
Landscape dynamics and spatial correlation of forest fragments by Kriging

Dinâmica da paisagem e correlação espacial de fragmentos florestais por meio de Krigagem

Received: 2023-01-11 | Accepted: 2023-02-12 | Published: 2023-03-05

Teresinha Esteves da Silveira Reis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6379-4790>
Universidade Estadual do Norte do Paraná, Brasil
E-mail: tsreis@uenp.edu.br

Luiz Carlos Reis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2193-8535>
Universidade Estadual do Norte do Paraná, Brasil
E-mail: lcreis@uenp.edu.br

Daniel Campanelli de Andrade

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1527-2493>
Icrop Tecnologia e Consultoria Agrícola
E-mail: daniel.campanelli@icrop.com.br

ABSTRACT

The study aimed the dynamics of forest fragments used data obtained by the processing of aerial photos of 1970 1:25,000 scale and satellite images RapidEye AG of 2012 processed in geographic information system 5.3 SPRING. The spatial analysis of events was performed by the Kernel Estimator and method of the nearest neighbor for the first and second order effects respectively. By using the ordinary Kriging settled the surface spatial correlation of the fragments in different eras. It found higher levels of intensities of fragments in the southwest in 1970, however, after four decades levels were lower, but the spatial dependence has not changed. It was found that the areas of very high class to high spatial correlation that was 96% of the surface of the municipality fell to 65%, while the areas of low to very low spatial correlation increased by 8 times in 4 decades period. The variance observed on Kriging made possible the delimitation of areas with high spatial dependence of the studied fragments, allowing the inference of areas for forest restoration aimed at the environmental regularization rural properties.

Keywords: Spatial analysis; Atlantic forest; Fragmentation; geoestatistic

RESUMO

Com o objetivo de estudar a dinâmica dos fragmentos florestais utilizou-se dados do processamento das fotografias aéreas pancromáticas de 1970 escala 1:25.000 e das imagens do satélite RapidEye AG de 2012, processadas no sistema de informação geográfica SPRING 5.3. A análise espacial de eventos foi realizada pelo estimador Kernel e método do vizinho mais próximo para os efeitos de primeira e segunda ordem respectivamente. Por meio da Krigagem ordinária estabeleceu-se a superfície de correlação espacial dos fragmentos nas diferentes épocas. Constatou-

se maiores níveis de intensidade de fragmentos no quadrante sudoeste em 1970, no entanto após quatro décadas, os níveis foram mais baixos, porém a dependência espacial não se alterou. Verificou-se que as áreas de classe muito alto a alta correlação espacial que era de 96% da superfície do município caiu para 65%, enquanto que as áreas de baixo a muito baixa correlação espacial aumentou em 8 vezes no período. A variância da Krigagem possibilitou a delimitação de superfícies com elevada dependência espacial dos fragmentos, permitindo a inferência de áreas para a recomposição florestal visando a regularização ambiental das propriedades rurais.

Palavras chave: Mata atlântica; Análise espacial; Fragmentação; Geoestatística.

INTRODUÇÃO

A análise do conceito de sustentabilidade ambiental reporta a três componentes fundamentais e indissociáveis: a dimensão ecológica, a dimensão econômica e dimensão social. Tais dimensões ou perfis definem e caracterizam os modos de uso e de ocupação do território, no espaço e no tempo, pelas comunidades envolvidas. São ferramentas precisas e de amplo uso em diferentes âmbitos e estratégias, como na hierarquização da performance de desenvolvimento de países, no manejo e planejamento ambiental de bacias hidrográficas e na avaliação da sustentabilidade do manejo das terras na escala de propriedades (VEIGA, 2010).

O processo de ocupação da maioria das terras foi fundamentado principalmente, em fatores econômicos, sociais e culturais, em detrimento de sua aptidão agrícola, que muitas vezes levaram a uma sobreutilização deste recurso e à fragmentação da cobertura vegetal. O avanço das fronteiras agrícolas, principalmente nas décadas de 1940 e 1950, no estado do Paraná, ocasionou uma rápida perda de cobertura florestal, resultando numa paisagem formada por fragmentos florestais relictuais (SOUZA & NASCIMENTO, 2007).

