

**Universidade Federal de São Carlos**  
**Centro de Ciências Biológicas e da Saúde**  
**Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos**  
**Naturais**

Influência de borda sobre vegetação e microclima no  
cerrado paulista

**Pavel Dodonov**

São Carlos  
2011

**Universidade Federal de São Carlos**  
**Centro de Ciências Biológicas e da Saúde**  
**Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos**  
**Naturais**

Influência de borda sobre vegetação e microclima no  
cerrado paulista

**Pavel Dodonov**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Ecologia e Recursos Naturais, como  
parte dos requisitos para obtenção  
do título de Mestre em Ecologia

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Dalva Maria  
da Silva Matos

São Carlos  
2011

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

D646ib

Dodonov, Pavel.

Influência de borda sobre vegetação e microclima no cerrado paulista / Pavel Dodonov. -- São Carlos : UFSCar, 2011.

86 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.

1. Conservação. 2. Fragmentos florestais. 3. Cerrado. 4. Efeito de borda. I. Título.

CDD: 574.5247 (20<sup>a</sup>)

**Pavel Dodonov**

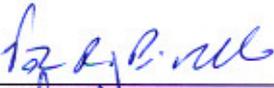
**Influência de borda sobre vegetação e microclima no cerrado paulista**

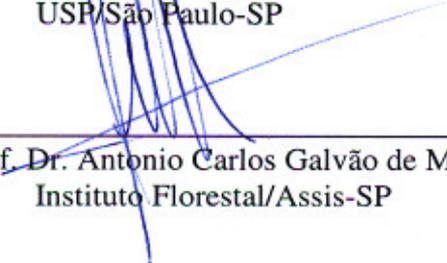
Dissertação apresentada à Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ecologia e Recursos Naturais.

**Aprovada** em 04 de fevereiro de 2011

**BANCA EXAMINADORA**

Presidente   
Profa. Dra. Dalva Maria da Silva Matos  
(Orientadora)

1º Examinador   
Profa. Dra. Vânia Regina Pivello  
USP/São Paulo-SP

2º Examinador   
Prof. Dr. Antonio Carlos Galvão de Melo  
Instituto Florestal/Assis-SP

*In our hands we hold the future, carry on  
In our hearts, eternally, we keep the flame...  
Burning deep inside forever, shining on  
And in our hearts for all eternity  
We keep the flame burning  
(Hammerfall, "Keep the flame burning")*

## Agradecimentos

Agradeço enormemente a todos que me ajudaram em campo, no reconhecimento das áreas, com identificação de gramíneas, analisando fotos de dossel, corrigindo meu script no R, e também por tornar os dois anos do meu mestrado uma época tão importante da minha vida. Me perdoem caso esqueça de alguém!

☺ Everton Recco, O Cara. Por me acompanhar em muuuuuitas viagens de campo, ser o único físico do mundo a conhecer (quase) todo o cerrado paulista, e pelos inesquecíveis nhoques, pela salada de frutas e legumes, e pelo 1 kg de macarrão comido em uma noite... por me ensinar a fazer cavalo de pau... por ficar tão feliz com todas as perspectivas de ir para Assis.....

☺ Rafael Xavier, por também ir comigo em muuuuuitas coletas, pela ajuda com coleta e triagem de gramíneas, e pela amizade em geral (since 2005, yeah!).

☺ Às pessoas mencionadas abaixo, pela ajuda em campo ou no caminho para o campo, e também por aquilo que está entre parênteses:

☺ Carolina “Cartolina” Zanelli (por não brigar comigo ao riscar o vidro com o podão), Mayla Willik Valenti (por ficar nos esperando no acostamento de uma borda muito horrível em Assis), Felipe “O Felipe” Oliveira (por falar *privet* ao rato de Vassununga), Roberto “Jedi” Ribeiro (por ir para Assis com um dia de aviso prévio e colocar *Nightfall* pra tocar na volta), Zenite Sentoma de Souza, Daniel B. B. “Mestre” Silva (por se assustar com a corda caindo no carro), Jessika S. de Oliveira (por não ficar chateada de termos que voltar de Assis alguns dias antes do esperado), Talita “Talis” Sampaio (por ter gostado tanto daquela cascavel furiosa em Vassununga), Fernanda

Tibério, Ariel Viscardi (pela ajuda em campo, triando gramíneas, analisando dossel...), Mariana Duó, Ingrid “Gina” Paneczko, Julie Scaloppi (por aprender a reconhecer *Miconia albicans*, *Schefflera vinosa* e mais algumas coisas em dois dias), Giordano Ciochetti, Raquel Negrão (por falar que parecia que tem dois corpos debaixo da lona em cima do meu carro), Raquel Miatto, Juliana Freitas, Vitor S. Gomes, Adriana Nepomuceno, Luana “Lããããã” Hortenci (por querer ir para Vassununga mas se contentar com o Jataí), Patrícia Lagos, Matheus Reis, Adalcio Müller, Alice Albuquerque (por ter ido medir altura de dossel comigo em um natal chuvoso), Alice Kimie M. Morita, Wagner Chiba, Ana Carolina Nery (por tornar possível minha primeira ida para Assis), Melina Alcalá, Anderson “Drizzt” Souza e Gustavo Carvalho (pela ajuda com o R)... Espero não ter esquecido de ninguém! Mas caso tenha esquecido, considere-se agradecid@ também. :}

☺ Também agradeço a algumas pessoas que, mesmo não tendo colaborado diretamente com este trabalho, foram importantes, de algum modo, nestes dois anos do mestrado: Yashiro Yamamoto Sensei, Dalton Yamamoto Sensei, Ariadne Sabbag, Débora Caires, Dani Bortoluzo, Marina Vasques, Cris Lim, Mariana Zanelli, Anderson Nakano e algumas que eu já agradei acima (Luana, Talis, Rafael, Fernanda, Mayla...).

