



Variabilidade do índice de área foliar em campos naturais e floresta de transição na região Sul do Amazonas

doi: 10.4136/ambi-agua.1490

Received: 23 Aug. 2014; Accepted: 19 Jan. 2015

Walleon Higor Corrêa Jordão^{1*}; Fabrício Berton Zanchi¹;
Domkarlykisom Mahamede Moraes Ferreira¹;
Caio Henrique Patrício Pagani¹; Flávio J. Luizão²;
Juliana Rocha Duarte Neves¹; Miqueias Lima Duarte¹

¹Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Humaitá, AM, Brasil
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente (IEAA)

²Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA), Manaus, AM, Brasil

*Autor correspondente: e-mail: walleonjordao@gmail.com,
faberzanchi@gmail.com, dom_moraes16@hotmail.com,
caiopagani@gmail.com, fluizao@inpa.gov.br, julianaengamb@outlook.com,
miqueias-lima-2014@hotmail.com

RESUMO

O Índice de Área Foliar (IAF) é determinante nos processos de trocas de massa e energia nos ecossistemas, sendo fundamental para o entendimento das mudanças no clima regional e na dinâmica do ecossistema. O objetivo deste trabalho foi analisar, por meio da geoestatística, a variabilidade e dependência espacial dos valores de índice de área foliar (IAF) em áreas naturais de campo 'baixo', campo 'alto' e floresta de transição no Sul do Amazonas. Os valores de IAF foram determinados numa malha regular com 33 pontos para cada área estudada, e a aquisição dos dados foi feita pelo analisador de dossel LAI-2000, que permite se calcular a estrutura da vegetação com base na radiação que penetra na copa das árvores. Os valores médios do IAF variaram de acordo com a área estudada, com maiores valores na floresta (4,42 m²m⁻²), seguida pelo campo alto (2,03 m²m⁻²) e campo baixo (1,72 m²m⁻²). Em todas as áreas os valores de IAF mostraram dependência espacial com o uso da krigagem entre as amostras e apresentam distribuição espacial diferenciada em cada área estudada: o grau de dependência espacial foi moderado na floresta de transição e fraco para os campos naturais, sendo que no campo alto a distância limite em que os pontos estão correlacionados é de 35,3 m. No mapa de krigagem foi possível observar manchas com valores altos e baixos distribuídos de forma diferenciada entre as áreas estudadas.

Palavras-chaves: amazônia, geoestatística, índice de área foliar, Krigagem.

Variability of the Leaf Area Index in natural fields and transition forest in Southern Amazonas State, Brazil

ABSTRACT

The Leaf Area Index (LAI) has strong influence on ecosystems' energy and mass exchange and is fundamental to the understanding of regional climate changes and ecosystem

dynamics. The main goal of this work was to establish, based on geostatistical analyses, the variability and spatial dependence of LAI in the natural fields and transitional forest in southern Amazonas State, in Brazil. The LAI was measured in a regular grid with 33 points at each studied area. Field measurements were done using the canopy analyser LAI-2000, which calculates the structure of the vegetation based on the radiation beneath the tree canopy. The average values of LAI varied according to the studied sites: the highest values were found in the transitional forest ($4.42 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$), followed by the high ($2.03 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$) and low ($1.72 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$) natural fields. All studied sites showed spatial dependence according to the *kriging* methods, but with different degrees of dependence: spatial dependence was moderate at the transition forest and weak at the natural fields. In the more arboreal open field, the maximum limit at which the points are correlated reached a distance of 35.3 m. The *kriging* maps proved to be very important tools for describing the spatial distribution of LAI in the Amazon.

Keywords: amazonia, geostatistics, kriging, leaf area index.

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Amazônica ocupa uma área de mais de 6,5 milhões de km^2 , dos quais aproximadamente 85% do total encontram-se em território brasileiro (IBGE, 1997; Soares Filho et al., 2006; Prance, 1979). A região é um grande mosaico de paisagens, formadas nos períodos geológicos Terciário e Quaternário e, nas últimas décadas mais de 13% desta região foi transformada em pastagens ou agricultura nos estados do Acre, Rondônia, Mato Grosso, Tocantins e Pará (IBGE, 1997; Soares-Filho et al., 2006).

Devido à sua enorme extensão territorial, a Amazônia apresenta diferentes características climáticas, meteorológicas e também diferentes características em seus ecossistemas (Bambi, 2007). A exemplo disto, IBGE, (1997), Luizão et al., (2007) e Zanchi et al., (2014), registram que aproximadamente 6% da Amazônia é formada por vegetação do tipo “savanna” (Cerrados, Campinas, Campinaranas e Campos ‘altos’ e ‘baixos’), nos estados de Roraima e no norte e sul do estado do Amazonas. Por outro lado, as florestas de *terra-firme* contendo também áreas de várzea, alagadiços e florestas de igapó, localizadas às margens dos rios da região, cobrem 70% da Amazônia (Prance, 1979).