Maior número de fragmentos pequenos é um padrão verificado em vários estudos da paisagem, principalmente nos relacionados ao bioma mata atlântica (GOERL et al., 2011). Sparovek et al. (2011) relatam que 92% da vegetação natural remanescente do bioma Mata Atlântica encontra-se em propriedades privadas, por isso o Código Florestal (CF) é peça fundamental de equilíbrio entre produção agrícola e conservação ambiental.

Uma abordagem com Sistema de Informações Geográficas e geoprocessamento cumpre a função de instrumento de gestão ambiental, pois permite o direcionamento da localização das atividades econômicas e das áreas que necessitam de ações mitigadoras de conflitos de uso. É uma importante ferramenta de análise processos dinâmicos e alimentação de modelos matemáticos para o estudo da paisagem (CEMIN & DUCATI, 2015).

A análise de dados espaciais consiste em observar dados disponíveis no espaço e por

meio de métodos e modelagem, descrever e explicar o comportamento do processo espacial e suas relações com algum outro fenômeno espacial. Como em qualquer processo estocástico, a análise de pontos pode ser descrito em termos dos efeitos de primeira e segunda ordem. Os de primeira ordem, considerados globais ou de grande escala, correspondem a variações no valor médio do processo no espaço e os de segunda ordem, denominados locais ou de pequena escala, representam a dependência espacial no processo proveniente da estrutura de correlação espacial (CÂMARA & CARVALHO, 2006).

Um conceito chave nesta análise é a dependência espacial e sua formulação matemática através da correlação espacial. Uma abordagem geoestatística de dados ambientais pode reconstruir uma superfície com base na caracterização da similaridade espacial entre as amostras. A estrutura de geoestatística está fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas, que é uma variável distribuída no espaço (ou tempo) cujos valores são considerados como realizações de uma função aleatória. A variação espacial de uma variável regionalizada pode ser expressa pela soma de três componentes: a) uma componente estrutural associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; b) uma componente aleatória, espacialmente correlacionada; e c) erro residual (STURARO, 2015).

Este estudo teve por objetivo analisar a dinâmica da cobertura florestal de duas épocas e verificar o efeito sobre a superfície de correlação espacial entre os fragmentos.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no município de Bandeirantes, Estado do Paraná, Brasil, localizado no retângulo compreendido pelas coordenadas 50° 29' 44" a 50° 09' 43" W e 23° 17' 5" a 23° 00' 59" S. O clima pela classificação de Köppen é Cfa, precipitações médias anuais de 1.300 mm, média de 30 mm no mês mais seco e geadas menos frequentes.

Os fragmentos florestais de 1970 foram obtidos por meio de fotografias aéreas pancromáticas escala 1:25.000 e os fragmentos florestais de 2012 foram obtidos por meio das imagens do satélite RapidEye AG com resolução espacial de 5 metros. Ambos processados no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING/INPE), versão 5.3.

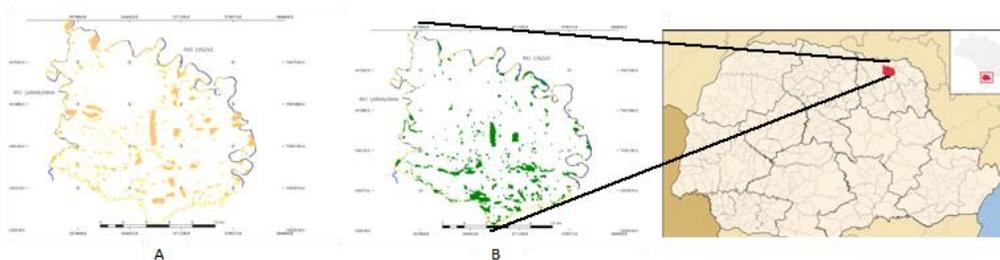
Para a análise espacial gerou-se pontos amostrais considerando os centroides dos polígonos referentes aos fragmentos florestais. Considerou-se os efeitos de primeira e segunda ordem, sendo que a análise de primeira ordem foi realizada pelo estimador Kernel que ajusta uma função bidimensional sobre os eventos considerados, compondo uma superfície cujo valor será proporcional à intensidade de amostras por unidade de área. Para análise de efeito de segunda ordem utilizou-se o método do vizinho mais próximo que considera a função de distribuição cumulativa baseado nas distâncias entre eventos em uma região de análise (CÂMARA & CARVALHO, 2006).

