

Uso de redes neurais artificiais na análise de variáveis ambientais associadas à deposição de serapilheira

Priscila Sales Rodrigues Aquino^{1*}, Marcos Sales Rodrigues²,
Renato Vinícius Oliveira Castro³, Mauro Eloi Nappo¹

¹Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil

²Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, PE, Brasil

³Universidade Federal de São João Del-Rei, Sete Lagoas, MG, Brasil

*Autor correspondente, e-mail: priscila.ueg@gmail.com

Resumo

O objetivo do trabalho foi avaliar, por meio de redes neurais artificiais, a influência de algumas variáveis ambientais associadas à deposição de serapilheira. O estudo foi realizado na mata de galeria do córrego Lava-pés (3 ha) em Ipameri, GO, utilizando-se 60 coletores instalados em uma malha regular georreferenciada de 32 x 32 m. A serapilheira foi coletada mensalmente de dezembro de 2011 a novembro de 2012. Todas as amostras foram separadas manualmente nas frações: folhas (FF), ramos (FR - galhos e cascas), e estruturas reprodutivas (FER - flores, frutos e sementes). Avaliou-se a relevância de variáveis climáticas, temporais, espaciais e fitossociológicas na deposição da serapilheira, por meio da análise de sensibilidade fornecida no treinamento da rede neural artificial de melhor desempenho. De acordo com a análise estatística realizada, todas as variáveis estudadas foram relevantes no fenômeno estudado, entretanto a variável temporal (meses do ano) foi a mais importante na deposição de serapilheira na área em estudo. As redes neurais artificiais mostram-se como uma potente ferramenta na análise da deposição de serapilheira.

Palavras-chave: ecossistemas florestais, mata-de-galeria, RNA

Use of artificial neural network in the analysis of environmental variables associated to litterfall

Abstract

The objective of this study was to evaluate, with the use of artificial neural networks, the influence of some environmental variables in litterfall. The study was conducted on the gallery forest along 'Lava-pés' stream in Goiás State, Brazil where the experimental site (3 ha) was structured in a grid of 60 litterfall traps, with 0.33 m² each and held 0.65 m above the soil, georeferenced and spaced at intervals of 32 x 32 m. Litterfall was monthly collected from December 2011 to November 2012. All litterfall samples were manually separated into three fractions: leaves (LE), branch bark (BB), and reproductive parts (RP). Relevance of climate, temporal, spatial and phytosociological variables in litterfall deposition were evaluated, through sensitivity analysis provided by the artificial neural network with the best performance. According to the statistical analysis, all variables were significant in the phenomenon, while the variable time (months of the year) was the most important for litterfall in the evaluated area. Artificial neural networks are shown as a powerful tool for litterfall analysis.

Keywords: forest ecosystems, gallery forests, RNA

Recebido: 22 Fevereiro 2015
Aceito: 08 Abril 2016

Introdução

A serapilheira é a camada de resíduos orgânicos formada sobre os solos de ecossistemas florestais devido à queda periódica de folhas, ramos, cascas, frutos e da acumulação de detritos animais.

Há diversos fatores que afetam a quantidade de resíduos que formarão a serapilheira, entre eles se destacam: o clima, o solo, o tipo de vegetação, a idade e a densidades de plantas, latitude, altitude e estádios sucessionais (Machado et al., 2008; Soares et al., 2008). Compreender de que forma e em que grau estas variáveis afetam a formação da serapilheira pode auxiliar nos estudos sobre a ecologia das florestas. Vários trabalhos têm sido realizados com a finalidade de avaliar a deposição de serapilheira bem como as variáveis a ela relacionadas, com destaque para as variáveis climáticas como precipitação, umidade e temperatura (Cianciaruso et al., 2006; Gonçalves et al., 2006; Silva et al., 2007; Espig et al., 2009).

As ferramentas de inteligência artificial, tais como, as redes neurais artificiais (RNAs) surgem alternativamente como um potente instrumento de análise de dados ecológicos. Além disso, permite a incorporação de variáveis independentes qualitativas, como família botânica, grupos ecológicos, entre outras. As RNAs são modelos paramétricos não-lineares, definidos como sistemas massivos e paralelos compostos por neurônios, os quais são unidade de processamento que possuem em seu interior funções matemáticas de ativação (Braga et al., 1998). Uma RNA possui a capacidade para aprender por meio de um conjunto reduzido de exemplos, mapeando relações de entrada e saída, gerando resposta para dados não conhecidos (Gonçalves et al., 2010).

O uso de RNAs na análise de variáveis que influenciam na formação de um determinado fenômeno é importante, pois após a fase de treinamento a rede indica a quantidade de nós (unidades de processamento interconectadas) na camada de entrada que foram utilizados para alimentá-la, sendo estas variáveis, frequentemente, as mais relevantes (Santos et al., 2005). Considerando o fenômeno da deposição

de serapilheira, ao identificar as variáveis mais relevantes, bem como o grau em que atuam na sua formação é possível compreender melhor como ocorrem determinadas interações ecológicas gerando informações sobre o estado da floresta.

Portanto, o objetivo do trabalho foi analisar variáveis ambientais que atuam na formação da serapilheira em uma mata de galeria, por meio de redes neurais artificiais.

Material e métodos

O estudo foi conduzido no município de Ipameri, GO, na mata de galeria do córrego Lava-pés (17° 43' 57'' S, 48° 08' 04'' W e altitude de 820 m), classificada como mata de galeria não inundável segundo critérios sugeridos por Ribeiro & Walter (1998). A mata abrange uma área de três hectares e está inserida na Sub Bacia hidrográfica do rio Paranaíba, Bacia hidrográfica do Rio Paraná. O clima local é classificado, segundo critérios de Köppen, como Aw, denominado clima tropical de inverno seco. A precipitação anual média é de 1448 mm, com distribuição anual mostrando concentração no período de outubro-março e relativa seca no período de abril-setembro. As temperaturas médias são da ordem de 18°C (inverno) e 30°C (verão) e a média anual é de 21°C. Os solos predominantes na região são os Latossolos Vermelhos Distroférricos.