Um dos importantes parâmetros da vegetação que caracteriza cada ecossistema é o índice de área foliar (IAF), que representa a interface ativa entre o ecossistema e a atmosfera (Amthor, 1994; Soares-Filho et al., 2006). Este índice foi definido por Watson (1947) como sendo a razão entre a área foliar do dossel e a unidade de superfície projetada no solo (m^2m^{-2}), sendo uma variável biofísica diretamente relacionada com a transpiração e a produtividade do ecossistema. Esta variável também é utilizada como parâmetro de entrada em modelos de transferência radiativa que visam descrever o complexo processo da transferência da radiação no interior de dosséis de plantas, bem como temperatura e umidade do solo (Jennings et al., 1999).

Por outro lado, alterações no IAF podem ser tanto naturais como antrópicas, sendo elas ocasionadas por doenças, pragas, tempestades, secas, práticas de manejo e a própria adaptação fenológica das plantas. Estas alterações modificam a produtividade e o povoamento do ecossistema, pois afetam diretamente os processos de fotossíntese, proteção do solo, interceptação da precipitação e evapotranspiração (Xavier et al., 2002; Bréda, 2003; Zanchi et al., 2009).

Mesmo aparecendo como áreas isoladas, algumas delas de origem edáfica (Gottsberger e Morawetz, 1986; Solbrig, 1996), esta cobertura vegetal possui um importante papel nas condições climáticas regionais, regulando os processos hidrológicos (como a interceptação da água da chuva, o escoamento pelos troncos e, principalmente, a evapotranspiração), bem como as trocas de massa e energia (Amthor, 1994). Desta forma, o estudo detalhado dessa

cobertura e o entendimento do funcionamento dos ecossistemas amazônicos tornam-se fundamentais para compreender as mudanças no clima regional (Zanchi et al., 2009). Igualmente, a definição de um melhor manejo requer estudos de ecossistemas ainda existentes, como os campos naturais, com vegetação aberta (“savannas”) e as florestas de transição no Sul do Amazonas, que, em diferentes graus, estão sendo afetadas pelas mudanças de uso da terra em curso na Amazônia.

Segundo dados da FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), as pastagens/campos tropicais tem crescente importância no gerenciamento dos recursos hídricos e também nos modelos locais de interação solo-planta-atmosfera com relação às mudanças climáticas (Correia, 2006) e relação da conversão de florestas em áreas de campos. Contudo, existem ainda poucas informações referentes à variação espacial ou mesmo de variações de longo prazo do IAF para identificação de padrões de pastagens (Zanchi et al., 2009) e áreas de ‘savanas’ amazônicas.

Normalmente as variações no IAF são afetadas pelas mudanças nas variáveis edafoclimáticas como a precipitação pluviométrica, a umidade do solo, o potencial de vapor d’água na atmosfera e o fotoperíodo (Bambi, 2007). Em períodos secos, as plantas podem responder ao estresse hídrico e limitações à transpiração pela diminuição da área de exposição (pela queda das folhas) (Zanchi et al., 2009), o que implica em mudanças temporais no IAF. Portanto, estimar e caracterizar uma área por meio deste parâmetro biológico (IAF) torna-se uma tarefa muito difícil, pois o IAF apresenta grande variabilidade temporal e espacial. Para minimizar estes problemas é necessário estabelecer o seu padrão local e variações específicas nas áreas de estudo, uma vez que, mesmo quando os ecossistemas são caracterizados por fisionomias florestais ou arbóreas com substrato gramíneo, o IAF não é uniforme em toda área e varia durante o ano. De acordo com Braun e Andrade, (1959), estas áreas são de formações edáficas e neste caso a análise da estatística clássica, que considera a independência entre as amostras baseada na média, vem sendo substituída por análises geoestatísticas fundamentadas na teoria das variáveis regionalizadas (Isaaks e Srivastava, 1989), que utilizam o semivariograma, produzindo a descrição da dependência espacial entre as amostras (Webster e Olivier, 1990).

O objetivo deste trabalho foi caracterizar os valores do IAF e sua variabilidade espacial utilizando a técnica de geoestatística em áreas naturais de campo ‘baixo’, campo ‘alto’ e floresta de transição no Sul da Amazônia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado no sítio experimental relacionado à rede de torres do Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia – LBA, situado na reserva do Ministério da Defesa, pertencente ao 54º BIS (Batalhão de Infantaria de Selva) de Humaitá, estado do Amazonas (Figura 1). As coordenadas geográficas das áreas de estudo em Floresta de Transição, Campo Alto e Campo Baixo são 7°32'2.16"S e 63°14'37.65"W, 90.8 m a.n.m. (acima do nível do mar), 07°34'52.93"S 63°08'43.84"W, 82.9 m a.n.m. e 07°33'49.72"S e 63°06'05.58"W, 82.2 m a.n.m., respectivamente.

Estas áreas caracterizam-se de forma genérica pela presença de dois ambientes distintos: as várzeas, que margeiam os rios de “águas barrentas”, ricas em material suspenso e sujeitas à inundações sazonais; e as áreas de “terra firme”, que não sofrem inundação e são formadas a partir de sedimentos terciários. Porém nestas áreas ocorrem variações florísticas distintas, sendo de florestas e campos naturais, cuja floresta possui solos bem drenados e barreiras plânticas mais profundas, já os campos naturais são compostos por gramíneo lenhoso e a barreira plântica mais próxima à superfície (Martins et al., 2006). Segundo a EMBRAPA,

(1999) os solos desta região são classificados como Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico típico (PVAa) na floresta e nas áreas de campos nativos como o Plintossolo Argilúvico Alumínico típico (FTa).

