

Variações recentes de elementos climáticos não dirigem padrões espaço-temporais em uma comunidade arbórea do Cerrado

Felipe Segala Ferreira & Fernando Roberto Martins

Introdução

A relação entre uma espécie e o seu ambiente se reflete na distribuição de sua abundância no espaço e no tempo. Assim, mudanças ambientais poderiam alterar os padrões espaço-temporais exibidos pelas comunidades vegetais (Legendre et al. 2010). Apesar de essas mudanças serem, geralmente, lentas e graduais, são capazes de promover alterações significativas dentro dos ecossistemas (Hobbie et al. 2003). Por isso, os estudos ecológicos de longo prazo trazem uma perspectiva necessária que permite identificar as causas de tendências na composição e abundância de espécies no espaço e no tempo (Collins 1992; Hofgaard 1993; Bullock et al. 2001; Hobbie et al. 2003).

O clima desempenha um importante papel ao dirigir padrões estruturais em comunidades vegetais, pois muitas plantas crescem e sobrevivem apenas dentro de certas amplitudes de temperatura e precipitação e podem ser deslocadas por competição ou podem não sobreviver se o clima mudar (Parmesan 1996; Walther et al. 2002). No século passado, a temperatura da Terra aumentou 0,5°C (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] 1996), o suficiente para alterar alguns sistemas ecológicos (McCarty 2002). Os efeitos negativos sobre as espécies se multiplicam quando mudanças climáticas regionais se somam às mudanças globais (IPCC 1996). No Brasil, o IPCC alerta sobre o aumento da intensidade da seca nos últimos 30 anos.

As espécies de plantas do Cerrado, a savana tropical brasileira, estão distribuídas, principalmente, em função da estacionalidade das chuvas, dos episódios recorrentes de fogo e dos solos distróficos profundos, bem drenados e com altas concentrações de alumínio (Eiten 1972). Mas, apesar da estacionalidade climática (~ 5 a 6 meses secos), a disponibilidade de água não parece ser um fator limitante para a fisiologia de muitas espécies de plantas (Oliveira & Gibbs 2000). Isso se deve aos solos profundos, que são capazes de armazenar grande quantidade da água que proveio das chuvas durante a estação úmida. Sendo assim, as espécies do Cerrado, que dependem da estacionalidade regular de chuvas, seriam prejudicadas se a estação seca se prolongasse (Enquist & Leffler 2001). Além disso, o aumento da extensão e da persistência das queimadas poderia acarretar perda de espécies, mesmo elas sendo adaptadas à presença recorrente do fogo. Moreira (2000) e Roitman et al. (2008) mostraram aumento no número de espécies em áreas de Cerrado protegidas contra o fogo durante 28 e 13 anos, respectivamente .

Mesmo com o aumento das temperaturas globais e regionais ao longo dos anos, baixas temperaturas ($\leq 2^{\circ}\text{C}$) acompanhadas de geada no inverno também são uma condição meteorológica que, eventualmente, afeta negativamente muitas espécies do Cerrado. Durante os episódios de geada, a parte aérea das plantas é significativamente danificada e alguns indivíduos morrem, acarretando mudanças na distribuição de abundância e no número de espécies da comunidade (Silberbauer-Gottsberger et al. 1977; Monteiro & Durigan 2004). Consequentemente, a dinâmica da comunidade desorganiza-se (Monteiro & Durigan 2004) e a re-organização das espécies pode gerar uma configuração espacial diferente daquela anterior ao distúrbio. Porém, mesmo diante dessas possibilidades, a influência das variações de elementos climáticos recentes na organização das comunidades vegetais do Cerrado é pobremente entendida. Os raros

trabalhos desenvolvidos no curto prazo (Silberbauer-Gottsberger et al. 1977; Monteiro & Durigan 2004) perdem importantes informações sobre as tendências da dinâmica da comunidade ao longo do tempo e contrastam com o grande esforço no desenvolvimento de estudos que tratam da resposta da vegetação à presença do fogo (Sanaiotti & Magnusson 1995; Hoffmann 1996; Hoffmann 1998; Felfili et al. 2000; Moreira 2000; Gardner 2006; Roitman et al. 2008).