Para avaliar a deposição de serapilheira na área, foram utilizados 60 coletores (Figura 1) instalados em uma malha regular georreferenciada de 32 x 32 m, gerada no programa ArcGIS 10.1 (Redlands, CA). Os coletores foram confeccionados com moldura circular de mangueira de 0,65 m de diâmetro. Sobre tal moldura, foi costurada uma tela de náilon de 2 mm de abertura de malha, formando um saco cônico de 0,45 m de profundidade. Os coletores foram presos por quatro barras de ferro de 4,2 mm, suspensos a 0,65 m do solo. Em cada um dos 60 pontos amostrais da área em estudo foi obtida a elevação do terreno com um receptor GPS ("Global Positioning System") modelo "Garmim 60 CSx".

As coletas foram realizadas com intervalo de 30 dias, durante 12 meses, de

dezembro de 2011 a novembro de 2012. Em cada coleta, o material interceptado pelos coletores foi acondicionado em embalagem plástica devidamente identificada e conduzido ao Laboratório de Botânica da Universidade Estadual de Goiás, Unidade de Ipameri. O material coletado, após secagem prévia ao ar, foi separado manualmente nas frações folhas (FF), ramos (FR - galhos e cascas) e estruturas reprodutivas (FER - flores, frutos e sementes) conforme sugerido por Costa et al. (2010). Após a triagem, as frações foram acondicionadas em sacos de papel, etiquetados e levados a secagem em estufa com circulação de ar, a 70°C, durante 72 horas ou até atingirem peso constante. Posteriormente, cada fração foi

pesada separadamente em balança analítica e os dados obtidos em gramas.

Foram obtidos dados mensais de: chuva acumulada, quantidade de dias com chuva, temperaturas máxima e mínima, temperatura média, umidade relativa do ar média, pressão atmosférica média, precipitação média, velocidade média do vento. Estes dados são provenientes da estação meteorológica do município de Ipameri, GO disponibilizados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Os dados de temperatura e precipitação utilizados no estudo foram comparados com as Normais Climatológicas do município no período de 1961-1990 (Figura 2).

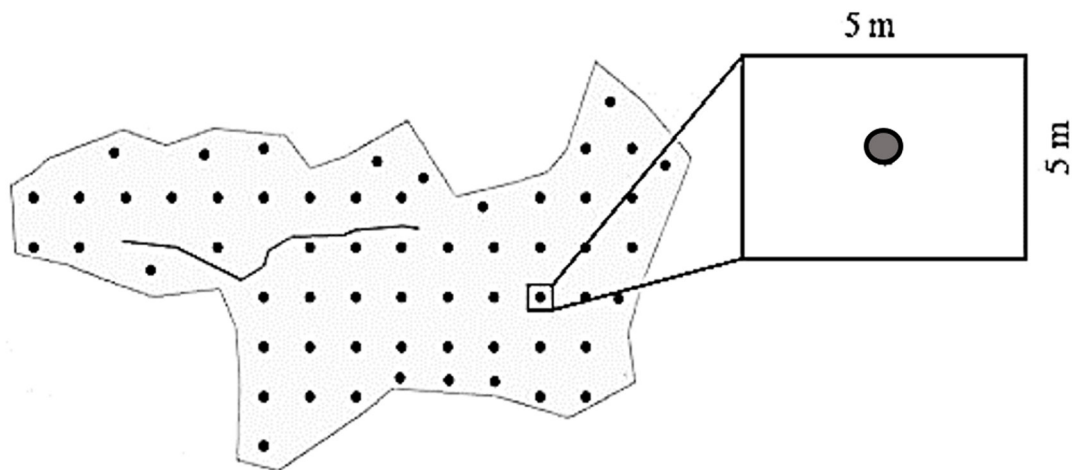


Figura 1. Malha amostral dos coletores e esquema de amostragem das parcelas fitossociológicas na área de estudo. Ipameri, GO

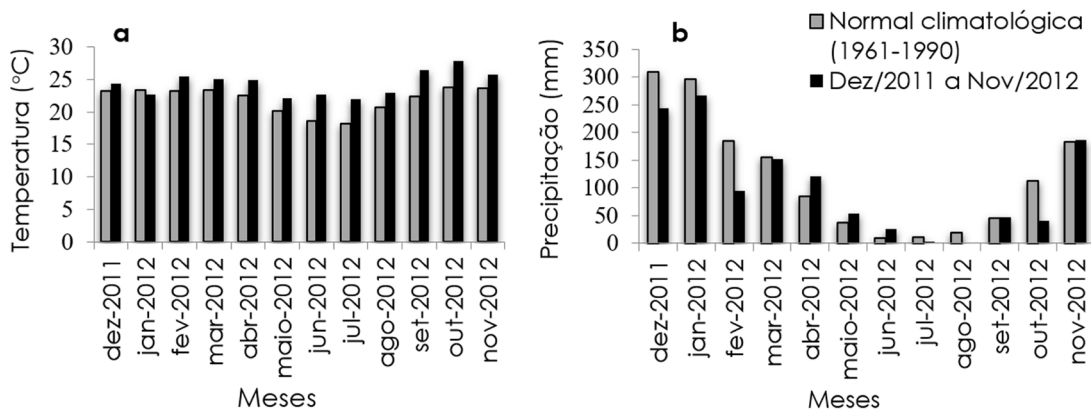


Figura 2. Temperatura média mensal e média de 30 anos de dados (1961-1990) (a) e precipitação mensal acumulada e média de 30 anos de dados (1961-1990) (b) em Ipameri, GO.

Foi realizado um levantamento fitossociológico das espécies arbóreas e arbustivas da vegetação. Para tal, foram alocadas 60 parcelas de 5 x 5 m (25 m²), onde cada coletor representava o centro da parcela

(Figura 1). Foram selecionados e medidos os indivíduos com altura maior que 1 m e DAP (diâmetro a 1,30m do solo) acima de 0,05 m. Em caso de bifurcação da árvore abaixo do ponto de medição, cada galho ou perfilho foi medido

como se fosse uma árvore. Os indivíduos foram identificados no campo, e quando isso não foi possível, o material foi coletado e herborizado para posterior identificação. As variáveis fitossociológicas consideradas no estudo foram: o número de indivíduos e espécies por parcela, índice de diversidade de Shannon-Weaver (H') (Magurran, 1988) e número de indivíduos das famílias mais representativas, ou seja, que ocorriam em pelo menos 20% das parcelas. Os dados do levantamento fitossociológico foram analisados com o auxílio do programa Mata Nativa (Cientec).