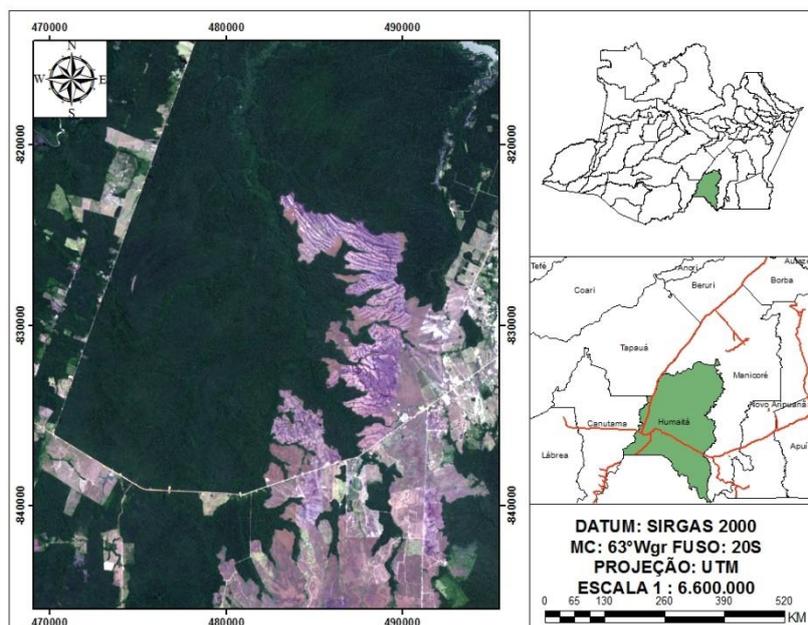


Figura 1. Localização da área selecionada para o estudo.

De acordo com o parataxonomista José Ramos do INPA, que identificou as amostras, os campos naturais (alto e baixo) amazônicos, possuem um predomínio herbáceo de Cyperaceae (Solbrig, 1996), que nos meses de outubro a dezembro, logo após a floração destas gramíneas, há uma mortandade e troca de folhas, pois boas partes das plantas ficam amarelas ou morrem e outras brotam sequencialmente como mecanismos fenológicos de adaptação (Araújo e Longhi-Wagner, 1996).

O clima da região é caracterizado como do tipo Am, segundo Köppen, com precipitação anual variando de 2.250 a 2.750 mm e uma estação seca de pequena duração (mês de julho). A temperatura média anual varia de 24°C a 26°C; a umidade relativa do ar varia de 85 a 90% e a altitude média é de 90 metros acima do nível do mar (Martins et al., 2006).

2.2. Métodos

De acordo com Xavier et al., (2002), a arquitetura do dossel florestal é caracterizado pela posição, orientação, tamanho e forma de seus elementos constituintes (como folhas, galhos, troncos, flores e frutos). As descrições quantitativas dessas características geométricas das copas são complexas devido à grande variabilidade espacial (horizontal e vertical) e temporal (sazonalmente e pela idade) (Weiss et al., 2003).

O índice de área foliar (IAF) pode ser medido por métodos indiretos (não destrutivos) ou por métodos diretos, conhecidos por serem predominantemente destrutivos. Os métodos diretos consistem na obtenção das medidas da área das folhas e da relação entre área e massa foliar. Os métodos indiretos caracterizam o IAF pela medida de radiação total que penetra no interior da cobertura vegetal e incluem a fotografia hemisférica, o equipamento LAI-2000 e os produtos orbitais (Daughtry, 1990).

Por outro lado existem vários métodos e formas estatísticas de tratamentos de coleta de dados. De acordo com Korhonen et al., (2006) o método do tubo de *Cajanus* foi o método mais preciso, porém com um arranjo estatístico e campo de visão adequado nas medidas, outros métodos podem também ter precisão e acurácia.

Neste estudo, o IAF foi medido em área de floresta, campo alto e campo baixo pelo método indireto, utilizando o analisador de dossel vegetal Li-Cor LAI-2000 (PCA, Li-Cor, Lincoln, NE, USA). Este equipamento (LAI-2000) calcula a estrutura do dossel da vegetação com base nas medidas de radiação difusa que penetram nas copas e que é captada pelo analisador, que possui um sensor de luz do tipo “Olho-de-Peixe”, com um campo de visão de 148°. As medidas consistem em determinar a interceptação de luz em cinco distintas bandas angulares (0-13°, 16-28°, 32-43°, 47-58° e 61-74°) com o zênite no centro; o IAF é calculado a partir da diferença de luz medida acima e abaixo do dossel (Chason et al., 1991). O LAI-2000 tem sido o instrumento mais empregado, por não necessitar de processamento e aquisição de dados adicionais, e ainda ser capaz de fornecer o IAF imediatamente (Cutini et al., 1998). O uso desse equipamento para medir o IAF ocorreu nas primeiras horas do dia ou no fim do dia para minimizar o efeito da radiação direta no equipamento, que poderia gerar uma subestimativa nos valores (Korhonen et al., 2006).