Posterior à análise espacial de eventos, procedeu-se a análise de continuidade espacial com base numa caracterização da similaridade espacial entre as amostras, por meio de variograma. Pode-se definir um variograma como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados pelo vetor distância \mathbf{h} , isto é, $2\lambda(\mathbf{h}) = E\{[Z(\mathbf{x})-Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})]^2\} = \text{Var}[Z(\mathbf{x})-Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})]$. Trata-se de uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço. A análise de variograma é um processo onde se busca detectar a máxima e a mínima continuidade (STURARO, 2015 ; NEVES et al, 2010). No entanto, a análise de dependência espacial é realizada sobre um semivariograma, que é uma representação gráfica das semivariâncias e as distâncias entre os pontos.

Os parâmetros de análise dos semivariogramas modelados são: a) alcance, que é a distância dentro da qual as amostras se mostram correlacionadas espacialmente; b) patamar, que é o valor do semivariograma correspondente ao seu patamar, ou seja, deste ponto em diante as amostras não possuem dependência espacial; c) efeito pepita que revela a descontinuidade das amostras nas distâncias menores que a menor distância entre as amostras; e d) variância espacial (contribuição): é a diferença entre o patamar e o efeito pepita.

A krigagem ordinária permite estimar um valor desconhecido por meio da combinação linear de n valores observados a um parâmetro sem a necessidade de conhecer a média geral, pois considera uma média do valor da variável na vizinhança para cada estimativa.

Figura 1 : Área de estudo referente ao município de Bandeirantes- PR e os fragmentos florestais existentes em 1970 (A) e os fragmentos existentes em 2012 (B).



Fonte: os autores

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se na análise exploratória dos dados, que em 1970 o número de fragmentos florestais era quase o dobro de 2012, sendo 636 e 347 respectivamente. Pelos coeficientes de curtose e de assimetria, a distribuição das amostras é leptocúrtica com grau de assimetria positiva (Tabela 1).

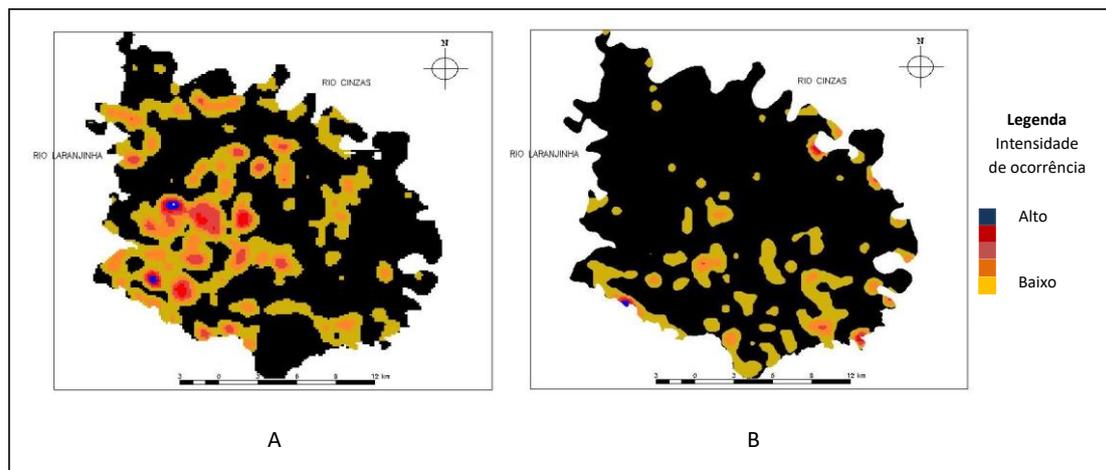
Tabela 1: Classes de correlação espacial (ha) dos fragmentos florestais em 1970 e 2012