Realizou-se o treinamento das redes neurais artificiais para estimativa da deposição de serapilheira, por meio da ferramenta "intelligent problem solver", do programa Statistica 7.0, e diferentes arquiteturas de redes "Multilayer Perceptron" (MLP) foram testadas. As redes MLP são redes multicamadas "feedforward", que possuem camadas ocultas entre as camadas de entrada e saída. Com as camadas ocultas é possível extrair padrões não lineares dos dados. Uma rede MLP, com duas camadas intermediárias permite a aproximação de qualquer função (Haykin, 2001). Os treinamentos da rede MLP foram do tipo "feedforward", pelo método supervisionado. Este tipo utiliza algoritmo de fluxo de dados em uma única direção, sem ciclos, enquanto no método supervisionado as variáveis de entrada e saída são indicadas para o treinamento (Haykin, 2001).

As variáveis de entrada do modelo para estimar a deposição de serapilheira foram: mês, elevação, posição espacial (coordenada x e y em UTM), dados mensais de chuva acumulada, quantidade de dias com chuva, temperaturas máxima e mínima, temperatura média, umidade relativa do ar média, pressão atmosférica média, precipitação média, velocidade média do vento, número de indivíduos e espécies por parcela, índice de diversidade de Shannon-Weaver (H') e número de indivíduos das famílias mais representativas. As variáveis de saída foram: as frações folhas, galhos e cascas, estruturas reprodutivas e total de serapilheira em gramas.

Foram treinadas 500 redes para a estimativa da deposição de serapilheira em 80% do banco de dados, sendo os 20% restantes

separados para validação (banco de dados independente), os quais foram escolhidos de forma a representarem homoganeamente a área. O banco de dados de validação corresponde a pares de entrada-saída que não são fornecidos à rede durante o treinamento e nem parâmetro para finalizar o treinamento, ou seja, representam um conjunto completamente novo a ser apresentado à rede para avaliação de desempenho (Calôba et al., 2002).

Segundo Hair et al. (2009), o processo de validação é importante, pois após a identificação do melhor modelo, o passo final é garantir que ele represente a população geral (generalização). Para tal um dos critérios é a extensão em que o modelo se ajusta a um modelo teórico existente ou um conjunto de resultados previamente validados sobre o mesmo tópico. Entretanto, em muitos estudos, como o do presente trabalho, não há resultados anteriores ou teoria disponíveis. Nestes casos, a validação mais apropriada é testar o modelo em uma nova amostra tirada da população geral (Hair et al., 2009).

Dentre as 500 redes treinadas foram selecionadas as três melhores redes para serem aplicadas aos dados de validação. Esta seleção foi baseada nas seguintes estatísticas de precisão: maior coeficiente de correlação linear entre os valores observados e estimados (r), menores viés (E) (Eq. 1), erro percentual médio (E (%)) (Eq. 2) e erro padrão (S_{yx}) (Eq. 3):

$$E = \sum(y - x) \quad (1)$$

$$E (\%) = \frac{\sum \left[\frac{(y-x)}{y} \cdot 100 \right]}{n} \quad (2)$$

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum (y-x)^2}{n-p-1}} \quad (3)$$

em que:

E : Viés

E (%): erro percentual médio

S_{yx} : Erro padrão

y : variável observada

x : variável estimada

n : número de amostras

p : número de parâmetros do modelo

Posteriormente foi feita a validação das redes, a qual consistiu em aplicar as redes selecionadas em 20% dos dados independentes dos dados utilizados no treinamento. Os menores valores de viés, E (%), S_{yx} e maior r na validação indicam a melhor rede. Cabe ressaltar que cada coleta mensal em cada coletor (com os dados em gramas) foi considerada uma amostra para o treinamento e validação das redes.

Resultados e Discussão

Na Tabela 1 são apresentadas as famílias de maior ocorrência nas parcelas em estudo, ou seja as famílias utilizadas no treinamento das redes neurais artificiais.

Os resultados das estatísticas de precisão bem como o perfil (números de entrada, camadas escondidas e saídas) das três Redes Neurais Artificiais (RNAs) selecionadas para a validação encontram-se na Tabela 2.

Tabela 1. Famílias com ocorrência igual ou superiora 20% das parcelas na área em estudo.

Família	Frequência por parcela (%)
Annonaceae	59
Aquifoliaceae	20
Burseraceae	29
Chrysobalanaceae	53
Dilleniaceae	29
Euphorbiaceae	43
Fabaceae	39
Melastomataceae	27
Myrsinaceae	22
Myrtaceae	51
Rubiaceae	47
Sapindaceae	67
Siparunaceae	45
Vochysiaceae	41

Tabela 2. Estatísticas de precisão para o treinamento e validação das três melhores Redes Neurais Artificiais aplicadas aos dados de deposição de serapilheira coletados na mata de galeria do córrego Lava-pés, Ipameri, GO

	Rede/Arquitetura	Saídas	r	E (%)	E	S_{yx}
Treinamento	1/MLP 29:40-30-29-4:4	FF	0,98	-7,32	47,12	3,13
		FR	0,98	-67,74	172,21	1,90
		FER	0,93	-85,96	396,90	3,30
		Total	0,99	-24,18	94,79	3,32
	2/MLP 30:41-30-29-4:4	FF	0,98	-11,00	64,83	2,89
		FR	0,98	-102,18	69,27	1,94
		FER	0,97	-172,12	187,66	2,20
		Total	0,99	-33,08	-0,06	2,95
	3/MLP 30:41-30-30-4:4	FF	0,98	-15,86	7,44	2,82
		FR	0,98	-137,39	98,22	1,95
		FER	0,97	-256,68	92,21	2,20
		Total	0,99	-34,37	16,38	2,89
Validação	1/MLP 29:40-30-29-4:4	FF	0,65	-31,31	-367,17	17,76
		FR	0,11	-331,59	-335,14	15,21
		FER	0,02	-0,78	172,40	13,88
		T	0,43	-83,57	-747,31	32,52
	2/MLP 30:41-30-29-4:4	FF	0,70	-8,49	19,64	14,71
		FR	0,15	-458,19	-393,46	15,48
		FER	-0,02	-359,38	-16,22	16,26
		T	0,48	-62,18	-310,66	26,56
	3/MLP 30:41-30-30-4:4	FF	0,58	-56,65	-518,59	18,75
		FR	0,07	-419,14	-244,48	11,54
		FER	0,01	-324,84	126,57	13,00
		T	0,40	-86,50	-870,66	32,46

MLP: *multilayerperceptron*; FF: Fração folhas; FR: fração ramos (galhos e cascas); FER: Fração estruturas reprodutivas; T: Total; r: Coeficiente de correlação linear; E: Viés; E (%): Erro percentual médio; S_{yx} : Erro padrão.