☺ Um agradecimento muito grande ao chefe do PEV, Heverton, pelo apoio e por me ligar para perguntar se deu tudo certo na viagem; ao Antonio C. G Melo e à Giselda Durigan, pelo apoio em Assis e por ajudar com informações históricas; mais um agradecimento ao Melo por viabilizar minhas coletas em Sta Bárbara; ao Luiz Carlos, chefe do Jardim Botânico de Bauru, pelo apoio, e informações históricas; ao proprietário da Fazenda América, por permitir as coletas no cerrado localizado na sua propriedade; a

Paulo Ruffino, pelo apoio em Itirapina; a Edson Montilha, pelo apoio no Jataí; a Aduino Fioruci, chefe da EECSB, pelas informações históricas e apoio em Santa Bárbara.

☺ Agradeço também à República Gato Morto (Bauru), à Júlia Dantas e ao Bruno “Burger”, pela hospedagem em Bauru e por transformar uma viagem de campo em dois dias de férias comendo bauru original e panquecas (a despeito do meu leve resfriado, desculpa ter passado ele pra vocês!).

☺ Enormous thanks to Prof. Karen Harper (Dalhousie University), for help, support and incentive in the final part of my work

☺ E um agradecimento muito muito muito grande à minha orientadora profa. Dalva Matos, por ser legal, pela ajuda na escrita do trabalho, e por não brigar comigo. ☺

☺ Aos professores Alberto Peret, Marco Batalha e Maria Elina Bichuette, pelos valiosos comentários feitos na qualificação, e a Vânia Regina Pivello e Antônio Carlos Galvão de Melo, por terem aceitado o convite a participar da banca de defesa e pelos comentários feitos.

☺ Finalmente, agradeço à FAPESP pelo financiamento do projeto inteiro (bolsa + reserva técnica), e ao PPGERN por financiar duas viagens de reconhecimento.

☺ Aos meus pais por me deixarem fazer tudo isso sem brigar (muito) comigo.

**Dedico este trabalho a todos que estudam e protegem o cerrado, principalmente o cerradinho da UFSCar. Em especial, à Trilha da Natureza e ao Coletivo do Cerrado.**

***We shall stand together, one by one, this world is sacred!***

## Sumário

Sumário_____	7
Resumo_____	8
Abstract_____	9
Introdução_____	10
Fragmentação de hábitat_____	14
Influência de borda sobre microclima_____	16
Influência de borda sobre estrutura da vegetação arbórea_____	20
Influência de borda sobre a comunidade vegetal_____	22
Influência de borda sobre animais_____	26
Estudos e modelos teóricos_____	28
Material e métodos_____	33
Áreas de estudo_____	33
Desenho amostral_____	44
Coleta e tratamento de dados_____	46
Análise de dados_____	48
Resultados_____	51
Temperatura, umidade do ar e vento_____	55
Estrutura de dossel e irradiância_____	58
Graminóides_____	59
Discussão_____	62
Conclusões e implicações para conservação_____	72
Referências_____	74
Apêndice. Código de R usado para fazer a análise da influência de borda usando o procedimento RTEI – <i>Randomization test for assessing edge influence</i> _____	83

## Resumo

Existe ampla variação nos padrões de influência de borda (IB) dentro de uma região, devido a fatores como estrutura da vegetação, uso da terra adjacente, orientação e contraste da borda. Entender esta variação é importante para o planejamento direcionado à conservação. Nós estudamos IB sobre aspectos de microclima e vegetação em sete fragmentos de cerrado no Sudeste do Brasil, amostrando áreas tanto de savana quanto de floresta. Nós delimitamos transectos perpendiculares a 14 bordas de cerrado adjacentes a pastagens, estradas, cana-de-açúcar, silvicultura, área urbana e aceiros. Quando significativa, a distância de influência de borda variou de 15 a 80 m para temperatura, 2 a 50 m para umidade do ar, 2 m para velocidade do vento, 2 a 20 m para altura máxima de vegetação, 0 a 100 m para cobertura de dossel, 0 a 20 m para biomassa de gramíneas exóticas e 0 a 10 m para biomassa de gramíneas nativas. A maior IB foi observada em áreas adjacentes a pastagens, mas fatores como orientação, estrutura da vegetação e uso da terra não foram suficientes para explicar a variabilidade observada. Para propósitos de conservação visando reduzir a IB, nós recomendamos a criação de zonas de amortecimento entre o cerrado e áreas adjacentes com outros usos da terra, especialmente em fragmentos adjacentes a pastagens e estradas.

Palavras-chave: Cerrado, efeito de borda, microclima, cobertura de dossel, altura máxima da vegetação, *Urochloa decumbens*, *Melinis minutiflora*, capim-braquiária, capim-gordura, uso de solo.

## **Abstract**

There is much variation in patterns of edge influence (EI) within a region due to factors such as vegetation structure, adjacent land use, orientation and edge contrast, and assessment of this variation is important for conservational planning. We studied EI on aspects of microclimate and vegetation in seven cerrado fragments in South-Eastern Brazil, sampling both savanna and forest vegetation. We located transects perpendicular to 14 cerrado edges adjacent to pastures, highways, sugarcane, silviculture, urban area, and forest roads. When significant, distance of EI varied from 15 to 80 m for temperature, 2 to 50 m for air moisture, 2 to 20 m for maximum vegetation height, 2 m for wind speed, 0 to 100 m for canopy cover, 0 to 20 m for exotic grass biomass, and 0 to 10 m for native grass biomass. The largest EI was observed in areas adjacent to pastures, but factors such as orientation, vegetations structure and land use were not sufficient to explain the observed variability. For conservation purposes, we recommend that buffers should be created between cerrado and the adjacent land use, especially in fragments adjacent to pastures and highways, in order to reduce EI.

Keywords: Cerrado, edge effect, microclimate, canopy cover, canopy height, *Urochloa decumbens*, *Melinis minutiflora*, Brachiaria grass, Molassa grass, land use.