Classes de correlação espacial	1970	2012
	Área - ha	
Muito alto	22.398,45	4.195,54
Moderado alto	16.133,58	13.107,98
Alto	3.881,92	11.524,31
Médio	448,81	6.720,86
Moderado baixo	338,46	3.378,37
Baixo	249,18	2.183,74
Muito baixo	452,8	2.792,40

Ao considerar os valores de área média e área mediana dos fragmentos constatou-se que em 1970 era de 6,64 ha e 1,18 ha respectivamente e em 2012 de 6,32 ha e 1,65 ha respectivamente. Ou seja, já em 1970 havia forte predomínio de pequenos fragmentos, ressaltando que o quartil superior é menor que o valor médio, ou seja 75% dos fragmentos florestais de ambas as épocas apresentaram área menor do que a média. Isto corrobora com CEMIN, G. & DUCATI, J.R (2015) que associa este fato à presença dominante de pequenas propriedades rurais, realidade constatada por Reis et al. (2008) em que 91 % do imóveis rurais da área do presente estudo são considerados minifúndio e pequena propriedade.

A análise de primeira ordem realizada pelo estimador Kernel demonstrou tendência de agrupamento dos fragmentos florestais observada a partir do fatiamento da intensidade da ocorrência dos centroides dos mesmos, sendo que quanto maior a proximidade maior a intensidade do evento. Para o fatiamento da intensidade dos centroides considerou-se 5 níveis, sendo os mais próximos representados pelos níveis mais altos (Figura 2).

Figura 2: Intensidade de ocorrência dos fragmentos em 1970 (A) e em 2012 (B) pelo estimador Kernel



Fonte: os autores

A intensidade de ocorrência dos fragmentos apresentou comportamento distinto nas épocas estudadas. Em 1970 (figura 2A) os níveis de maior intensidade de ocorrência dos fragmentos foram observados no quadrante sudoeste do município, no entanto, após quatro décadas esta região apresentou níveis menores (figura 2B).

Para a estimação de propriedades de segunda ordem do processo pontual, a técnica utilizada foi a do vizinho mais próximo. Neste método realizou-se a estimativa da função de distribuição cumulativa baseado nas distâncias h entre eventos em uma região de análise.

O comportamento da curva desta função, com crescimento rápido, caracterizando tendência de agrupamento ou “*clustering*” e demonstrou uma dependência espacial dos fragmentos à distância de aproximadamente 1.500 m para ambas as épocas. Esta informação é importante para o estabelecimento de políticas de manejo visando a melhoria do fluxo gênico.

Posterior à verificação da tendência de agrupamento na distribuição espacial dos fragmentos, passou-se a investigar a direção desta tendência, ou seja a continuidade espacial, por análise do semivariograma. A confecção dos semivariogramas e a análise de seus parâmetros é uma importante etapa, pois pelo modelo adotado tem-se a estrutura de correlação espacial a ser considerada nos procedimentos inferenciais da krigagem. Analisa-se o comportamento do semivariograma em várias direções, para detectar orientações de máxima e mínima continuidade do fenômeno em estudo, que por *default* são 0°, 45°, 90° e 135°. Quando nestas direções os semivariogramas apresentam comportamento semelhantes, significa que o fenômeno estudado possui distribuição espacial homogênea e é considerado isotrópico. No caso de existir uma direção de máxima e de mínima continuidade, o fenômeno é dito anisotrópico. A anisotropia deve ser considerada e modelada, a fim de retratar a verdadeira continuidade espacial do fenômeno (CAMARGO & FUKS, 2001).