Verificou-se que os valores de coeficiente de correlação linear (r) entre os valores observados de serapilheira [frações: folhas (FF), galhos e cascas (FR), estruturas reprodutivas (FER) e total] e os valores estimados por meio do treinamento das RNAs selecionadas como melhor desempenho foram exatamente iguais para as três redes, com exceção do valor de r para a FER da rede 1 (Tabela 2). Os valores do erro percentual médio E (%), viés do erro padrão (S_{yx}) variaram consideravelmente entre as RNAs, destacando-se a rede 1, a qual apresentou os menores valores de erro médio, porém apresentou os maiores valores de viés (exceto para FF) e S_{yx} para todas as frações de serapilheira. Vale destacar que tanto para os dados de deposição de serapilheira utilizados no treinamento como os da validação das RNAs, as piores estatísticas de precisão são pertencentes à FR e FER, sendo a última a que apresenta os valores mais elevados de erro (%) e viés (Tabela 2).

Contudo, de uma forma geral, na fase de treinamento as RNAs demonstraram serem estimadores precisos considerando, principalmente, a fração folhas e o total. Resultados semelhantes para os valores de r foram encontrados por Binoti (2010). A autora avaliou a exatidão da prognose da produção em povoamentos de eucaliptos utilizando RNAs e observou altos valores de r (0,89 à 0,98) para as melhores redes selecionadas no treinamento. Entretanto, Binoti (2010) destaca que as duas redes que apresentaram o melhor treino (melhores estatísticas de precisão) em seu estudo foram as que forneceram a pior generalização (piores estatísticas de precisão para os dados de validação) e conseqüentemente desconsideradas pela autora. Segundo Binoti (2010), uma rede bem treinada não é suficiente, pois é necessário que a mesma apresente uma boa generalização para aplicação da mesma em novos dados. Portanto, para classificar um modelo como um bom estimador este deve ter a capacidade de generalização, e para isto a validação (teste do modelo em uma nova amostra tirada da população geral) se torna fundamental (Hair et al., 2009).

Apesar de a maioria dos resultados das

estatísticas de precisão do presente estudo terem sido semelhantes para os dados de treinamento das três RNAs selecionadas, notou-se que as redes variaram muito entre si quando aplicadas aos dados de validação (Tabela 2) principalmente para a FER e FR. Para essas últimas as RNAs não foram consideradas bons estimadores, uma vez que as estatísticas de precisão foram ruins, ou seja os valores de r foram muito baixos (ausência de correlação) e os valores de erro muito altos (Tabela 2). Alguns estudos apontam para um padrão muito variável da produtividade da FER (Vogel et al., 2007; Aquino et al., 2016). Vogel et al. (2007) estudaram a produtividade de serapilheira em Floresta Estacional Decidual e encontraram alta variação na fração miscelânea (estruturas reprodutivas e restos vegetais não-identificáveis). Os autores atribuíram este fato aos diferentes períodos de floração de algumas espécies. Assim, a composição da FER pode estar relacionada aos diversos padrões fenológicos das espécies, bem como o tamanho e tipo de frutos, flores e sementes. A fração ramos, também, pode apresentar um padrão muito variável de deposição (Aquino et al., 2016), o que pode indicar que esta juntamente com a FER interferiu na precisão do modelo por se tratar de variáveis com padrões complexos e de difícil estimativa.

Verificou-se que rede 2 apresentou as melhores estatísticas de precisão na validação, considerando a FF e o total. Isto pode ter ocorrido, pois a FF representa a maior porcentagem de formação da serapilheira (Cianciaruso et al., 2006; Vogel et al., 2014) de forma que é possível estimá-la por meio da serapilheira total devido a forte relação entre FF e o total (Hansen et al., 2009). Esse padrão também foi observado por Aquino et al. (2016) que avaliou a distribuição espacial da produtividade de serapilheira e constatou que apenas a fração FF e o total apresentaram dependência espacial. A autora atribuiu a dependência espacial da serapilheira total à fração folhas por esta ter apresentado forte dependência espacial e compor a maior parte da formação de serapilheira.

É importante observar que os valores de r da FF e do total (0,70 e 0,48 respectivamente) obtidos na validação foram inferiores aos do

treinamento (Tabela 2). Resultados semelhantes foram relatados por Foody & Cutler (2006), os quais estudaram a biodiversidade de florestas tropicais a partir de dados de sensoriamento remoto utilizando redes neurais artificiais. Segundo os autores as estimativas mais precisas de riqueza de espécies foram derivado de uma RNA que apresentou valor de $r = 0,88$ para o treinamento e $r = 0,69$ para a validação. Ainda, segundo os autores, mesmos os valores de r da validação terem sido inferiores ao treinamento as RNAs apresentaram correlações mais fortes entre os dados estimados e os observados do que aquelas derivadas dos modelos de regressão convencionais. Özemi et al. (2006) relataram a importância de usar um conjunto de dados independentes para avaliar a precisão de modelos ecológicos usando redes neurais artificiais, pois geralmente o desempenho nos dados de treinamento é sempre maior que os valores estimados no conjunto de dados independentes. Corroborando com isto, Elith & Burgman (2002) alertam que os sistemas biológicos são complexos e portanto na modelagem ecológica é importante usar os dados independentes para a avaliação da precisão dos modelos uma vez que os dados utilizados para criar o modelo podem gerar uma visão demasiadamente otimista do sucesso da modelagem.