## Introdução

A influência de borda<sup>1</sup> tem um grande impacto em ecossistemas fragmentados (Harper et al. 2005; Murcia 1995; Ries et al. 2004; Ries & Sisk 2004), e pode ser entendida como um conjunto de mudanças detectáveis na estrutura, composição e/ou função de um ecossistema adjacente a uma borda, quando comparado com as condições de referência no interior do mesmo ecossistema (Harper et al. 2005). Essa influência pode variar entre ecossistemas (Harper et al. 2005) e dentro do mesmo ecossistema, devido a fatores como tipo de uso de terra adjacente (Cilliers et al. 2008; Laurance & Curran 2008; Pohlman et al. 2007), idade da borda (Harper et al. 2005), tamanho do fragmento (Didham & Lawton 1999; Mascarúa Lopes et al. 2006), orientação (Gehlhausen et al. 2000; Honnay et al. 2002) e estrutura da borda (Cadenasso & Pickett 2000; Didham & Lawton 1999). No caso da influência de borda sobre o microclima, também podem ocorrer variações ao longo do ano (Pohlman et al. 2007). Sendo assim, torna-se difícil generalizar a extensão da influência de borda em uma dada região ou tipo de ecossistema e a sua importância ecológica. Levando em conta a importância do conhecimento sobre a função das bordas no manejo de áreas naturais, estudos em diferentes fragmentos do mesmo tipo de vegetação e na mesma região são necessários para um melhor entendimento da variação que a influência de borda pode ter.

Estudos que analisam a variação nos padrões de influência de borda em uma mesma região normalmente comparam, no máximo, quatro tipos de borda, geralmente em poucos fragmentos (Didham & Lawton 1999; Gehlhausen et al. 2000; Delgado et al.

---

<sup>1</sup> Usamos o termo “influência de borda” ao invés do mais usual “efeito de borda” por motivos históricos, seguindo a recomendação de Harper et al. (2005). Além disso, o termo equivalente em inglês – *edge influence* – é bastante comum em artigos internacionais, e o termo *Depth of Edge Influence*, ou *DEI*, é bastante comum na literatura específica.

2007; Pohlman et al. 2007; Cilliers et al. 2008). Entretanto, estudos em mais áreas, e contemplando variações no tipo de vegetação, uso de solo e orientação, podem ser úteis para mostrar mais claramente a variabilidade regional na influência de borda, algo ainda pouco explorado (Karen Harper, com. pess.). Além disso, também há um contraste nos estudos sobre a influência de borda em diferentes biomas; enquanto a maioria foi conduzida em florestas (Anderson & Burgin 2002; Cadenasso & Pickett 2000; Delgado et al. 2007; Didham & Lawton 1999; Gehlhausen et al. 2000; Goosem 2000; Harper et al. 2004; Harper & MacDonald 2001; Harper & Macdonald 2002; Harper et al. 2007; Heithecker & Halpern 2007; Honnay et al. 2002; Laurance et al. 1998; Marchand & Houle 2006; Mascarúa Lopes et al. 2006; Pohlman et al. 2007; Siqueira et al. 2004), estudos em vegetação campestre e savânica são pouco frequentes (Cilliers et al. 2008; Fletcher 2005; Fraser & Whitehead 2005; Jardim & Batalha 2009; Morgan 1998; Pivello et al. 1999a; Pivello et al. 1999b; Santos & Santos 2008).

O cerrado ocorre em áreas de clima estacional com inverno seco e verão chuvoso, em solos distróficos ricos em alumínio (Coutinho 1978; Gottsberger & Silberbauer-Gottsberger 2006). A maior parte da sua área é caracterizada pela vegetação savânica conhecida como cerrado *sensu stricto* (cobertura arbórea entre 40 e 60% e dossel mais baixo do que 7 m) e campo cerrado (savana aberta, com cobertura arbórea entre 10 e 40%, dominada por arbustos e árvores baixas); também existem áreas ocupada pelo cerradão, uma floresta floristicamente similar às fisionomias savânicas do cerrado, com cobertura arbórea acima de 60% e dossel entre 7 e 15 m, além de áreas de campo limpo e campo sujo (Coutinho 1978; Gottsberger & Silberbauer-Gottsberger 2006; Ribeiro & Walter 2008). A variação fisionômica do cerrado como um todo forma um gradiente,

desde o campo limpo até o cerradão, ao longo do qual ocorre uma substituição gradual de espécies (Coutinho 1978). Assim, a vegetação do cerrado é comumente classificada em campo limpo (fisionomia campestre); campo sujo, campo cerrado, cerrado *sensu stricto* e cerrado denso (fisionomias savânicas); e cerradão (fisionomia florestal) (Ribeiro & Walter 2008). Devido ao seu alto grau de endemismo e de ameaça, o cerrado é um dos 25 *hotspots* globais (Myers 2003; Myers et al. 2000). Mais de 55% da área original do cerrado havia sido convertida em pastagens ou outros usos de solo até 2005 (Klink & Machado 2005); no Estado de São Paulo o cerrado originalmente ocupava 14% do território, mas mais de 85% da área de cerrado foi convertida entre 1965 e 2002, e atualmente há apenas 42 fragmentos com mais de 400 ha (Durigan 2006). As principais ameaças à conservação do cerrado, além da fragmentação, são: invasão por gramíneas invasoras, pastoreio e fogo fora da época natural (Durigan *et al.* 2007); as matrizes com a pior influência sobre o cerrado são pastagens, áreas urbanas e estradas (Durigan et al. 2007), embora o uso de fogo e agrotóxicos em plantios de cana-de-açúcar também pode provocar sérios impactos no cerrado adjacente.

No cerrado paulista, a formação florestal de cerradão, caracterizada por um dossel contínuo entre 7 e 15 m de altura (Gottsberger & Silberbauer-Gottsberger 2006), é atualmente mais comum do que as fisionomias mais abertas (Durigan et al. 2007); fisionomias mais abertas estariam restritas a solos mais pobres ou arenosos, e/ou a áreas sujeitas a incêndios periódicos (Durigan 2006). Além disso, fragmentos de cerrado no estado de São Paulo fazem contato com diferentes tipos de matrizes, tais como cana-de-açúcar, silvicultura de *Pinus* e *Eucalyptus*, estradas e pastagens (Durigan et al. 2007). Devido a essa variação fisionômica e nos diferentes usos do solo, o cerrado em geral, e

especialmente o cerrado paulista, oferece boas oportunidades para estudos sobre a influência de borda e como ela varia em uma região.