Korhonen et al. (2006) e Montenegro e Montenegro (2006) destacaram a importância dos planos de amostragem e testes adequados para estudos de variabilidade espacial em função de malhas regulares, de transectos e de conjuntos de pontos aleatoriamente distribuídos. Neste estudo o delineamento amostral segue o método RAPELD (inventários rápidos - RAP e Projetos Ecológicos de Longa-Duração - PELD (Magnusson et al., 2005), que subdivide uma área de 1 x 5 km em parcelas de medidas a cada 250 m, levando em consideração a topografia do local. Dentro destas parcelas RAPELD, as medidas do IAF foram feitas em abril de 2013, em uma malha construída e georreferenciada, com os pontos de cruzamento estabelecidos em linhas de 50 metros de comprimento e equidistantes 25 metros entre elas, com intervalos regulares de 5 metros entre os pontos de coleta. Formando uma malha com espaçamento regular e dimensão de 50 x 50 m, totalizando 33 pontos para cada área de estudo.

Após a coleta dos dados (IAF), os mesmos foram submetidos à análise da estatística descritiva e geoestatística empregando a técnica de “krigagem” descrita por Krige (1951), que usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no modelo do semivariograma ajustado, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima (Vieira, 2000). Estes procedimentos englobam análise exploratória, geração e modelagem de semivariograma, validação do modelo e interpolação por krigagem. A interpolação de superfícies foi gerada a partir de amostras georreferenciadas para cada ponto de medida do IAF.

Os semivariogramas foram modelados e ajustados no software GS+ (Gamma Design Software, 2004) que caracterizou os parâmetros do semivariograma e a dependência espacial entre as amostras. Utilizamos como base para a análise do grau de dependência espacial a classificação estabelecida por Cambardella et al. (1994), que considera como dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar, moderado entre 25% e 75%, e fraco quando for maior que 75%. Na escolha do modelo para cada semivariograma, levou-se em consideração o maior valor encontrado para o coeficiente de regressão (R^2), obtido pelo método de validação dos modelos. Segundo Gomes (1990), a análise do coeficiente de variação (CV) segue também uma classificação, sendo ela: baixo ($CV < 10\%$); médio ($10\% < CV < 20\%$); alto ($20\% < CV < 30\%$) e muito alto ($CV > 30\%$).

Posteriormente, os modelos ajustados com base no semivariograma foram utilizados para interpolação por krigagem. Utilizou-se o software Surfer versão 8.0 (Golden Software Inc., 1999) para elaboração de mapas de isolinhas que descrevem a distribuição espacial do IAF.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva aplicada mostra que, conforme esperado, o valor médio do índice de área foliar (IAF) foi mais alto na floresta de transição ($4,42 \pm 0,74 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$), seguido do campo 'alto' ($2,03 \pm 0,64 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$) e do campo 'baixo' ($1,72 \pm 0,48 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$) (Tabela 1). O IAF encontrado para floresta de transição foi próximo ao valor médio de IAF ($4,6 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$) verificado por Graça (2004) em uma floresta de transição, localizada no centro-norte do estado de Mato Grosso. Carreire (2009), ao investigar o IAF em floresta secundária com 5 anos, cortada em 1998 e queimada em 1999 na região de Alta Floresta - MT, encontrou valores médios de IAF de $4,2 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$, evidenciando a influência das queimadas na recomposição vegetal do ecossistema. Valores maiores ($5,7 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$) foram encontrados por McWilliam et al. (1993), em floresta de terra firme na Amazônia Central, caracterizada como floresta densa primária.

Os valores médios encontrados para as áreas de campos naturais ($1,72$ a $2,03 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$) foram inferiores aos valores de IAF encontrados em uma pastagem no Estado de Rondônia. Em um estudo realizado na Fazenda Nossa Senhora (FNS) e em Rolim de Moura (RDM), ambos no estado de Rondônia, entre fevereiro de 1999 e janeiro de 2005, com medidas mensais do IAF de pastagem, Zanchi et al. (2009) encontraram valores médios na ordem de $2,5 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$. Porém, a média anual determinada por Zanchi et al. (2009) variou entre $1,4 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ em 2000 e $2,8 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ em 2003, o que pode indicar um possível efeito das condições hidrológicas do solo, especialmente da altura do lençol freático, nos valores relativamente baixos do presente estudo. Giambelluca et al. (2009) também notou uma grande diminuição do IAF no período seco para áreas de cerrados e cerrados densos no Brasil central.

Este parâmetro se torna importante devido à sua relação direta com a troca de energia e massa que o ecossistema realiza com a atmosfera (Giambelluca et al., 2009; Zanchi et al., 2009). Segundo Giambelluca et al. (2009), um menor IAF reduz também a evapotranspiração e o fluxo de calor latente bem como, a partição de energia de um ecossistema.