A introdução recente de ferramentas de análise numérica contribuiu para a investigação dos padrões espaço-temporais, cujos processos se baseiam em mudanças ambientais. Legendre et al. (2010) propuseram um modelo de análise de variância que testa a interação entre espaço e tempo e dispensa a replicação amostral. Segundo os autores, a presença de uma interação significativa poderia indicar que a estrutura da comunidade variou ao longo do tempo em resposta a mudanças climáticas, por exemplo. Nosso objetivo foi testar a hipótese de que variações recentes de elementos climáticos alteram o padrão espaço-temporal de uma comunidade arbórea do Cerrado. Para testar essa hipótese, aplicamos a dados coletados durante 16 anos uma análise de variância que analisa a interação entre espaço e tempo e usamos as seguintes questões como guia: (a) A estrutura espacial da comunidade arbórea modifica-se ao longo do tempo? (b) Se sim, como a estrutura da comunidade varia ao longo do tempo? e (c) Quais elementos climáticos estariam correlacionados à variação espaço-temporal da estrutura da comunidade?

Material e métodos

Desenho amostral e área de estudo

Investigamos a presença de interação espaço-temporal em parcelas permanentes localizadas em uma comunidade do Cerrado (22°15'51''S e 47°51'10''W, 760 m), no

município de Itirapina, estado de São Paulo, sudeste do Brasil. Os dados abrangeram amostragens anuais de 1994 a 2011, exceto 1998 e 2000. Foram amostrados os indivíduos vivos e mortos em pé com diâmetro do tronco no nível do solo (DAS) ≥ 3 cm em 64 parcelas contíguas de 5 x 5 m (0,16 ha no total). Para explicar uma possível variância espaço-temporal utilizamos os seguintes elementos climáticos: temperaturas máximas e mínimas absolutas, precipitação anual total, número de meses meteorologicamente secos (chuva < 100 mm; Keller et al. 2004) e o número de meses biologicamente secos. Um mês é biologicamente seco quando a precipitação total mensal $P \leq 2T$, em que T é a temperatura média do mês considerado. Os dados climáticos foram obtidos junto a Embrapa Pecuária Sudeste¹, que mantém uma estação meteorológica localizada a ~ 30 km da área de estudo.

Interação espaço-temporal

Primeiramente, construímos uma matriz de abundância com 16 amostras (16 anos) e 121 espécies mais as árvores mortas e então aplicamos a transformação $\log(x+1)$. Para testar a interação entre o espaço e o tempo, ou seja, a variação da estrutura espacial da comunidade ao longo do tempo, utilizamos a análise de variância espaço-temporal, um algoritmo proposto por Legendre et al. (2010a). O modelo executa a análise de variância sem a necessidade da replicação espacial e contemporânea, um dos pressupostos da clássica ANOVA two-way. Para contornar esse problema, o algoritmo define estratos a partir das amostras vizinhas e estes contêm as replicatas. Realizamos a análise para cada espécie, as árvores mortas e para a comunidade total usando o Modelo 5 com 999 permutações, implementado na função “STImodels” disponível no pacote STI (Legendre et al. 2010b) para a linguagem estatística R.

¹ <<http://www.cppse.embrapa.br/080servicos/dados-meteorologicos/>>

Descrição temporal da estrutura da comunidade e correlação com a seca biológica

Quantificamos as variações na estrutura da comunidade ao longo do tempo por meio dos índices da Mudança Média de Postos (MMP) e da Persistência Proporcional (PP), que são medidas da estabilidade da comunidade (detalhes dos cálculos em Collins et al. 2008). A MMP determina o valor da mudança relativa dos postos de abundância das espécies ao longo do tempo, que, em outras palavras, expressa a variação relativa da abundância ano a ano. Segundo Collins et al. (2008), esse índice permite uma visualização mais acurada da dinâmica da comunidade do que o ajustamento de curvas de abundância. A PP determina os ganhos e perdas de espécies de um ano para o outro. O cálculo desses índices foi realizado no Excel. Para testar se os dois índices estavam relacionados com o número de meses biologicamente secos utilizamos a análise de regressão.

Análise multivariada

Mediante a análise de ordenação NMS (Nonmetric Multidimensional Scaling; McCune & Grace 2002), determinamos quais elementos climáticos (temperaturas máximas e mínimas absolutas, precipitação anual total, número de meses meteorologicamente secos e o número de meses biologicamente secos.) que melhor explicaram a variação da abundância e da riqueza de espécies no espaço e no tempo. Utilizamos a matriz transformada de abundância com 16 amostras e 121 espécies mais as árvores mortas e decidimos pelos elementos climáticos que apresentaram o maior coeficiente de correlação (r) com os eixos que continham a máxima variância explicada. Realizamos a análise de ordenação no programa PC-ORD 5 (McCune & Mefford 1999).