Entre os poucos trabalhos encontrados sobre influência da borda no cerrado, Pivello et al. (1999a, b) estudaram influência de borda sobre vegetação herbácea em fragmentos de cerrado em São Paulo; Lima-Ribeiro (2008) detectou influência de borda sobre altura e área basal de árvores no cerradão goiano; França e Marini (2009) estudaram predação de ninhos no cerradão de Brasília, sem detectar diferença entre borda, caracterizada como uma faixa de 200 m de largura, e interior do fragmento; Jardim e Batalha (2009) estudaram influência de borda sobre síndromes de polinização em área de cerrado *sensu stricto* em Goiás, detectando redução na quantidade de plantas zoocóricas próximo à borda. No entanto, até o presente momento, não há estimativas da distância de influência de borda, ou seja, distância da borda em que estas mudanças são perceptíveis.

O nosso objetivo foi comparar a influência de borda sobre microclima e vegetação em áreas de cerrado com diferentes fitofisionomias e expostas a diferentes matrizes, no Estado de São Paulo, visando fornecer estimativas de distância de influência de borda, e explorar a sua variabilidade regional. Nós esperamos que a influência de borda seja mais perceptível e se estenda a distâncias maiores em bordas de maior contraste (Harper et al. 2005). Também fizemos uma revisão bibliográfica sobre influência de borda em diferentes ecossistemas, no Brasil e em outros países.

## **Fragmentação de hábitat**

A subdivisão de áreas de vegetação natural em manchas ou fragmentos, devido à alteração da vegetação adjacente, é um processo que traz sérias ameaças à biodiversidade, e consequentemente tem sido alvo de diversos estudos. A redução da área de hábitat pode levar à perda de espécies ao reduzir o tamanho das populações, deixando-as mais suscetíveis à extinção, ou ao reduzir a quantidade de habitats disponíveis (Pires et al. 2006). A quantidade de área florestada também influencia a temperatura do local, como mostra um estudo sobre variação do microclima em escala de paisagem (Vanwalleghem & Meentemeyer 2009). Existem outros efeitos associados à fragmentação, tais como a quebra de conectividade entre fragmentos e a influência de borda (Saunders et al. 1991), mas os impactos decorrentes da perda de área em geral são mais pronunciados do que os da fragmentação *per se*, como mostrado por uma revisão de todas as publicações existentes até 2003 (Fahrig 2003).

Comumente, maior área é associada a maior riqueza de espécies. Por exemplo, um estudo com morcegos em Londrina (PR) detectou maior riqueza em um fragmento 680 ha do que em fragmentos menores, entre 1 e 86 ha, indicando maior qualidade ambiental deste fragmento (Reis et al. 2003). Em geral, fragmentos pequenos sustentam populações pequenas, que são mais vulneráveis a processos estocásticos que podem levar à sua extinção (Pires et al. 2006). No entanto, a relação positiva entre número de espécies e área do fragmento não pode ser considerada uma regra, visto que não foi detectada em diversos outros estudos (Olifiers & Cerqueira 2006). Além de influenciar abundância e riqueza de espécies, redução do tamanho do fragmento também pode influenciar processos ecológicos como polinização e decomposição, como mostra uma revisão

bibliográfica dos efeitos da fragmentação sobre insetos (Didham et al. 1996). Além disso, o tamanho da área florestada foi um dos fatores ambientais a influenciar a variação térmica em uma região no oeste dos Estados Unidos, junto com a altitude e a distância até a costa (Vanwallegem & Meentemeyer 2009).

O isolamento do fragmento que é influenciado pela distância entre os fragmentos e pela conectividade entre eles, por exemplo por meio de corredores (Saunders et al. 1991). Um estudo de simulação de manchas de hábitat ocupadas por borboletas detectou que, embora as taxas de extinção fossem maiores em fragmentos pequenos, a contribuição destes à dinâmica à paisagem era similar à de fragmentos grandes, contanto que estivessem próximos a outros fragmentos (Schultz & Crone 2005). Além disso, nesse mesmo estudo, a probabilidade de um fragmento ser colonizado não estava relacionado à área dos fragmentos próximos, mas à distância até eles, indicando que a conectividade pode ser pelo menos tão importante quanto a área no contexto da paisagem (Schultz & Crone 2005).

Um outro aspecto que deve ser considerado é a influência da escala espacial nas respostas das diferentes espécies, sendo que muitas respondem em escalas pequenas, abaixo de 100 m. Assim, a polinização de uma espécie arbórea na Espanha este correlacionada com a quantidade de hábitat em um raio de 100 m; mas, para a mesma espécie, a frugivoria esteve mais relacionada à quantidade de hábitat em um raio 10 m apenas (Garcia & Chacoff 2007). Distúrbios com 4 a 8 m de raio reduziram significativamente a atividade de forrageamento de roedores em um campo abandonado ate a área de vegetação não-perturbada (Moenting & Morris 2006). Estes trabalhos estão relacionados ao que é conhecido por influência de borda – o processo no qual algum

aspecto da comunidade é alterado próximo à borda com outra comunidade (Harper et al. 2005).

### **Influência de borda sobre microclima**

Um dos resultados mais imediatos e perceptíveis da criação de uma borda em um ecossistema florestal é a mudança nas condições microclimáticas, como temperatura e umidade do ar (Murcia 1995; Saunders et al. 1991). Estas mudanças estão entre as principais consequências diretas da criação de uma borda, e podem causar mudanças na estrutura e composição da vegetação (Harper et al. 2005). O padrão mais comum em fragmentos florestais é o aumento da temperatura e redução da umidade na borda, que em alguns casos pode se estender até 100 m ou mais em direção ao interior da floresta (Didham & Lawton 1999; Newmark 2001). Um estudo sobre variação microclimática em uma área heterogênea de 274 km<sup>2</sup> nos Estados Unidos detectou que a distância até a borda foi a variável ecológica mais importante na determinação de temperatura mensal máxima, tendo importância similar à quantidade de área florestada e a variáveis fisiográficas, como elevação e distância até a costa (Vanwalleghem & Meentemeyer 2009). Neste estudo, os autores encontraram uma relação negativa, ou seja, pontos mais distantes da borda apresentavam temperaturas máximas mais baixas, assim como pontos localizados em áreas florestadas maiores; a abundância de árvores, medida pelo seu diâmetro basal, no entanto, não apresentou relação significativa com a temperatura (Vanwalleghem & Meentemeyer 2009).