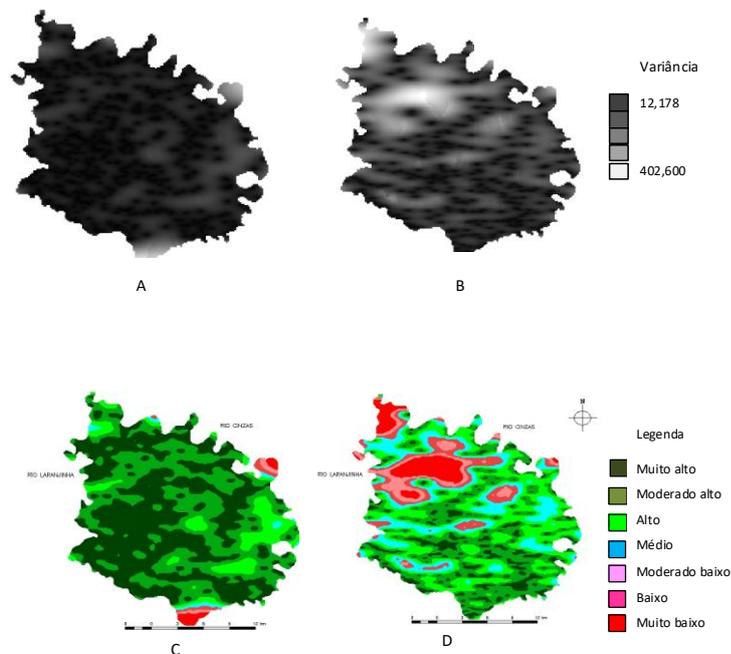
Nesta etapa verificou-se que os fragmentos em 1970 e 2012 estão distribuídos irregularmente e respectivamente, as direções de 135° e 45° apresentaram maior patamar e alcance e, desta forma, sobre estes semivariogramas realizou-se o ajuste de uma função, dando origem ao modelo ajustado pelo método dos mínimos quadrados. Este algoritmo fornece uma medida quantitativa, denominada informação de Akaike (AIC), que reporta para qual modelo o ajuste é mais preciso, ou seja, o de menor número de Akaike.

O modelo de melhor ajuste do semivariograma de 135°, correspondente a situação de 1970, foi o esférico cujos parâmetros adotados foram: número de Akaike (AIC) = -84,434, efeito pepita (C_0) = 7,251; variação espacial ou contribuição (C_1) = 296,78 e alcance (a) mínimo = 4.400,318. Já para a situação correspondente aos fragmentos de 2012, considerando a direção de 45°o modelo de melhor ajuste também o esférico, cujos parâmetros foram: número de Akaike (AIC) = -65,939, efeito pepita (C_0) = 8,831; variação espacial ou contribuição (C_1) = 371,602 e alcance (a) mínimo = 2.636,297.

O efeito pepita é um parâmetro que indica a variabilidade não explicada, que pode ser devido a imperfeições do processo de medida ou à variação estruturada em distâncias menores que o espaçamento adotado (STURARO, 2015). Pode ser expresso em porcentagem do patamar com o objetivo de facilitar a comparação do grau de dependência das variáveis estudadas. O Índice de dependência foi obtido por : $IDE = [CO / (CO + C) * 100]$, onde CO = Efeito pepita e CO + C = patamar. A escala adotada por Mello e Oliveira (2016) e Neves et al. (2010) considera dependência espacial forte, moderada e fraca quando o efeito pepita for $\leq 25\%$, de 25 a 75% e $\geq 75\%$ do patamar, respectivamente. Os modelos adotados para o ajuste indicaram forte dependência espacial dos dados.