Portanto, apesar dos baixos valores das estatísticas de precisão obtidas por meio dos dados de validação da rede 2, estes estão em conformidade com outros estudos de dados ecológicos (Foody & Cutler, 2006; Özemi et al., 2006) e pode ser considerada um modelo preciso dado a complexidade da dinâmica das variáveis ecológicas, como é o caso da deposição da serapilheira, a qual sofre influência de diversos fatores, entre eles climáticos e edáficos (Soares et al., 2008). Sendo assim, a rede 2 foi selecionada como a RNA de melhor desempenho, sendo que a mesma fornece as informações mais coerentes sobre a variável em estudo, pois melhor estimam as variáveis de entrada (FF e total). Portanto, as variáveis traduziram-se numa rede com a seguinte arquitetura: 30 entradas, 30 e 29 neurônios na 1ª e 2ª camadas ocultas, respectivamente e quatro

saídas.

O ranking de influência de cada variável na deposição de serapilheira na área em estudo está descrita na Tabela 3, conforme a classificação da RNA 2.

Verificou-se que a variável mês foi a mais relevante na estimativa da deposição de serapilheira para a rede selecionada como de melhor desempenho. Isto ocorreu, provavelmente, devido às duas estações climáticas bem definidas (seca e chuvosa) que ocorrem na região em que a floresta em estudo está inserida.

Sendo assim, há meses com altos índices de precipitação (novembro, dezembro e janeiro) e meses com pronunciada estação seca (junho, julho e agosto) o que pode afetar a deposição de serapilheira. Diversos estudos relataram um padrão de sazonalidade em que há maior deposição de serapilheira nos meses secos e menor produção em meses chuvosos (Pinto et al., 2009; Silva et al., 2009; Cianciaruso et al., 2006).

A segunda variável que mais contribuiu na estimativa da deposição de serapilheira foi o índice de diversidade de Shannon-Weaver (H'). Fatores como clima, altitude, intensidade luminosa, topografia, regimes hídricos e propriedades edáficas estão frequentemente relacionados ao padrão de distribuição de espécies arbóreas (Pires et al., 2006; Camargos et al., 2008; Du et al., 2014). A heterogeneidade destes fatores dentro das florestas, associada a distúrbios ambientais, podem afetar a diversidade de espécies bem como a dinâmica da floresta, de forma que as espécies podem responder diferentemente a tais fatores (Amaral et al., 2013) influenciando a deposição de serapilheira.

A pressão atmosférica (hPa média), umidade relativa média [U (%)] e temperatura média [T (°C)] foram respectivamente a 3ª, 4ª e 5ª variáveis mais significativas na deposição da serapilheira. Estas variáveis climáticas são intimamente interligadas, uma vez que a umidade e a pressão atmosférica variam em função da temperatura (Barry & Chorley, 2013). Segundo Terra et al. (2011) a temperatura e umidade relativa do ar são variáveis relacionadas com

consumo de água pelas plantas. Ainda segundo os autores a temperatura afeta o crescimento e desenvolvimento das plantas e a umidade relativa tem influência direta na sanidade das plantas o que pode afetar a sua produtividade. Outro aspecto importante é que o aumento do

déficit hídrico e a redução da umidade relativa do ar podem favorecer o fechamento dos estômatos da plantas afim de reduzir a perda de água por transpiração (Tatagiba et al., 2007), evitando a perda de folhas por estresse hídrico.

Tabela 3. Ranking das variáveis para a rede neural artificial de melhor desempenho na estimativa da deposição de serapilheira, obtida por meio da análise de sensibilidade das variáveis em uma mata de galeria. Ipameri, Goiás, 2014.

Variáveis	Ranking
Mês	1 ^a
Índice de diversidade Shanon-Weaver (H')	2 ^a
Pressão atmosférica (hPa média) ⁽¹⁾	3 ^a
Umidade relativa média [U (%)] ⁽¹⁾	4 ^a
Temperatura média [T (°C)] ⁽¹⁾	5 ^a
Dilleniaceae ⁽²⁾	6 ^a
Sapindaceae ⁽²⁾	7 ^a
Elevação	8 ^a
Número de indivíduos por parcela (N)	9 ^a
Myrtaceae ⁽²⁾	10 ^a
Dias com chuva	11 ^a
Chuva acumulada ⁽¹⁾	12 ^a
Temperatura mínima [T (mín.)] ⁽¹⁾	13 ^a
Precipitação média [P (mm)] ⁽¹⁾	14 ^a
Burseraceae ⁽²⁾	15 ^a
Temperatura máxima [T (máx)] ⁽¹⁾	16 ^a
Annonaceae ⁽²⁾	17 ^a
Ponto Y ⁽³⁾	18 ^a
Chrysobalanaceae ⁽²⁾	19 ^a
Ponto X ⁽³⁾	20 ^a
Número de espécies por parcela (S)	21 ^a
Melastomataceae ⁽²⁾	22 ^a
Velocidade média do vento [V (m/s)] ⁽¹⁾	23 ^a
Fabaceae ⁽²⁾	24 ^a
Vochysiaceae ⁽²⁾	25 ^a
Euphorbiaceae ⁽²⁾	26 ^a
Myrsinaceae ⁽²⁾	27 ^a
Rubiaceae ⁽²⁾	28 ^a
Siparunaceae ⁽²⁾	29 ^a
Aquifoliaceae ⁽²⁾	30 ^a

⁽¹⁾Dados mensais para a região; ⁽²⁾Família botânica pertencente ao grupo das mais representativas (ocorrência ≥20% das parcelas); ⁽³⁾Coordenadas UTM.

As famílias botânicas Dilleniaceae e Sapindaceae foram as famílias de maior influência na deposição de serapilheira, ocupando, respectivamente, a 6^a e 7^a colocação no ranking das variáveis para a RNA de melhor desempenho. A família Dilleniaceae ocupa 11^a posição dentre as famílias mais frequentes na área em estudo, aparecendo em 29% das parcelas, porém mostrou-se como a 6^a variável mais importante apontada pela rede neural. Isto pode ter ocorrido, pois as espécies desta família comumente apresentam importantes características fisiológicas e morfológicas de proteção como: dureza foliar, presença de

tricomas e acúmulo de Silício (Si) no tecido vegetal (Korndörfer, 2006).

O acúmulo de Si junto à cutícula das folhas pode atuar formando uma camada rígida que atua na proteção contra ataques de fungos e insetos (Bertalot et al., 2010). Em algumas espécies a presença de Si na área foliar pode, também, promover a redução na taxa de transpiração, devido ao aumento da resistência e rigidez das paredes celulares, evitando assim a perda excessiva de água (Paulino et al., 2013). Considerando que a queda de folhas no período seco possa ser devido uma estratégia das plantas para promover a economia hídrica

(Ferreira et al., 2007) a presença de Si na área foliar pode diminuir a perda de folhas, uma vez que reduz a taxa de transpiração e afetar diretamente a deposição de serapilheira.

