENTE, M.; VICENTE-SERRANO, S.M. & BEGUERÍA, S. Mapping rainfall erosivity at a regional scale: a comparison of interpolation methods in the Ebro Basin (NE Spain). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13:1907-1920, 2009.

- ATLAS DE ECOSISTEMAS DO ESPÍRITO SANTO. Vitória, Sema/Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2008. 504p.
- CARVALHO, L.G.; OLIVEIRA, M.S.; ALVES, M.C.; VIANELLO, R.L.; SEDIYAMA, G.C.; CASTRO NETO, P. & DANTAS, A.A.A. Clima. In: SCOLFORO, J.R.S.; CARVALHO, L.M.T. & OLIVEIRA, A.D., eds. Zoneamento Ecológico-Econômico de Minas Gerais: Componentes geofísico e biótico. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2008. p.89-102.
- CARVALHO, D.F.; MONTEBELLER, C.A.; FRANCO, E.M.; VALCARCEL, R. & BERTOLI, I. Padrões de precipitação e índices de erosividade para as chuvas de Seropédica e Nova Friburgo, RJ. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 9:7-14, 2005.
- CLARK, I. Practical geostatistics. London, Applied Science Publishers, 1979. 128p.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI. ArcGIS 9: Getting started with ArcGIS. Redlands, 2004. 265p.
- FOSTER, G.R.; MCCOOL, D.K.; RENARD, K.G. & MOLDENHAUER, W.C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *J. Soil Water Conserv.*, 36:355-359, 1981.
- GOOVAERTS, P. Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity. *Catena*, 34:227-242, 1999.
- FEITOZA, H.N.; MOLENAAR, M.; MEIJERE, T. & STUIVER, J. Spatial data modelling for GIS application. In: FEITOZA, L.R.; STOCKING, M.S. & RESENDE, M., eds. Natural resources information systems for rural development - approaches for Espírito Santo State, Brazil. Vitória, Incaper, 2001. p.147-173.
- ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geostatistics. New York, Oxford University Press, 1989. 560p.
- KODAMA, Y.M. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 70:813-835, 1992.
- LEE, S. Geostatistical model validation using orthonormal residuals. *KSCE J. Civil Eng.*, 1:59-66, 1997.
- LYON, S.W.; SORENSEN, R.; STENDAHL, J. & SEIBERT, J. Using landscape characteristics to define an adjusted distance metric for improving kriging interpolations. *Inter. J. Geogr. Inf. Sci.*, 24:723-740, 2010.
- MANNAERTS, C.M. & GABRIELS, D. Rainfall erosivity in Cape Verde. *Soil Tillage Res.*, 55:207-212, 2000.
- MELLO, C.R.; NORTON, L.D.; CURI, N. & YANAGI, S.N.M. Sea surface temperature (SST) and rainfall erosivity in the Upper Grande River Basin, Southeast Brazil. *Ci. Agrotec.*, 36:53-59, 2012.
- MELLO, C.R.; VIOLA, M.R.; MELLO, J.M. & SILVA, A.M. Continuidade espacial de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais. *Ci. Agrotec.*, 32:532-539, 2008.
- MELLO, C.R.; SÁ, M.A.C.; CURI, N.; MELLO, J.M. & VIOLA, M.R. Erosividade mensal e anual da chuva no Estado de Minas Gerais. *Pesq. Agropec. Bras.*, 42:537-545, 2007.
- MEUSBURGER, K.; STEEL, A.; PANAGOS, P.; MONTANARELLA, L. & ALEWELL, C. Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16:167-177, 2012.
- MONTEBELLER, C.A.; CEDDIA, M.B.; CARVALHO, D.F.; VIEIRA, S.R. & FRANCO, E.M. Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no Estado do Rio de Janeiro. *Eng. Agríc.*, 27:426-435, 2007.
- NEL, W.; REYNHARDT, D.A. & SUMNER, P.D. Effect of altitude on erosive characteristics of concurrent rainfall events in the northern KwaZulu-Natal Drakensberg. *Water SA*, 36:509-512, 2010.
- ODURO-AFRIYIE, K. Rainfall erosivity map for Ghana. *Geoderma*, 74:161-166, 1996.
- OLIVEIRA, F.P.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; SILVA, M.A. & MELLO, C.R. Potencial erosivo da chuva no Vale do Rio Doce, região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais - primeira aproximação. *Ci. Agrotec.*, 33:1569-1577, 2009.
- QI, H.; GANTZER, C.J.; JUNG, P.K. & LEE, B.L. Rainfall erosivity in the Republic of Korea. *J. Soil Water Conserv.*, 55:115-120, 2000.
- REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P. & AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *R. Bras. Meteorol.*, 25:185-204, 2010.
- RENARD, K.G. & FREIMUND, J.R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *J. Hydrol.*, 157:287-306, 1994.
- RIBEIRO JUNIOR, P.J. & DIGGLE, P.J. GeoR: A package for geostatistical analysis. *R. News*, 1:15-18, 2001.
- SALAKO, F.K. Development of isoerodent maps for Nigeria from daily rainfall amount. *Geoderma*, 156:372-378, 2010.
- SILVA, A.M. Rainfall erosivity map for Brazil. *Catena*, 57:251-259, 2004.
- SILVA, M.A.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; MARQUES, J.J.G.S.M.; MENEZES, M.D. & LEITE, F.P. Avaliação e espacialização da erosividade da chuva no Vale do Rio Doce, região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1029-1039, 2010.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, 2000. p.1-54.