No entanto, a influência de borda sobre o microclima é bastante variável, e depende de fatores como tipo de matriz (uso de terra adjacente ao fragmento), tipo de vegetação, estrutura e orientação da borda e época do ano, entre outros (Delgado et al.

2007; Didham & Lawton 1999; Gehlhausen et al. 2000; Pohlman et al. 2007). Por exemplo, a influência de borda de uma rodovia sobre a temperatura e a pressão de vapor de uma floresta mesofítica tropical foi mais pronunciada do que a causada por bordas com linhas de tensão elétrica, e bordas naturais com córregos não apresentaram influência de borda detectável sobre estas variáveis (Pohlman et al. 2007). Esta variação provavelmente foi causada por diferenças na estrutura da matriz: o aumento de temperatura sobre o asfalto da rodovia é maior do que sobre a vegetação herbácea que ocorre abaixo de uma linha de tensão elétrica, levando a influência de borda mais pronunciada. Por outro lado, a ausência de influência de borda sobre a temperatura da vegetação ripária provavelmente se deveu à compensação do aumento de temperatura devido a uma maior incidência de luz pelo resfriamento evaporativo da água do córrego (Pohlman et al. 2007). Outro estudo verificou que em florestas mesofíticas norte-americanas, a influência de borda sobre a temperatura foi menor quando havia árvores grandes na matriz adjacente (Gehlhausen et al. 2000).

A influência de borda sobre o microclima também é fortemente influenciada pela estrutura da borda. A estrutura da borda considera se a vegetação na borda é mais fechada ou mais aberta, com ou sem subbosque ou adensamento de lianas, etc... (Cadenasso & Pickett 2000; Harper et al. 2005). Assim, em fragmentos na Floresta Amazônica, a diferença entre temperatura de borda e interior foi maior em bordas abertas, dominadas por vegetação baixa (de 5 a 8 m de altura), do que em bordas fechadas, com vegetação de 20 m de altura e um sob-bosque denso; um padrão similar foi observado para a taxa de evaporação (Didham & Lawton 1999). Além disso, normalmente bordas orientadas na direção dos ventos predominantes e/ou do maior ângulo de incidência solar costumam ter

variações microclimáticas perceptíveis em distâncias maiores, sendo que a diferença na distância de influência de borda devido à orientação pode chegar a 20 m (Gehlhausen et al. 2000; Heithecker & Halpern 2007; Honnay et al. 2002).

Em geral, a influência de borda sobre o microclima é mais pronunciada em fragmentos menores, provavelmente devido à sobreposição da influência de duas ou mais bordas distintas. Assim, na Floresta Amazônica, a influência de borda foi maior em fragmentos de 100 ha do que na borda de mata contínua, indicando que o tamanho do fragmento é um fator importante não apenas para o microclima, mas também para variáveis relacionadas à vegetação (Didham & Lawton 1999). Em florestas temperadas norte-americanas, a temperatura do ar (mas não do solo) foi mais elevada em fragmentos circulares de 1 ha do que em 13 ha contínuos de floresta não perturbada (Heithecker & Halpern 2007). No entanto, tanto a temperatura do ar quanto do solo na borda dos fragmentos de 1 ha foi consistentemente menor do que no seu interior; além disso, os fragmentos provocaram redução de temperatura do ar até 20 m para dentro da matriz adjacente, composta por vegetação mais aberta, em regeneração (Heithecker & Halpern 2007). Em geral, quanto maior for o contraste entre a matriz e o fragmento, em termos de, por exemplo, altura e/ou densidade da vegetação, maior será a influência de borda sobre o microclima (Harper et al. 2005; Ries et al. 2004).

Além de variações em valores médios e máximos, a distância da borda também pode influenciar a amplitude ou a variância da variação microclimática em um ponto. Isso pode ser inferido através da observação de que, enquanto a temperatura mensal e diária máxima aumentam próximo à borda, a temperatura mínima diminui (Vanwalleghem & Meentemeyer 2009), de modo que a variação térmica diária e mensal

próximo da borda é maior do que no interior do fragmento. Além disso, um estudo em fragmentos de Mata Atlântica detectou variâncias maiores na borda em relação ao interior no que diz respeito à temperatura do ar e do solo e à umidade do ar, resultando em uma distância de influência de borda de até 120 m (Siqueira et al. 2004). Um aspecto importante da variação microclimática é que a própria distância de influência de borda sobre aspectos microclimáticos pode apresentar ampla variação até mesmo dentro do mesmo fragmento. Em um fragmento florestal na Tanzânia, a distância de influência de borda variou de 12 a 108 m para temperatura e 13 a 184 m para umidade, sendo que a diferença de temperatura entre borda e interior variou entre 0,3 e 6,7°C (Newmark 2001). Em bordas de floresta tropical com linhas de tensão elétrica, a influência de borda sobre temperatura foi detectada apenas na estação úmida, evidenciando variabilidade estacional (Pohlman et al. 2007).

Finalmente, é importante notar que nem todas as variáveis microclimáticas são influenciadas similarmente pela borda. Em um estudo nas Ilhas Canárias, a temperatura do solo foi maior nos primeiros cinco a dez metros da borda, mas não foi detectada influência significativa de borda sobre temperatura da serapilheira e do ar (Delgado et al. 2007). Em duas florestas mesofíticas norte-americanas a maior influência de borda ocorreu sobre a umidade do solo, enquanto para outras variáveis (umidade e temperatura do ar e concentração de gás carbônico) seu impacto foi menos frequente e se estendeu por distâncias menores a partir da borda (Gehlhausen et al. 2000). Um padrão oposto foi observado em florestas tropicais australianas, nas quais houve influência de borda sobre temperatura e umidade do ar, mas não sobre as mesmas variáveis medidas no solo (Pohlman et al. 2007). Em fragmentos de cerradão em Goiás, embora tenha ocorrido

redução da temperatura do ar e do solo e aumento da umidade do ar na direção borda-interior, este padrão não foi estatisticamente significativo (Lima-Ribeiro 2008).

Os mesmos fatores que influenciam o microclima – orientação e estrutura da borda, tamanho do fragmento, matriz etc. – também influenciam as mudanças na estrutura e composição da vegetação, discutidas abaixo..