Já a ocupação da família Sapindaceae na 7ª posição do ranking de variáveis relevantes apresentados pela RNA, parece estar relacionada à frequência desta família nas parcelas, pois é a família mais frequente na área em estudo aparecendo em 66% das parcelas. Em estudos realizados por Hack et al. (2005) e Cenci et al. (2013) em Floresta Estacional decidual e Floresta Ombrófila Mista/Floresta Estacional Decidual, respectivamente, os autores verificaram que a família Sapindaceae foi a mais expressiva em relação ao número de indivíduos.

A variável elevação aparece em 8ª lugar no ranking de variáveis relevantes na estimativa da deposição de serapilheira no presente estudo. Segundo Miller et al. (2007) esta variável comumente apresenta um padrão de distribuição espacial e pode ser considerada um dos diversos fatores ambientais responsáveis pelo padrão de distribuição espacial da vegetação. Uma floresta pode apresentar áreas com maior ou menor drenagem em função da elevação (Bispo et al., 2009). Em florestas tropicais ribeirinhas, o regime de inundação e saturação dos solos é considerado o fator predominante que influencia na composição, estrutura e distribuição das espécies (Oliveira-Filho, 1989). Desta forma a deposição de serapilheira pode estar diretamente relacionada com a variável elevação, uma vez que exerce influência na distribuição da vegetação.

O número de indivíduos por parcela foi apontada pela RNA como a 9ª variável mais importante na deposição de serapilheira. Este comportamento é esperado, ou seja, que a quantidade de plantas em uma determinada área influa diretamente na deposição de serapilheira, uma vez que esta é formada basicamente por detritos vegetais (Aquino et al., 2016).

A família botânica Myrtaceae aparece em 51% das parcelas na área em estudo e foi classificada, pela RNA de melhor desempenho, como a 10ª variável mais relevante na

deposição de serapilheira. A importância desta variável na constituição da serapilheira pode estar relacionada ao padrão de frutificação das espécies (todas pertencentes ao gênero *Myrcia* DC. exGuill) ocorrentes na mata em estudo. As espécies de *Myrcia* possuem frutos carnosos, geralmente baciformes (Vallilo et al., 2005). Durante a fase de triagem da serapilheira foi possível observar, em alguns meses de coleta, a presença abundante de frutos pertencentes a espécies de *Myrcia*, elevando o valor da FER nas parcelas de ocorrência das espécies.

As variáveis dias com chuva, chuva acumulada, temperatura mínima [T (mín.)], precipitação média [P(mm)], temperatura máxima [T (máx.)] e velocidade média do vento [V (m/s)] são classificadas no ranking de variáveis relevantes na estimativa da deposição de serapilheira em: 11ª, 12ª, 13ª, 14ª, 16ª e 23ª respectivamente. Diversos trabalhos têm apresentado padrões muito variáveis quanto à influência das variáveis climáticas e a produção de serapilheira (Silva et al., 2007; Pinto et al., 2008). Entretanto as variáveis de precipitação são comumente associadas com a produção de serapilheira em florestas tropicais e de uma forma geral apresentam correlações negativas (Cianciaruso et al., 2006; Gonçalves et al., 2006; Espig et al., 2009; Sanches et al., 2009). O maior aporte de serapilheira pela floresta no período seco pode ser uma estratégia de defesa, uma vez que a queda das folhas reduz a perda de água por transpiração, acarretando numa economia de água no período de estresse hídrico (Barbosa & Faria, 2006). Correlações entre as variáveis T (mín.), T (máx.) e P (mm) com a deposição de serapilheira também foram relatadas por Figueiredo Filho et al. (2005) que estudaram a produção de serapilheira em um floresta ombrófila mista. Ao avaliarem o acúmulo de serapilheira em fragmentos de mata mesofítica e cerrado stricto sensu, Campos et al. (2008) verificaram a existência de correlação entre a deposição de serapilheira e a velocidade média do vento, entretanto, os autores destacam que a correlação encontrada foi classificada como muito fraca. Isto corrobora com os dados do presente estudo, uma vez que a V (m/s) ocupa a 23ª posição no ranking de

relevância das variáveis utilizadas pela RNA na estimativa da deposição de serapilheira.

As coordenadas espaciais, ou seja, ponto Y e ponto X para cada amostra na área em estudo, apareceram na 18ª e 20ª posição no "ranking" de variáveis importantes na deposição de serapilheira (Tabela 3). A distribuição da vegetação de determinado local pode apresentar continuidade espacial (Miller et al., 2007) e, por conseguinte, a deposição de serapilheira pode apresentar o mesmo padrão de distribuição da vegetação, caracterizando a posição no espaço como um fator determinante na formação da serapilheira. Fato este confirmado por Aquino et al. (2016), que observou dependência espacial para a fração folhas e a serapilheira total em mata de galeria não inundável (mesma área de estudo do presente trabalho).

As famílias botânicas Burseraceae, Annonaceae, Chrysobalanaceae, Melastomataceae, Fabaceae, Vochysiaceae, Euphorbiaceae, Myrsinaceae, Rubiaceae, Siparunaceae e Aquifoliaceae foram classificadas na 15ª, 17ª, 19ª, 22ª, 24ª, 25ª, 26ª, 27ª, 28ª, 29ª e 30ª posição no ranking de variáveis mais importantes na deposição de serapilheira (Tabela 3). Com exceção das famílias Dilleniaceae, Sapindaceae e Myrtaceae, as demais famílias botânicas, de uma forma geral, foram as variáveis menos relevantes na estimativa da deposição da serapilheira na área em estudo quando comparadas as demais variáveis. Dentre as variáveis menos relevantes neste estudo, inclui-se o número de espécies por parcela (S) o qual aparece na 21ª colocação no ranking gerado por meio da RNA.

Portanto, mediante a importância deste fenômeno, o presente estudo revelou informações importantes acerca das variáveis ambientais que influem na formação da serapilheira na área avaliada e permitiu detectar algumas interações ecológicas de forma a compreender melhor o funcionamento da floresta.