Posterior ao ajuste procedeu-se a krigagem ordinária (figuras 3A e 3B), que se baseia na análise e na modelagem da variabilidade espacial do atributo, a partir de um conjunto amostral pontual desse atributo. Estima-se um valor em posição espacial não observada, segundo uma combinação linear dos valores de um subconjunto amostral local. Supõe, ainda, a hipótese de estacionariedade de segunda ordem para a propriedade que está sendo modelada, isto é, a média é constante em todas as posições do campo e a covariância só depende da distância entre as amostras (CÂMARA & CARVALHO, 2006; MELLO & OLIVEIRA, 2016).

Figura 3: Superfície interpolada pelo método da Krigagem ordinária (A e B) e o fatiamento da superfície de interpolação com as classes de variância (C e D). Em A e C a situação dos fragmentos florestais de 1970 e em B e D a situação dos fragmentos florestais de 2012.



Fonte: os autores

Na figura 3A e 3B observou-se a oscilação dos valores da variância nas épocas estudadas, que reflete a intensidade de ocorrência dos eventos obtidos pelo estimador Kernel retratada na Figura 1. Em geral, o semivariograma é a função de incremento com a distância h , visto que, quanto mais afastadas forem as amostras, mais seus valores em média deverão ser diferentes, refletindo a zona de influência de uma amostra. (STURARO, 2015).

Considerando que a semivariância de ambas as épocas situaram-se em intervalos semelhantes e que quanto menor seu valor maior a correlação espacial, procedeu-se ao fatiamento da mesma com intervalos similares de tal forma a obter sete classes de correlação espacial: muito alto, moderado alto, alto, médio, baixo, moderado baixo e muito baixo, conforme a Figura 3C e 3D.

Considerando as classes compreendidas por alto, moderado alto e muito alta correlação espacial observou-se expressiva alteração na distribuição destas classes no período (tabela 1). Em 1970 a superfície de correlação espacial destas classes representavam 96% do total do município, enquanto que em 2012 representaram 65,6%. Ao passo que, a classe de média correlação aumentou 15 vezes e as das classes moderado baixo, baixo e extremamente baixo aumentaram 8 vezes. Ao analisar a disposição das áreas consideradas muito alto, alta e moderada alta correlação espacial foi possível verificar que as mesmas em sua maioria, encontram-se nas propriedades médias e grandes do município.

Considerando que a Lei 12.651/2012 (Novo Código Florestal) insere o tamanho da propriedade rural como um elemento a ser considerado na recomposição florestal, tratando as pequenas propriedades de forma diferenciada, principalmente quanto à reposição da mata ciliar, a disposição das áreas de classe de maior correlação espacial é de suma importância para planejamentos futuros visando a recomposição florestal. Segundo Vidolin et al.(2011) os fragmentos dos ambientes nativos, mesmo que intensamente explorados e alterados, dada a sua continuidade florestal, podem ser considerados áreas de alto valor de conservação da biodiversidade.

O conhecimento ecológico sobre os fragmentos florestais de uma área permite aplicar a gestão ambiental correta quanto ao manejo florestal. Dessa forma, a avaliação da paisagem torna-se importante para diagnosticar os problemas atuais, estimar influências futuras e apontar as mudanças necessárias para manter o equilíbrio natural (CALEGARI et al. , 2010).

Sparovek et al.(2011) salientam que a tutela do meio ambiente não se restringe ao valor dos recursos naturais para os processos produtivos. A própria Constituição reconheceu que o equilíbrio ambiental é um elemento indispensável para a qualidade de vida sadia. Ela também ampliou os próprios beneficiários da defesa e da preservação ambiental, posto que incluiu expressamente as próximas gerações.

CONCLUSÕES

A intensidade de ocorrência dos fragmentos florestais difere nas épocas estudadas, evidenciando mudança na dinâmica da paisagem. Maior número de fragmentos e predomínio de fragmentos pequenos elevaram os níveis de intensidade deste evento em 1970. A maior evidência foi no quadrante sudoeste do município. O padrão de distribuição dos fragmentos florestais em ambas as épocas caracteriza agrupamento com dependência espacial de 1500 m.