Segundo Gomes (1990), a variabilidade de uma propriedade estudada do solo ou da vegetação e a precisão do experimento pode ser avaliada pelo coeficiente de variação (CV). Os maiores valores do CV foram encontrados nas áreas de campo alto (31%) e campo baixo (28%), classificados como muito alto e alto, respectivamente. Provavelmente houve maior variabilidade devido à característica da vegetação dos locais, com poucas ou muito raras árvores presentes. De acordo com Gomes e Garcia, (2002), os valores elevados do CV podem ser considerados como os primeiros indicadores da existência de heterogeneidade nos dados. Nestes ecossistemas estudados, certa heterogeneidade nos valores do IAF provavelmente é também imposta pela natureza dos fatores ambientais responsáveis pela composição florística do dossel, principalmente relacionados com o suprimento de água e fertilidade do solo (Giambelluca et al., 2009). O CV na floresta de transição (17%) foi classificado como médio e esta relativa homogeneidade nos dados refletiria uma estrutura vegetal mais definida. Segundo Gomes e Garcia (2002) CV menor que 10% indicaria maior homogeneidade nos dados.

A partir da análise dos valores mínimos, máximos e da média de um atributo é possível perceber se existe uma grande variação nos dados. Porém, somente o conhecimento dessa amplitude não é suficiente para identificar os locais onde se encontram os altos teores e os locais onde se encontram os teores mais baixos de uma determinada variável (Ferraz et al., 2012). Os valores de mínimos e máximos são mais elevados na floresta de transição e menores no campo baixo, demonstrando que os valores do IAF no campo baixo são mais próximos da média.

Tabela 1. Estatística descritiva para o índice de área foliar nos campos 'baixo', 'alto' e floresta de transição na região de Humaitá, Sul do Amazonas.

Área	\bar{x}	S	CV (%)	Mínimo	Máximo
Campo Baixo	1,72	0,48	27,90	1,80	2,86
Campo Alto	2,03	0,64	31,33	1,27	3,95
Floresta	4,42	0,74	16,77	3,04	5,88

CV (%) = Coeficiente de Variação.

A utilização da técnica geoestatística para a análise da estrutura espacial dos dados e a verificação da ocorrência de dependência espacial entre as amostras foi feita pelo método do semivariograma experimental. Estes semivariogramas (Figura 2) foram ajustados no modelo esférico, para fornecer os parâmetros do semivariograma com seus respectivos valores (Tabela 2). Este modelo foi o que apresentou o melhor ajuste à estrutura da distribuição dos valores de IAF.

Webster e Oliver (1990) reporta que o modelo esférico é o mais frequentemente utilizado na geoestatística. Para esse modelo de semivariograma o efeito pepita (C_0) apresentou valores baixos em todas as áreas ($C_0 = 0,06$ para campo baixo e campo alto e $C_0 = 0,13$ para floresta), ele é um importante parâmetro do semivariograma, frequentemente causados por erros de medição ou variações que não podem ser detectadas pela amostragem.

Vieira et al. (1997) ressaltam que quanto menor for o efeito pepita, maior será a semelhança entre os valores vizinhos e a continuidade do fenômeno, e menor será a variância na estimativa pela krigagem. Portanto, o efeito pepita tem influência direta na determinação do grau de dependência espacial (Lima et al., 2006). Assim, a variável apresentará forte dependência espacial quando o efeito pepita for menor ou igual a 25% do valor do patamar.

Os valores do patamar ($C_0 + C$) e aproximadamente igual à variância dos dados, apresentaram uma pequena diferença entre campo alto e baixo, ambos com valores baixos, e o maior valor encontrado na floresta de transição (Tabela 2).

A análise geoestatística considera a dependência espacial entre as amostras e as suas posições na área de estudo (Vieira, 2000). Todas as áreas do presente estudo apresentaram dependência espacial nos valores de IAF. Pela classificação de Cambardella et al. (1994), o IAF do campo alto indicou um grau de dependência espacial fraco (77%), diferenciando-se do campo baixo e da floresta de transição que apresentaram moderada dependência espacial de 66% e 75% nos pontos amostrados, respectivamente. De acordo com Braun e Andrade (1959), estas composições gramíneo lenhosas são decorrentes de formação edáfica, ou seja, os solos tem uma barreira plúntica muito próxima a superfície e esta barreira vai se aprofundando em direção as áreas de florestas. Assim as formações dos tipos florísticos dependem muito do local onde as mesmas estão se desenvolvendo e assim pode gerar esta fraca ou forte dependência espacial nas amostragens.

Mesmo porque o alcance (A_0) da dependência espacial indica a distância (m) limite em que os pontos estão correlacionados ente si. O alcance é uma medida importante no planejamento e na avaliação experimental, já que pode auxiliar na definição do melhor procedimento de amostragem (McBratney e Webster, 1983). Os pontos localizados em uma área cujo raio seja o alcance, são mais semelhantes entre si do que os separados por distâncias maiores (Lima et al., 2006). No estudo atual, em nenhuma das áreas o valor de alcance da dependência espacial ultrapassa os limites da área estabelecida para a coleta dos dados: o IAF no campo alto apresentou maior valor 30,5 m, seguido pelo campo baixo (22,9 m) e floresta de transição (11,3 m).