Resultados

Foram amostrados 20.009 indivíduos com DAS ≥ 3 cm, entre os anos de 1994 e 2011, divididos em 121 espécies mais as árvores mortas em pé. A temperatura máxima absoluta variou entre 32,8 a 37°C, a temperatura mínima absoluta entre -0,3 a 6,8°C, a precipitação anual total entre 1081,2 a 1913,2 mm e o número de meses biologicamente secos entre 1 e 7.

Interação espaço-temporal

Cinquenta e três espécies mais as árvores mortas (44,3% do total) mudaram significativamente sua estrutura espacial ao longo dos 16 anos, enquanto 68 (55,7%) espécies não apresentaram mudanças significativas. Também detectamos mudanças significativas na distribuição espacial das espécies no nível da comunidade ($R^2=0,14$; $P = 0,001$ após 999 permutações).

Análise de ordenação

A ordenação NMS revelou um gradiente, no qual a estrutura da comunidade variou principalmente em função do número de meses biologicamente secos (Figura 1). Os eixos 1 e 2 explicaram, respectivamente, 25% e 72% da variância contida nos dados. O número de meses biologicamente secos apresentou a maior correlação ($r = -0,48$) com o eixo 2. O gradiente exibido propõe uma tendência do aumento do número de meses biologicamente secos ao longo dos anos.

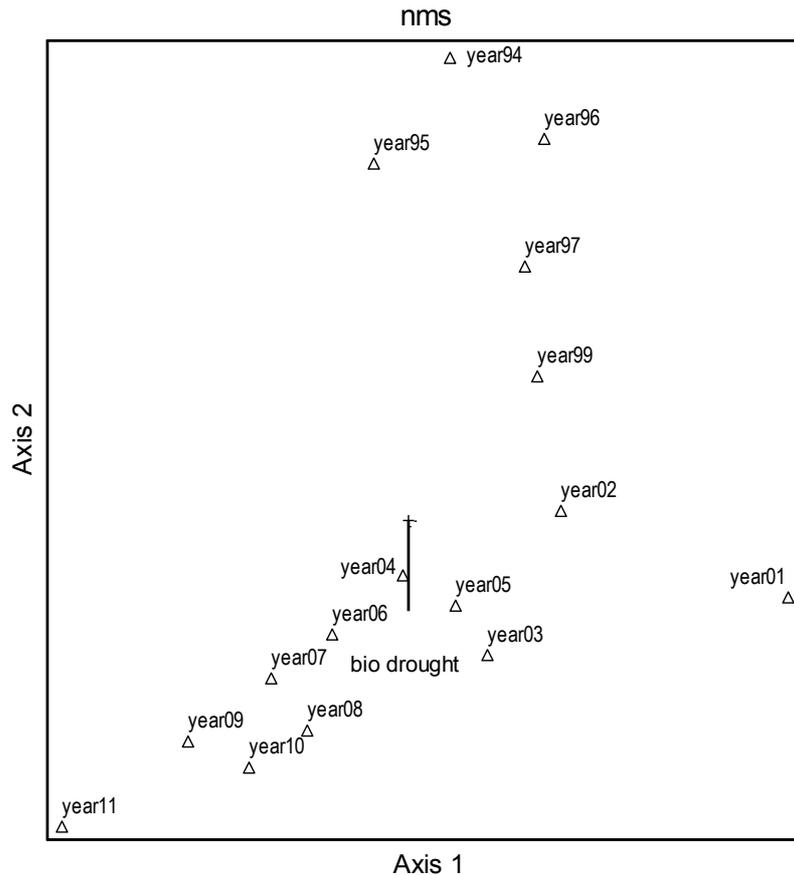


Figura 1. Ordenação NMS da abundância total de cada espécie em cada ano (year94, year95...year11) em relação aos elementos climáticos temperaturas máxima e mínima absolutas, precipitação anual total e número de meses biologicamente secos. Por causa da direção dos vetores no espaço de ordenação apenas o número de meses biologicamente secos (bio drought) aparece na figura.

Descrição temporal da estrutura da comunidade

Utilizamos a MMP e a PP para quantificar as mudanças na comunidade ao longo dos anos. A MMP foi estável na maior parte do tempo. Houve um decréscimo nos postos entre os anos de 1995 e 1996 e uma pequena oscilação entre os anos de 2003 e 2007, sugerindo um equilíbrio na abundância das espécies (Figura 2A). Por outro lado, a PP foi variável ao longo dos anos. A composição da comunidade foi o resultado da

variação de ~5-20% nos ganhos e perdas de espécies (Figura 2B). Não houve relação entre a mudança média de postos ($P = 0,935$) e nem da persistência proporcional ($P = 0,533$) com o número de meses biologicamente secos.