### **Influência de borda sobre estrutura da vegetação arbórea**

Além das mudanças na temperatura e umidade descritas acima, um fator comum na borda de fragmentos é o aumento da incidência de ventos (Saunders et al. 1991), principalmente durante grandes tempestades (Laurance & Curran 2008). Embora haja evidências de que a variação na velocidade do vento é maior em relação ao interior em fragmentos de mata atlântica (Siqueira et al. 2004), outros estudos não detectaram diferenças, provavelmente devido à grande variação nas medidas em curtos períodos de tempo (Pohlman et al. 2007). Sendo assim, parte das evidências sobre o a influência de borda devido ao vento é indireta, relacionada a mudanças na estrutura da vegetação (Laurance & Curran 2008).

Uma das consequências mais evidentes da maior incidência do vento é a queda de árvores (*windthrow*), bastante estudada em florestas temperadas e boreais canadenses (Harper et al. 2007; Mascarúa Lopes et al. 2006). Ela foi observada, por exemplo, em fragmentos adjacentes a áreas abertas pela coleta de madeira, com queda de árvores significativa até 25 m da borda em fragmentos de ~300 m de largura, e a distâncias ligeiramente maiores em fragmentos mais estreitos (Mascarúa Lopes et al. 2006). Houve maior quantidade de árvores caídas em uma borda natural com um lago, sendo que isso também foi mais evidente em fragmentos mais estreitos, indicando sobreposição aditiva

da influência de duas bordas (Harper et al. 2007). A queda por causa do vento é o fator de mortalidade de árvores mais comum é bordas antigas na Floresta Amazônica (Laurance & Curran 2008).

O vento, junto com as variações microclimáticas, pode resultar no aumento da mortalidade de árvores, detectado até 300 m da borda na Floresta Amazônica (Laurance et al. 1998). Outros danos estruturais comumente observados na borda incluem a redução da altura e da cobertura de dossel, observados em florestas boreais, subtropicais e tropicais (Delgado et al. 2007; Didham & Lawton 1999; Harper & MacDonald 2001; Harper et al. 2007; Lima-Ribeiro 2008; Mascarúa Lopes et al. 2006), e redução de altura e diâmetro médio da vegetação arbórea, observados no cerrado goiano (Lima-Ribeiro 2008). A redução da cobertura de dossel pode ocorrer em parte devido ao aumento da incidência de vento e a mudanças no microclima como um todo; por sua vez, menor cobertura de dossel implica em maior quantidade de luz penetrando até o subbosque e favorecendo o crescimento de espécies heliófilas, levando a modificações adicionais no ecossistema da borda (Laurance & Curran 2008).

Em florestas subtropicais e florestas temperadas, o aumento da incidência de luz foi detectado até 15 m da borda, dependendo do tipo de vegetação, da matriz e da orientação (Delgado et al. 2007; Heithecker & Halpern 2007). Isso pode levar a um selamento da borda por lianas e espécies pioneiras, reduzindo a variação microclimática (Harper et al. 2005). Embora o padrão mais comum seja a redução da densidade arbórea próximo à borda (Harper et al. 2004; Harper & Macdonald 2002; Mascarúa Lopes et al. 2006), em alguns casos o aumento de luz pode resultar em maior taxa de crescimento e/ou maior densidade populacional de árvores nativas, como observado em bordas de

estradas florestais na América do Norte (Bowering et al. 2006). Em um fragmento de mata estacional semidecídua em Minas Gerais foi detectado aumento de densidade de árvores na borda, especialmente para as menores classes de tamanho; o diâmetro e altura médios, no entanto, eram maiores no interior do fragmento (Carvalho et al. 2007). Resultados similares foram obtidos numa borda entre floresta de araucária e pastagem, com maior quantidade de árvores, especialmente árvores de subdossel (Fontoura et al. 2006).

### **Influência de borda sobre a comunidade vegetal**

Além de alterações na estrutura florestal, também podem ocorrer modificações na composição da comunidade arbórea. Assim, por exemplo, na borda de fragmentos de cerrado *sensu stricto* foi detectada menor abundância de espécies arbustivo-arbóreas zoocóricas em relação ao seu interior (Jardim & Batalha 2009). Em florestas boreais algumas espécies foram mais comuns nos primeiros 5 m da borda de um lago, enquanto outras foram mais abundantes entre 10 a 20 m dessa borda (Harper & MacDonald 2001); a densidade e cobertura de rebrotas da espécie dominante no mesmo ecossistema foram significativamente maiores perto da borda, enquanto a cobertura total de arbustos foi menor (Harper & Macdonald 2002). Em uma mata semi-decídua em Minas Gerais foi detectada uma variação gradual na composição da comunidade arbórea entre a borda e o interior do fragmento (Carvalho et al. 2007), e a riqueza da vegetação arbórea foi maior na borda de uma floresta de araucária com pastagem do que no interior do fragmento, com uma composição de espécies distinta na borda, inclusive para plântulas (Fontoura et al. 2006). Em fragmentos mais estreitos de floresta boreal este processo foi menos intenso, indicando uma forma de interação negativa entre duas bordas – a existência de

uma borda mais antiga criou um novo tipo de ambiente no fragmento, e os indivíduos que se desenvolveram neste ambiente foram menos influenciados pela criação de uma nova borda foi menor (Harper et al. 2007).

As espécies herbáceas, assim com as arbóreas, apresentam ampla variação nas suas respostas à criação de bordas: enquanto algumas são favorecidas, outras são desfavorecidas ou eliminadas. Essa influência é mais sensível na borda imediata, onde espécies heliófilas têm maiores chances de estabelecimento e sobrevivência, mas pode se estender até 60 m para o interior (Gehlhausen et al. 2000; Harper et al. 2004; Harper & Macdonald 2002). A abundância de diferentes espécies herbáceas e arbustivas depende, também, da idade da borda e da vegetação (Avon et al. 2010; Harper & Macdonald 2002). No entanto, em bordas com estradas florestais<sup>2</sup> de mais de 200 anos, na Europa, foi detectada influência de borda sobre aproximadamente 40 espécies, sendo cinco espécies exclusivas da borda imediata, 15 espécies presentes na borda e no interior, mas mais abundantes na borda, e 20 espécies mais abundantes no interior (Avon et al. 2010).