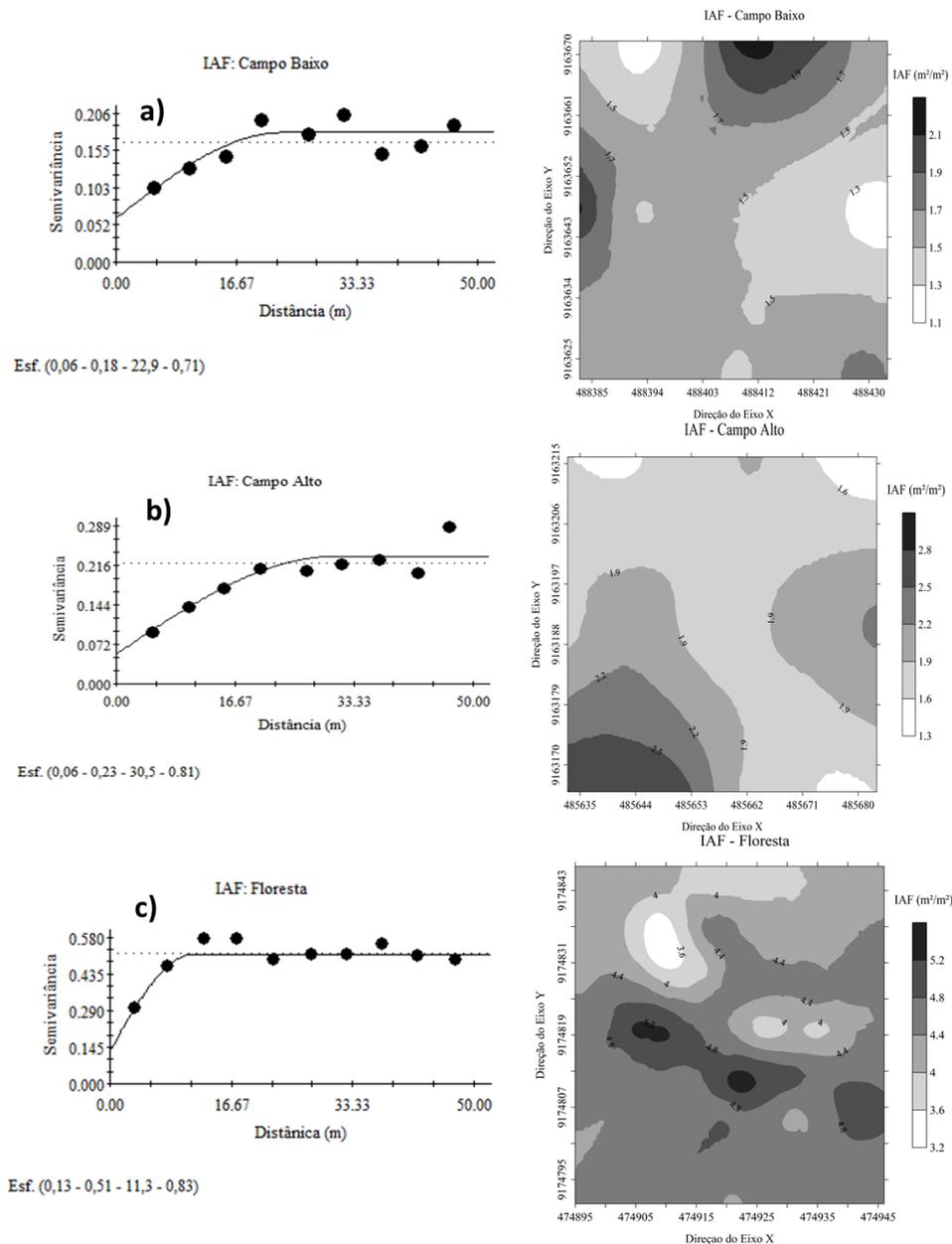


Figura 2. Semivariogramas experimental e mapas de krigagem do índice de área foliar (IAF) para: **a)** campo baixo; **b)** campo alto e **c):** floresta de transição. Sendo, a sub legenda interna (canto esquerdo inferior) dos gráficos “Esf (C_0 ; $C + C_0$; a ; R^2)” como, Esf = modelo esférico; C_0 = efeito pepita; $C + C_0$ = patamar; a = alcance; R^2 = coeficiente de regressão.

Tabela 2. Parâmetros dos semivariogramas para análise espacial do IAF em campos naturais e floresta de transição na região de Humaitá, sul do estado do Amazonas.

Área	Modelo	C_0	$C_0 + C$	A_0	$C_0/(C_0+C)$ %	R^2
Campo Baixo	Esférico	0,06	0,17	22,9	66	0,71
Campo Alto	Esférico	0,06	0,22	30,5	77	0,81
Floresta	Esférico	0,13	0,51	11,3	75	0,83

C_0 : Efeito Pepita; $C_0 + C$: Patamar; A_0 : Alcance; $C_0/(C_0+C)$ %: Grau de Dependência Espacial.