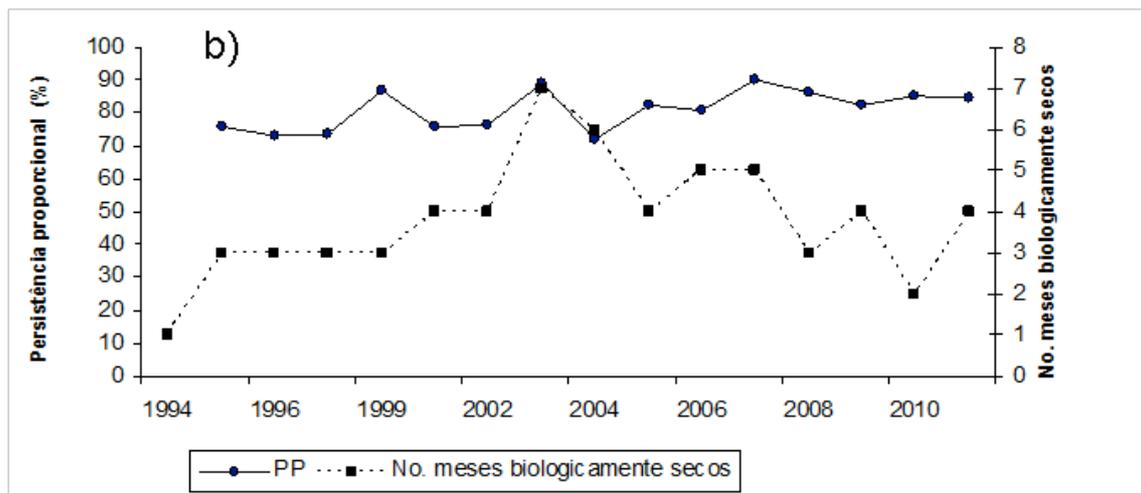
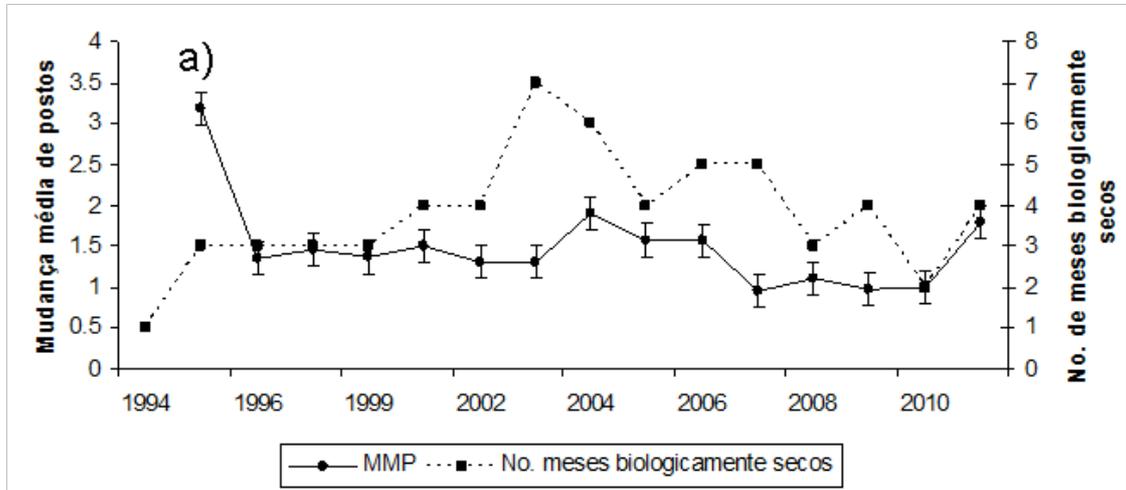


Figura 2. Medidas da dinâmica de uma comunidade do Cerrado (linha cheia) e do número de meses biologicamente secos (linha tracejada). (A) mudança média de postos e (B) porcentagem da persistência proporcional.