Conclusões

As redes neurais artificiais apresentam-se como uma ferramenta importante na análise de

variáveis ambientais associadas à deposição de serapilheira.

Os valores do erro de validação das RNAs podem ser relevados, uma vez que a serapilheira possui alta variabilidade devido aos diversos fatores que a afetam. Os meses do ano, o índice de diversidade e as variáveis pressão atmosférica, umidade relativa e temperatura médias foram as variáveis de maior importância e que mais afetam a deposição de serapilheira na área em estudo.

Agradecimentos

A Capes pela concessão de bolsa de estudo ao primeiro autor.

Referências bibliográficas

- Amaral, L.P., Ferreira, R.A., Lisboa, G.S., Longhi, S.J., Watzlawick, L.F. 2013. Variabilidade espacial do Índice de Diversidade de Shannon-Wiener em Floresta Ombrófila Mista. *Scientia Forestalis* 41:83-93.
- Aquino, P. S. R., Nappo, M. E., Rodrigues, M. S., Pereira, I. M., Matricardi, E. A. T., Pelá, G. D. M. 2016. Análise Espacial da Produtividade de Serapilheira em Uma Mata de Galeria. *Ciência Florestal*, 26: 489-500, 2016
- Barbosa, J.H.C., Faria, S.M. 2006. Aporte de serapilheira ao solo em estágios sucessionais florestais na reserva biológica de Poço das Antas, RJ, Brasil. 2006. *Rodriguésia* 57:461-476.
- Barry, R.G., Chorley, R.J. 2013. *Atmosfera, tempo e clima*. Bookman, Porto Alegre, Brasil. 528 p.
- Bertalot, M.J.A., Carvalho-Pupatto, J.G., Furtado, E.L., Rosa, D.D., Mendoza, E., Lima, A.B.D. 2010. Métodos alternativos para controle de doenças fúngicas na cultura de jambu (*Spilanthes oleraceae* L.) através de *Equisetum* spp e preparado biodinâmico 501. *Revista Brasileira de Agroecologia* 5: 264-274.
- Binoti, M.L.M.S. 2010. *Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto*. 54p. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.
- Bispo, P.C., Valeriano, M.M., Kuplich, T.M. 2009. Variáveis geomorfométricas locais e sua relação com a vegetação da região do interflúvio Madeira-Purus (AM-RO). *Acta Amazonica* 39: 71-80.
- Braga, A.P., Carvalho, A.C.P.L.F., Ludemir, T.B. 1998. *Fundamentos de Redes Neurais Artificiais*. Escola de Computação, Universidade Federal do Rio

- de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 245 p.
- Calôba, G., Calôba, L., Saliby, E. 2002. Cooperação entre redes neurais artificiais e técnicas 'clássicas' para previsão de demanda de uma série de vendas de cerveja na Austrália. *Pesquisa Operacional* 22: 345-358.
- Camargos, V.L., Silva, A.F., Meira Neto, J.A., Martins, S.V. 2008. Influência de fatores edáficos sobre variações florísticas na Floresta Estacional Semidecídua no entorno da Lagoa Carioca, Parque Estadual do Rio Doce, MG, Brasil. *Acta Botanica Brasílica* 22: 75-84.
- Campos, E.H., Alves, R.R., Serato, D.S., Rodrigues, G.S. de S., Rodrigues, S.C. 2008. Acúmulo de serrapilheira em fragmentos de mata mesofítica e cerrado stricto sensu em Uberlândia-MG. *Sociedade & Natureza* 20: 189-203.
- Cenci, B.T., Dorneles, L.T., Simioni, E.L., Frizon, S., Travi, V.H. 2013. Composição da flora arbórea e arborecente no jardim botânico de Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Árvore* 37: 137-149.
- Cianciaruso, M.V., Pires, J.S.R., Delitti, W.C.B., Silva, F.P. 2006. Produção de serapilheira e decomposição do material foliar em um cerrado da Estação Ecológica de Jataí, Luiz Antônio, SP. *Acta Botânica Brasileira* 20: 49-59.
- Costa, C.C.A., Camacho, R.G.V., Macedo, I.D., Silva, P.C.M. 2010. Análise comparativa da produção de serapilheira em fragmentos arbóreos e arbustivos em área de caatinga na Flona de Açú - RN. *Revista Árvore* 34: 259-265.
- Du, B., Liu, C., Kang, H., Zhu, P., Yin, S., Shen, G., Hou, J., Ilvesniemi, H. 2014. Climatic control on plant and soil $\delta(13)C$ along an altitudinal transect of Lushan mountain in subtropical china: characteristics and interpretation of soil carbon dynamics. *PlosOne* 9: e86440.
- Elith, J., Burgman, M. 2002. Predictions and their validation: rare plants in the central highlands, Victoria, Australia. In: Scott, J.M., Scott J.M., Heglund, P.J., Morrison, M.L., Raphael, M.G., Wall, W.A. and Samson F.B. (ed.) *Predicting Species Occurrences: Issues of Accuracy and Scale*. Island Press, Covelo, USA. p. 303-314.
- Espig, A.S., Freire, F.J., Marangon, L.C., Ferreira, R.L.C., Freire, M.B.G., Espig, D.B. 2009. Sazonalidade, composição e aporte de nutrientes da serapilheira em fragmento de mata atlântica. *Revista Árvore* 33: 949-956.
- Ferreira, R.L.C.; Litra Junior, M.A., Rocha, M.S.D., Santos, M.V.F.D., Lira, M.D.A., Barreto, L.P. 2007. Deposição e acúmulo de matéria seca e nutrientes em serapilheira em um bosque de sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.). *Revista Árvore* 31: 7-12.
- Figueiredo Filho, A., Serpe, E.L., Becker, M., Santos, D.F. 2005. Produção estacional de serrapilheira em uma floresta ombrófila mista na floresta nacional de Irati (PR). *Ambiência* 1: 257-269.
- Foody, G.M., Cutler, M.E.J. 2006. Mapping the species richness and composition of tropical forests from remotely sensed data with neural networks. *Ecological Modelling* 195: 37-42.
- Gonçalves A.S. da C., Fernandes M.E.B., Carvalho, M.L. 2006. Variação anual da produção de serapilheira em bosques de mangue no Furo Grande, Bragança, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais* 1: 35-42.
- Gonçalves, R.M., Coelho, L.S., Krueger, C.P., Heck, B. 2010. Modelagem preditiva de Linha de Costa utilizando redes neurais artificiais. *Boletim de Ciências Geodésicas* 16: 420-444.
- Hack, C., Longhi, S.J., Boligon, A.A., Murari, A.B., Pauleski, D.T. 2005. Análise fitossociológica de um fragmento de Floresta Estacional Decidual no município de Jaguarí, RS. *Ciência Rural* 35: 1083-1091.
- Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E., Tatham, R.L. 2009. *Análise multivariada de dados*. Bookman, Porto Alegre, Brasil. 688 p.
- Hansen, K., Vesterdal, L., Schmidt, I.K., Gundersen, P., Sevel, L., Bastrup-Birk, A., Pedersen, L.B., Bille-Hansen, J. 2009. Litterfall and nutrient return in five tree species in a common garden experiment. *Forest Ecology and Management* 257: 2133-2144.
- Haykin, S. 2001. *Redes Neurais: princípios e prática*. Bookman, Porto Alegre, Brasil. 906p.
- Korndörfer, A.P. 2006. *A importância do silício nas relações entre herbívoros e Davilla elliptica (Dilleniaceae) St. Hil no cerrado*. 31p. (Dissertação de mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Machado, M.R., Piña Rodrigues, F.C.M., Pereira, M.G. 2008. Produção de serapilheira como bioindicador de recuperação em plantio adensado de revegetação. *Revista Árvore* 32: 143-151.
- Magurran, A.E. 1988. *Ecological diversity and its measurement*. Croom Helm, London, England. 179p.
- Miller, J., Franklin, J., Aspinall, R. 2007. Incorporating spatial dependence in predictive vegetation models. *Ecological Modelling* 202: 225-242.
- Oliveira-Filho, A.T. 1989. Composição florística e estrutura comunitária da floresta de galeria