A dependência espacial, bem como a direção da correlação espacial dos fragmentos sofreram alteração expressiva em 4 décadas. A Krigagem possibilitou a delimitação de área de dependência espacial dos fragmentos, permitindo a inferência de áreas para a recomposição florestal visando a regularização ambiental das propriedades rurais.

A análise da dinâmica espacial pode subsidiar políticas públicas e de manejo visando a melhoria do fluxo gênico com o estabelecimento de corredores, contribuindo de forma mais efetiva com o restabelecimento do equilíbrio da paisagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALEGARI, L. ; MARTINS, V. S.; GLERIANI, J. M.; SILVA, E. ; BUSATO, L.C. Análise da dinâmica de fragmentos florestais no município de Carandaí, MG, para fins de restauração florestal. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.34, n.5, p.871-880, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000500012>

CAMARGO, E. C. G & FUKS, S. D. (2001). *Geoestatística: fundamentos e aplicações*. In: CÂMARA, G. *Geoprocessamento: teoria e aplicações*. Disponível em: Acesso em: jul. de 2018

CÂMARA, G. & CARVALHO, M.S. *Análise espacial de dados geográficos*. São José dos Campos – SP: INPE, 2006.

CEMIN, G. & DUCATI, J.R., Modelos estocásticos aplicados à avaliação dinâmica da paisagem florestal de remanescentes de mata atlântica no município de Caxias do Sul-RS, *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.39, n.6, p.1019-1030, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000600004>

GOERL, R.F.; SIEFERT, C.A.C.; SHULTZ, G.B.; SANTOS, C.S.; SANTOS, I. Elaboração e Aplicação de índices de fragmentação e conectividade da paisagem para análise de bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.5, n.1, p.1000-1012, 2011. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v4i5.232678>

MELLO, Y. R.; OLIVEIRA, T. M. N. Análise Estatística e Geoestatística da Precipitação Média para o Município de Joinville (SC). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 2, 229-239, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631220150040>

NEVES, D. A.; LEMOS, F.; GONZALEZ, A. P.; VIEIRA, S. R.; SIQUEIRA, G. M.

Using geostatistics for assessing biodiversity of Forest Reserve areas . *Bragantia*, Campinas, V. 69, Suplemento, p. 131-140, 2010.

REIS, L.C.; REIS, T.E.S.; ABI SAAB, O.J.G. Caracterização da estrutura fundiária do município de Bandeirantes - PR, utilizando geoprocessamento. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 345-354, 2008.

SILVA, V.A.; MOREAU, M.S.; MOREAU A.M.S.S.; REGO, N.A. C. Uso da terra e perda de solo na Bacia Hidrográfica do Rio Colônia, Bahia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 310–315, 2011. DOI: 10.1590/S1415-43662011000300013

SOUZA, M., NASCIMENTO, C.A. Ocupações e Rendas das Famílias Rurais e Agrícolas no Estado do Paraná. *Revista Paranaense de Desenvolvimento*, Curitiba, n.112, p.73-91, jan/jun. 2007

SPAROVEK, G.; BARRETTO, A.; KLUG, I.; PAPP, L. LINO, J. A revisão do Código Florestal brasileiro. *Novos Estudos - CEBRAP*, (89), 111-135, 2011.

STURARO, J. R. Apostila de geoestatística básica. UNESP/campus de Rio Claro Departamento de Geologia Aplicada - IGCE , 2015.

VEIGA, J.E. Indicadores de sustentabilidade. *Estudos Avançados*, 24(68), 39-52. 2010.

VIDOLIN, G. P.; BIONDI, D.; WANDEMBRUCK, A. Análise da estrutura da paisagem de um remanescente de floresta com araucária, Paraná, Brasil. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.35, n.3, p.515-525, 2011