Isso indica que a influência de borda é um fenômeno de longo prazo mesmo em bordas de baixo contraste, tais como estradas florestais (Avon et al. 2010). Padrões similares foram observados em florestas mesofíticas norte-americanas, onde espécies exóticas ocorreram quase exclusivamente na borda imediata, e diferentes espécies nativas apresentaram padrões de preferência por borda ou por interior, sendo que algumas foram encontradas até 60 m da borda mas estiveram ausentes de parcelas mais distantes (Gehlhausen et al. 2000). Em um fragmento de floresta de Araucária no Rio Grande do Sul, a vegetação herbácea era mais abundante na borda do que em distâncias de 50 m ou

---

<sup>2</sup> Neste trabalho, usamos os termos “estrada florestal” (*forest road*) e “aceiro” (*firebreak*) como sinônimos, para nos referirmos a estradas, normalmente de terra, abertas dentro de uma floresta ou outra vegetação.

mais para o interior do fragmento, e a sua riqueza era mais nos primeiros 25 m (Fontoura et al. 2006). Em fragmentos de Floresta Atlântica na Bahia, a riqueza de pteridófitas na borda era significativamente menor do que a 20 e a 100 m, e a riqueza a 20 m era menor do que a 100 m, indicando um incremento gradual de espécies à medida que se adentra o fragmento (Paciencia & Prado 2004).

A influência de borda sobre vegetação herbácea, no entanto, não se limita às bordas de ambientes florestais. Existem estudos mostrando influência de borda sobre ervas em vegetação savânica (Pivello et al. 1999a; Pivello et al. 1999b) e campestre (Cilliers et al. 2008; Morgan 1998). Assim, por exemplo, em uma área de cerrado *sensu stricto* a gramínea africana *Urochloa decumbens* estava restrita à borda do fragmento (Pivello et al. 1999b), enquanto que em uma área de campo cerrado houve evidência de associação negativa entre espécies nativas, mais comuns longe da borda, e a gramínea africana *Melinis minutiflora* (Pivello et al. 1999b). Em outra área de campo cerrado na mesma região, enquanto *M. minutiflora* estava distribuída de forma relativamente uniforme no fragmento, *U. decumbens* foi muito mais frequente na borda, apesar de ser encontrada também no interior (Pivello et al. 1999a). Isso indica que a invasão de áreas de cerrado por gramíneas invasoras ocorre na direção borda-interior, resultando no deslocamento de espécies nativas. Aumento de herbáceas invasoras nas bordas foi observado também em campos urbanos e rurais na Austrália e na África do Sul, com redução na cobertura de espécies nativas; no entanto, nem todas as espécies exóticas responderam da mesma maneira, sendo que a distribuição de algumas esteve mais relacionada a uma espécie de dinâmica de clareiras (*gap phase dynamics*) do que à influência de borda (Cilliers et al. 2008; Morgan 1998).

É possível que estas mudanças estejam relacionadas, entre outros fatores, a modificações no solo próximo à borda. Em florestas canadenses, foi detectado que a abundância de duas espécies herbáceas sujeitas à influência de borda estava relacionada não somente à quantidade de luz incidente, mas também ao pH do solo, à microelevação, ao conteúdo de matéria orgânica e à umidade, que foram mais elevados na borda (Marchand & Houle 2006). No entanto, estas modificações costumam ocorrer em distâncias pequenas da borda, e sobre poucas variáveis. Por exemplo, em florestas de altitude na China foi detectada influência de borda apenas sobre o conteúdo de matéria orgânica no solo, menor nos primeiros 10 m, enquanto o pH, a quantidade de cascalho e a concentração de nitrogênio, fósforo e potássio não apresentaram variação consistente com a distância da borda; variações na diversidade vegetal, no entanto, foram detectadas até 30 m da borda (Li et al. 2007). Em uma floresta semidecídua no México houve influência de borda sobre concentração de fósforo, mas não sobre a de carbono ou nitrogênio, nos primeiros 10 m da borda, além de variação estacional na relação de diferentes formas de nitrogênio com a distância da borda (Toledo-Aceves & García-Oliva 2008). Em um campo urbano australiano, o único nutriente que variou com distância da borda foi o fósforo, cujas concentrações foram maiores na borda imediata do que no interior do fragmento; em contrapartida, as variações na composição da vegetação foram detectáveis até 30 m de distancia (Morgan 1998). Variações no pH e no conteúdo de cálcio e potássio com a distância da borda foram detectadas em uma floresta decídua européia, possivelmente devido à adubação das terras adjacentes (Honnay et al. 2002).

## **Influência de borda sobre animais**

Existem estudos mostrando influência de borda não só sobre a vegetação, mas também sobre animais, tanto invertebrados (Didham et al. 1996; Meyer et al. 2009; Pires et al. 2005) quanto vertebrados (Anderson & Burgin 2002; Cadenasso & Pickett 2000; Fletcher 2005; Fraser & Whitehead 2005; Goosem 2000; Smith et al. 2010). Os mesmos fatores que determinam a extensão da influência de borda sobre vegetação e microclima também atuam sobre a fauna. Por exemplo, a estrutura da borda, mais aberta ou mais fechada, pode ser determinante para o tipo de mamífero herbívoro e, conseqüentemente, a extensão de danos causados à vegetação por herbivoria, como mostrado por um estudo em florestas norte-americanas (Cadenasso & Pickett 2000).

Em uma revisão, Didham et al. (1996) citam casos de redução na predação de sementes, por insetos e outros animais, na borda de um aceiro, além de impactos da redução da área de fragmentos. Em ecossistemas brasileiros, um exemplo foi o aumento na abundância de colônias de formigas-saúvas (gênero *Atta*) na borda de um fragmento de Floresta Atlântica (Meyer et al. 2009). Nesse estudo, durante quatro anos de amostragem, nos primeiros 50 m da borda as colônias foram de seis a 11 vezes mais abundantes na borda em relação ao interior do fragmento.