Discussão

Nossos resultados mostraram que a estrutura espacial da comunidade variou significativamente durante o período do estudo. Esse resultado permite-nos sugerir que as mudanças espaciais poderiam ter se originado de processos dirigidos por mudanças

climáticas (Legendre et al. 2010). Por isso, ordenamos os dados temporais multiespécies da comunidade em função de elementos climáticos. Acreditávamos que a temperatura mínima absoluta representaria períodos com alta probabilidade de geadas e com impactos negativos sobre a estrutura da comunidade. Pensávamos que a sobrevivência das árvores e dos arbustos tropicais seria limitada por suas estratégias em resistir a baixas temperaturas (Loik & Redar 2003; Gutschick & BassiriRad 2003). Segundo alguns autores, a distribuição das espécies do cerrado está restrita a ambientes onde as geadas são muito raras ou ausentes (Eiten 1972; Silberbauer-Gottsberger et al. 1977). Por exemplo, no ano de 1994 e em 2003, as temperaturas mínimas absolutas foram, respectivamente, $-0,3^{\circ}\text{C}$ e 2°C , circunstância em que houve a chance de pelo menos um evento de geada. Apesar disso, a ordenação NMS não apontou a temperatura mínima absoluta como uma das variáveis modeladoras da estrutura da comunidade. Uma explicação plausível seria que na porção sul da província dos Cerrados, onde as temperaturas de congelamento não são incomuns e onde se localiza a área de estudo, houve uma seleção das espécies resistentes ao congelamento (Monteiro & Durigan 2004).

A sazonalidade climática exerce uma forte influência sobre a vegetação do cerrado, pois está diretamente relacionada com a disponibilidade de água no solo. Quando um mês é considerado biologicamente seco, o valor da precipitação mensal foi menor do que o dobro da temperatura média, e o estoque de água nas camadas superficiais do solo foi perdido por evapotranspiração. Então, nesse caso, há uma falta real de água para as plantas. Por outro lado, a seca meteorológica não implica, necessariamente, em falta de água. Em 1994, por exemplo, cinco meses foram meteorologicamente secos (pluviosidade ≤ 100 mm) e dois foram biologicamente secos. Durante os meses com seca meteorológica, as poucas chuvas foram bem distribuídas ao

longo dos meses, de modo que a disponibilidade de água, mesmo restrita, foi constante. A distribuição da pluviosidade durante os meses meteorologicamente secos foi semelhante para os outros anos. Assim, parece que a falta de água não foi extrema durante os períodos de 5 e 6 meses de seca sazonal, pois pequenos volumes de chuvas foram bem distribuídos ao longo dos meses meteorologicamente secos. O resultado da ordenação apontou o número de meses biologicamente secos como o elemento climático que mais explicou a variação da estrutura da comunidade ao longo do tempo. Porém, a relação entre os índices descritores da comunidade, mudança média de postos e persistência proporcional, não foi significativa. Portanto, a dinâmica da comunidade não é determinada pela seca biológica, embora o número de meses biologicamente secos tenha um papel nessa dinâmica.

Referências

- BULLOCK, J.M., FRANKLIN, J., STEVENSON, M.J., SILVERTOWN, J., COULSON, S.J., GREGORY, S. J. & TOFTS, R. 2001. A Plant Trait Analysis of Responses to Grazing in a Long-Term Experiment. *Journal of Applied Ecology* 38: 253-267.
- COLLINS, S.L., SUDING, K.N., CLELAND, E.E., BATTY, M., PENNINGS, S.C., GROSS, K.L., GRACE, J.B., GOUGH, L., FARGIONE, J.E. & CLARK, C.M. 2008. Rank Clocks and plant community dynamics. *Ecology* 89: 3534–3541.
- COLLINS, S.L. 1992. Fire frequency and community heterogeneity in tallgrass prairie vegetation. *Ecology* 73: 2001-2006.
- ENQUIST, B.J. & LEFFLER, A. J. 2001. Long-Term Tree Ring Chronologies from Sympatric Tropical Dry-Forest Trees: Individualistic Responses to Climatic Variation. *Journal of Tropical Ecology* 17: 41-60.

FELFILI, J.M., REZENDE, A.V., JÚNIOR, M.C.S., SILVA, M.A. 2000. Changes in the Floristic Composition of Cerrado sensu stricto in Brazil over a Nine-Year Period. *Journal of Tropical Ecology* 16:579-590.

GARDNER, T.A. 2006. Tree-Grass Coexistence in the Brazilian Cerrado: Demographic Consequences of Environmental Instability. *Journal of Biogeography* 33:448-463.