- do Córrego da Paciência, Cuiabá, MT. *Acta Botanica Brasílica*3: 91-111.
- Özesmi, S., Tan, C., Özesmi, U. 2006. Methodological issues in building, training, and testing artificial neural networks in ecological applications. *Ecological Modelling* 195: 83-93.
- Paulino, A.S., Albuquerque, A.W., Moura Filho, G., Pereira, F.R.S. 2013. Helicônia "Golden Torch": Produtividade e qualidade póscolheita sob diferentes fontes e doses de silício. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 17: 615-62.
- Pinto, S.I.C., Martins, S.V., Barros, N.F., Carlos, Dias, H.C.T. 2008. Produção de serapilheira em dois estádios sucessionais de floresta estacional semidecidual na reserva Mata do Paraíso, em Viçosa, MG. *Revista Árvore* 32: 545-556.
- Pinto, S.I.C., Martins, S.V., Barros, N.F., Dias, H.C.T. 2009. Ciclagem de nutrientes em dois trechos de floresta estacional semidecidual na reserva florestal Mata do Paraíso em Viçosa, MG, Brasil. *Revista Árvore*33: 653-663.
- Pires, L.A., Brites, R.M., Martel, G., Pagano, S.N. 2006. Produção, acúmulo e decomposição da serapilheira em uma restinga da Ilha do Mel, Paranaguá, PR, Brasil. *Acta Botanica Brasílica* 20: 173-184.
- Ribeiro, J.P., Walter, M.T. 1998. Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In Sano, S.M., Almeida, S.P. (Eds.). *Cerrado: ambiente e flora*. Embrapa-CPAC, Planaltina, Brasil. p.87-166.
- Sanches, L., Valentini, C.M.A., Biudes, M.S., Nogueira, J.S. 2009. Dinâmica sazonal da produção e decomposição de serapilheira em floresta tropical de transição. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*13: 183-189.
- Santos, A.M., Seixas, J.M., Pereira, B.B., Medronho, R.A. 2005. Usando Redes Neurais Artificiais e Regressão Logística na Predição da hepatite A. *Revista Brasileira de Epidemiologia* 8:117-126.
- Silva, C.J.D., Sanches, L., Bleich, M.E., Lobo, F.D.A., Nogueira, J.D.S. 2007. Produção de serapilheira no cerrado e floresta de transição Amazônia-Cerrado do Centro-Oeste Brasileiro. *Acta Amazonica*37: 43 – 548.
- Silva, C.J. da, Lobo, F.A., Bleich, M.E., Sanches, L. 2009. Contribuição de folhas na formação da serapilheira e do retorno de nutrientes em floresta de transição no norte de Mato Grosso. *Acta Amazonica* 39: 591-600.
- Soares, I., Queiroz, J.A., Oliveira, V.H., Crisóstomo, L.A., Oliveira, T.S. 2008. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes na cultura do cajueiro anão precoce. *Revista Árvore*32: 173-181.
- Tatagiba, S.D., Pezzopane, J.E.M., Reis, E.F., Dardengo, M.C.J.D., Effgen, T.A.M. 2007. Comportamento fisiológico de dois clones de *Eucalyptus* na época seca e chuvosa. *Cerne*13: 149-159.
- Terra, V.S.S., Reisser Junior, C., Timm, L.C., Carvalho, F.L.C., Pereira, J.F.M. 2011. Análise espacial da temperatura e umidade relativa do ar em um pomar de pessegueiro, no município de Morro Redondo-RS. In: Inamasu, R.Y., Naime, J. de M., Resende, Á.V. de, Bassoi, L.H., Bernardi, A.C. de C. *Agricultura de precisão: um novo olhar*. Embrapa Instrumentação, São Carlos, Brasil. p. 207-211.
- Vallilo, M.I., Garbelotti, M.L., Oliveira, E., Lamardo, L.C.A. 2004. Características físicas e químicas dos frutos do cambucizeiro (*Campomanesiphaea*). *Revista Brasileira de Fruticultura*27: 241-244.
- Vogel, H.I.M., Schumacher, M.V., Trüby, T., Vuaden, E. 2007. Avaliação da devolução de serapilheira em uma floresta Estacional Decidual em Itaara, RS, Brasil. *Ciência Florestal* 17: 187-196.
- Vogel, H.L.M.I., Lorentz, L.H., Oliveira, F.P. 2014. Serapilheira produzida em um fragmento de uma Floresta Estacional Subtropical no estado do Rio Grande do Sul. *Revista Ecologia e Nutrição Florestal* 2: 84-92.