Os parâmetros dos semivariogramas foram utilizados para estimar valores em locais não amostrados por meio da interpolação por krigagem para observar a distribuição espacial do

IAF na área estudada. Os mapas obtidos pela interpolação por krigagem (Figura 2) caracterizam a distribuição espacial dos valores de índice de área foliar para cada área estudada, permitindo identificar regiões onde se encontram os pontos de menores e maiores valores do IAF e, portanto, entender a distribuição espacial desses valores na área de floresta de transição e nos campos 'alto' e 'baixo'.

A floresta de transição apresentou uma estrutura espacial do IAF definida, pouco heterogênea, com ocorrência dos maiores valores do IAF no canto inferior direito do mapa. No centro do mapa são definidas pequenas manchas com valores altos e baixos do IAF; regiões com valores baixos identificados no mapa são decorrente de pequenas clareiras existentes no dossel vegetal. No campo alto a estrutura espacial foi mais definida, porém heterogênea, com valores de IAF mais altos na parte superior do mapa e pequenas manchas com valores baixos nas extremidades do mapa. O mapa do campo baixo apresenta uma estrutura espacial com pequenas manchas de valores altos e baixos do IAF, distribuídos de forma homogênea na área (Figura 2).

Para o campo baixo e floresta observa-se maior a incidência de manchas, indicativas de maior variabilidade dos dados; porém, a variabilidade entre os dados foram muito menores do que aquela apresentada no campo alto. Assim, o padrão local deve ser qualificado em cada ecossistema estudado.

4. CONCLUSÃO

A distribuição espacial dos valores de IAF na malha amostrada, representada nos mapas de isolinhas mostra que o campo baixo teve uma distribuição espacial com várias manchas de valores altos e baixos distribuídos na malha, enquanto que o campo alto teve uma distribuição com os valores altos concentrados na parte superior do mapa e valores baixos na parte inferior, já a floresta apresentou uma estrutura espacial mais definida, com os valores do IAF distribuídos de forma homogênea na malha amostrada.

Por outro lado, os semivariogramas permitiram também caracterizar a variabilidade espacial dos valores de IAF nas áreas amostradas, mostrando a importância da variabilidade e similaridade de cada ecossistema.

A geoestatística foi uma ferramenta eficaz para a compreensão da estrutura da variabilidade espacial do IAF, o que facilita a caracterização de padrões para cada ecossistema estudado.

5. AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM/IEAA) e a Fundação de Amparo à Pesquisa no Amazonas (FAPEAM) pelo apoio e fomento da pesquisa, respectivamente. Ao INPA e LBA pela disponibilidade dos equipamentos, dos sítios experimentais para pesquisa e financiamento.

6. REFERÊNCIAS

AMTHOR, J. S. Scaling CO₂-photosynthesis relationships from the leaf to the canopy. *Photosynthesis*, v. 39, p. 321-350, 1994. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00014590>

- ARAUJO, A. C.; LONGHI-WAGNER, H. M. Levantamento taxonômico de *Cyperus* L. 1. subg. *Anosporum* (Nees) Clarke (Cyperaceae-Cypereae) no Rio Grande do Sul, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, Feira de Santana, v. 10, n. 1, 1996. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-33061996000100012>
- BAMBI, P. **Variação sazonal do índice da área foliar e sua contribuição na composição da serapilheira e ciclagem de nutrientes na floresta de transição no norte do Mato Grosso**. 2007. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2007.
- BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 54, n. 392, p. 2043-2417, 2003. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erg263>
- BRAUN, E. H. G.; ANDRADE, R. J. R. Estudo agrogeológico dos campos Puciari-Humaitá - Estado do Amazonas e Território Federal de Rondônia. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 21, p. 3-57, 1959.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- CARREIRE, M. B. F. **Estimativas de biomassa, do índice de área foliar e aplicação do sensoriamento remoto no monitoramento no estudo da cobertura vegetal em áreas de florestas ombrófila aberta e densa na Amazônia**. 2009. Tese (Doutorado) - INPA/UFAM, Manaus, 2009.
- CORREIA, F. W. S. Impacto das modificações da cobertura vegetal no balanço de água na Amazônia: um estudo com modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3a, p. 154, 2006.
- CUTINI, A.; MATTEUCCI, G.; MUGNOZZA, G. S. Estimation of leaf area index with the Li-Cor 2000 in deciduous forests. **Forest Ecology and Management**, Arezzo, v. 105, p. 55-65. 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00269-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00269-7)
- CHASON, J. W.; BALDOCCHI, D. D.; HUSTON, M. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 107, p. 107-128. 1991. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90081-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(91)90081-Z)
- DAUGHTRY, C. S. T. Direct measurement of canopy structure. In: GOEL, N. S.; NORMAN, J. M. (Eds.) **Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions**. London: Harwood, 1990. cap. 5, p. 45-60.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p. (EMBRAPA SOLOS/ SPI).
- FERRAZ, G. E. S.; SILVA, F. M.; CARVALHO, L. C. C.; ALVES, M. C.; FRANCO, B. C. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 140-150, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000100015>