GUTSCHICK V.P. AND BASSIRIRAD H. 2003. Extreme events as shaping physiology, ecology, and evolution of plants: toward a unified definition and evaluation of their consequences. *New Phytologist* 160: 1-21.

HOBBIE, J.E., CARPENTER, S.R., GRIMM, N.B., GOSZ, J.R. & SEASTEDT, T.R. 2003. The US Long Term Ecological Research Program. *BioScience* 53:21-32.

HOFFMANN, W.A. 1998. Post-Burn Reproduction of Woody Plants in a Neotropical Savanna: The Relative Importance of Sexual and Vegetative Reproduction. *Journal of Applied Ecology* 35: 422-433.

HOFFMANN, W.A. 1996. The Effects of Fire and Cover on Seedling Establishment in a Neotropical Savanna. *Journal of Ecology* 84: 383-393.

HOFGAARD, A. 1993. 50 years of change in a Swedish boreal old-growth *Picea abies* forest. *Journal of Vegetation Science* 4: 773-782.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 1996. Climate change 1995: the science of climate change. Contribution of working group I to the second assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, New York.

KELLER, M., ALENCAR, A., ASNER, G.P., BRASWELL, B., BUSTAMANTE, M., DAVIDSON, E., FELDPAUSCH, T., FERNANDES, E., GOULDEN, M., KABAT, P., KRUIJT, B., LUIZÃO, F., MILLER S., MARKEWITZ, D., NOBRE, A.D., NOBRE, C.A., FILHO, N.P., ROCHA, H., DIAS, P.S., VON RANDOW, C. & VOURLITIS,

G.L. 2004. Ecological Research in the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia: Early Results. *Ecological Applications* 14:S3-S16.

LEGENDRE, P., De CACERES, M. & BORCARD, D. 2010a. Community surveys through space and time: testing the space-time interaction in the absence of replication. *Ecology* 91:262-272.

LEGENDRE, P., De CACERES, M. & BORCARD, D. 2010b. STI: space-time interaction in ANOVA without replicates. R package version 1.0.2. <http://cran.r-project.org/>

LOIK M.E. AND REDAR S.P. 2003. Freezing tolerance and cold acclimation for seedlings of *Artemisia tridentata* along an elevation gradient. *Journal of Arid Environments* 54: 769-782.

McCARTY, J.P. 2002. Ecological Consequences of Recent Climate Change. *Conservation Biology* 15:320–331.

MCCUNE, B. AND M. J. MEFFORD. 1999. PC-ORD 5. Multivariate Analysis of Ecological Data. MjM Software, Gleneden Beach, Oregon, U.S.A.

MCCUNE, B. & GRACE, J. B. 2002. Analysis of Ecological Communities. MjM Software Design, Gleneden Beach, Oregon.

MOREIRA, A.G. 2000. Effects of Fire Protection on Savanna Structure in Central Brazil. *Journal of Biogeography* 27:1021-1029.

MONTEIRO, P.B. & DURIGAN, G. 2004. Changes in Cerrado Vegetation after Disturbance by Frost (São Paulo State, Brazil). *Plant Ecology* 175:205-215.

OLIVEIRA, P.E., & P. E. GIBBS. 2000. Reproductive biology of woody plants in a cerrado community of Central Brazil. *Flora* 195:311-329.

PALMER, W.C. 1965. Meteorological drought. US Weather Bureau Res. N° 45. Washington, 58p.

- PARMESAN, C. 1996. Climate and species' range. *Nature* 382:765–766.
- ROITMAN, I., FELFILI, J.M.A. & REZENDE, V. 2008. Tree dynamics of a fire-protected cerrado sensu stricto surrounded by forest plantations, over a 13-year period (1991–2004) in Bahia, Brazil. *Plant Ecology* 197:255–267.
- SANAIOTTI, T.M. & MAGNUSSON, W.E. 1995. Effects of Annual Fires on the Production of Fleshy Fruits Eaten by Birds in a Brazilian Amazonian Savanna. *Journal of Tropical Ecology* 11: 53-65.
- SILBERBAUER-GOTTSBERGER, I., MORAWETZ, W., GOTTSBERGER, G. 1977. Frost Damage of Cerrado Plants in Botucatu, Brazil, as Related to the Geographical Distribution of the Species. *Biotropica* 9: 253-261.
- WALTHER, G-R., POST, E., CONVEY, P., MENZEL, A., PARMESAN, C., BEEBEE, T.J. C., FROMENTIN, J-M., HOEGH-GULDBERG, O. & BAIRLEIN, F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416:389-395.