- GAMMA DESIGN SOFTWARE. **Geoestatistic for the envorinmental sciences (version 7.0 for windows)**. Michigan, 2004. 1 CD.
- GIAMBELLUCA, T. W.; SCHOLZ, F. G.; BUCCI, S. J.; MEINZER, F. C.; GOLDSTEIN, G.; HOFFMANN, W. A. et al. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1365–1376, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.03.006>
- GOLDEN SOFTWARE INC. **SURFER for Windows: release 7.0: contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers, user's guide**. New York, 1999. 619p.
- GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 12.ed. Piracicaba: Nobel, 1990. 467p.
- GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FAEALQ, 2002. 305p.
- GOTTSBERGER, G.; MORAWETZ, W. Floristic, structural and phytogeographical analysis of the savannas of Humaitá (Amazonas). **Flora**, v. 178, p. 41-71, 1986.
- GRAÇA, P. M. L. A. **Monitoramento e caracterização de áreas sub à exploração florestal na Amazônia por técnicas de detecção de mudanças**. 2004. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Diagnóstico Ambiental da Amazônia Legal**. Rio de Janeiro, 1997. 1 CD-ROM.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxiford University Press, 1989. 561p.
- JENNINGS, S. B.; BROWN, N. D.; SHEIL, D. Assessing forest canopies and understory illumination: Canopy closure, canopy cover and other measures. **Forestry**, v. 72, p. 59-73, 1999. <http://dx.dio.org/10.1093/forestry/72.1.59>
- KORHONEN, L.; KORHONEN, K. T.; RAUTIAINEN, M.; STENBERG, P. Estimation of forest canopy cover: a comparison of field measurement techniques. **Silva Fennica**, v. 40, n. 4, p. 577–588, 2006.
- KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Johanesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South Africa**, v. 52, p. 151-163, 1951.
- LIMA, J. S. S. et al. Estudo da viabilidade de métodos geoestatístico na mensuração da variabilidade espacial da dureza da madeira de Paraju (*Manilkara* sp.). **Revista Árvore**, v. 30, n. 4, p. 651-657, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622006000400019>
- LUIZÃO F. J.; LUIZÃO, R. C. C.; PROCTOR, J. Soil acidity and nutrient deficiency in central Amazonian heath forest soils. **Plant Ecology**, v. 192, n. 2, p. 209–224, 2007. <http://dx.doi.org/10.1007/s11258-007-9317-6>

- MAGNUSSON, W. E.; LIMA, A. P.; LUIZÃO, R. et al. RAPELD: a modification of the Gentry method for biodiversity surveys in long-term ecological research sites. **Biota Neotropica**, v. 5, n. 2, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S1676-06032005000300002>
- MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 30–37, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000100005>
- MARTINS, G. C. et al. Campos nativos e matas adjacentes da região de Humaitá (AM): atributos diferenciais dos solos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 2, Apr. 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542006000200005>
- MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties. **Soil Science**, v. 135, p. 177-183, 1983.
- MCWILLIAM, A.-L. C.; ROBERTS, J. M.; CABRAL, O. M. R.; LEITAO, M. V. B. R.; COSTA, A. C. L.; MAITELLI, G. T. et al. Leaf area index and above-ground biomass of terra firme rain forest and adjacent clearings in Amazonia. **Functional Ecology**, v. 7, p.310- 317, 1993. <http://www.jstor.org/stable/2390210>
- PRANCE, G. T. Notes on the vegetation of Amazonia iii. The terminology of Amazonian forest types subject to inundation. **Brittonia**, v. 31, n. 1, p. 26–38, 1979.
- SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, L. M. et al. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, n. 7083, p. 520–523, 2006. <http://dx.doi.org/10.1038/nature04389>
- SOLBRIG, O. T. **The diversity of the savanna ecosystem**. In: SOLBRIG, O. T.; MEDINA, E.; SILVA, J. F. (eds.). **Biodiversity and savanna ecosystem processes: a global perspective**. Berlin: Springer-Verlag, 1996. p. 1-27.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1–53.
- VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W.; TILLOTSON, P. M. The Scaling of semivariograms and the kriging estimation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 525-533, 1997. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831997000400001>
- WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of fields crops. I Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, London, v. 11, p. 41-76, 1947. <http://www.jstor.org/stable/42907002>
- WEBSTER, R.; OLIVIER, M. A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. Oxford: Oxford University Press, 1990. 316p.
- WEISS, M.; BARET, F.; SMITH, G. J.; JONCKHEERE, I.; COPPIN, P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. Elsevier Science Publishers. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, p. 37-53, 2003.

-
- XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n.4, p. 421-427, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622002000400004>
- ZANCHI, F. B.; WATERLOO, M. J.; ROCHA, H. R.; AGUIAR, L. J. G.; RANDOW, C. Von; KRUIJT, B. et al. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e Biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 39, n. 2, p. 335-348, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672009000200012>
- ZANCHI, F. B.; MEESTERS, A.; WATERLOO, M.; KRUIJT, B.; LUIZÃO, F. J.; DOLMAN, A. J. Soil CO₂ exchange in seven pristine Amazonian rain forest sites in relation to soil temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 192-193, p. 96-107, 2014.