Uma das conseqüências mais estudadas da criação de bordas é o aumento da predação e parasitismo em ninhos de aves (Paton 1994 *apud* Fraser & Whitehead 2005). No entanto, um estudo realizado em matas semidecíduas e outro em cerrado, ambos no Brasil Central, não detectaram diferenças nas taxas de predação e de parasitismo entre borda e interior (França & Marini 2009; Melo & Marini 1997). Embora os autores não explorem essa possibilidade, a ausência de influência de borda pode na verdade se dever

à escala do estudo, já que a amostragem da “borda” foi feita numa faixa de 200 a 250 m de largura, e normalmente a influência de borda se limita a distâncias menores (Harper et al. 2005). Por outro lado, em um estudo nas savanas australianas, a predação de ninhos na borda de uma estrada foi duas vezes menor do que no interior, com as taxas também variando entre as duas áreas estudadas (Fraser & Whitehead 2005). Isso indica que, embora seja um padrão relativamente comum, o aumento da predação de ninhos na borda não pode ser generalizado para todos os tipos de borda, ou para todos os ambientes.

Outro estudo mostrou que a abundância de uma ave Passeriforme esteve negativamente relacionada à distância da borda em fragmentos de campos norte-americanos inseridos em matriz de cultivo de soja ou milho, com distância de influência de borda estimada em 88 m, sendo maior em locais próximos a mais de uma borda (Fletcher 2005). A distância da borda também influenciou a distribuição de espécies de lagartos em bosques australianos, com algumas espécies encontradas apenas na borda e outras mais frequentes no interior dos fragmentos, sendo que o interior destes bosques foi mais semelhante entre si do que as borda (Anderson & Burgin 2002). Um padrão similar, com algumas espécies mais comuns no interior (90 a 110 m da borda) e outras na borda (0 a 30 m), foi observado sobre a fauna de pequenos mamíferos em bordas de estradas não-pavimentadas cortando uma floresta mesófila australiana; nesse caso também houve influência da largura da estrada (Goosem 2000). Em fragmentos de Floresta Atlântica a influência de borda sobre pequenos mamíferos foi maior depois de um incêndio (Pires et al. 2005). Finalmente, uma estrada canadense de tráfego intenso levou à redução de diferentes espécies de anuros numa faixa de 200 a 2400 metros, provavelmente devido ao

aumento de mortalidade próximo à estrada e ao ruído durante a noite, prejudicando a vocalização e conseqüentemente a reprodução dos anfíbios (Eigenbrod et al. 2009).

### **Estudos e modelos teóricos**

Grande parte do conhecimento atual sobre influência de borda vem de estudos empíricos. Estudos teóricos, no entanto, tiveram grande importância no direcionamento de estudos, além terem proposto explicações ecológicas mais generalizáveis para os padrões encontrados. A seguir, apresentamos algumas das principais contribuições de oito das principais revisões feitas entre 1988 e 2005 (Cadenasso et al. 2003; Fagan et al. 1999; Harper et al. 2005; Murcia 1995; Ries & Sisk 2004; Saunders et al. 1991; Yahner 1988).

Um dos primeiros trabalhos discutindo os aspectos negativos das bordas foi a revisão de Yahner (1988), antes da qual as bordas eram frequentemente consideradas de interesse apenas para a vida selvagem, em consequência de um estudo da década de 1930 que apontou maior diversidade nas bordas de florestas (Leopold 1933 *apud* Yahner 1988). Yahner (1988) definiu efeitos<sup>3</sup> de borda como “mudanças na diversidade, abundância e distribuição espacial de comunidades de vida selvagens associadas com bordas de florestas” (“*changes in diversity, abundance, and spatial distribution of wildlife communities associated with forest edges*”), e forneceu diversos exemplos de efeitos de borda negativos, como a redução de algumas populações e impedimentos à dispersão, e sobre efeitos positivos no incremento da diversidade de alguns grupos. O autor conclui afirmando que “com base no nosso entendimento atual de mudanças nas comunidades de vida selvagem perto de bordas, nós não devemos concluir que a criação

---

<sup>3</sup> Apenas nesta seção usamos o termo “efeito de borda”, para respeitar a terminologia usada nas revisões citadas.

de mais bordas nas paisagens sempre terá um efeito positivo na vida selvagem”, e discutiu a necessidade de desenvolvimento de um protocolo padronizado para estudos de influência de borda, assim como a condução de estudos bem planejados e de longo prazo (Yahner, 1988).

Duas revisões importantes são as de Saunders et al. (1991) e Murcia (1995). Saunders et al. (1991) discutiram efeitos gerais da fragmentação, com ênfase no isolamento de fragmentos e nas mudanças microclimáticas, especialmente devido a fluxos de radiação, de água e de vento, além de fatores que a influenciam, tais como o tamanho, a forma e a posição do fragmento. Murcia (1995) classificou os efeitos de borda em abióticos, biológicos diretos (mudanças na abundância e distribuição de espécies devido às alterações abióticas) e biológicos indiretos (relacionados a interações, como competição, predação, polinização e dispersão), e discutiu, também, a influência de fatores como orientação, idade e estrutura da borda. A autora mostrou que diferentes espécies podem responder de forma distinta à criação de bordas, e que uma mudança nos fatores abióticos promove uma mudança na estrutura da vegetação, que por sua vez modifica interações interespecíficas próximo à borda, resultando no que é conhecido por “efeito cascata”.

Uma classificação mais detalhada da influência de borda sobre a vegetação foi feita por Harper et al. (2005). Eles classificaram a influência de borda em três fases: efeitos diretos da criação da borda, respostas primárias e respostas secundárias. As respostas primárias constituem as modificações nos processos ecológicos e as mudanças estruturais provocadas pelos impactos diretos da criação da borda. Já as respostas secundárias correspondem a modificações em processos ecológicos, na estrutura da

comunidade e na sua composição devido ao efeito das respostas primárias. Por este modelo, mudanças na composição de espécies são a última fase na influência de borda, e são causadas essencialmente por modificações no recrutamento, na mortalidade e em outros processos. Estes processos, por sua vez estão relacionados aos efeitos diretos, tais como o dano físico e os fluxos de energia, e às respostas primárias, como aumento de produtividade e modificações na estrutura do dossel. Respostas estruturais secundárias, no caso, correspondem a modificações na estrutura do subbosque, e todos os níveis de resposta estariam sujeitos a efeitos em cascata, com mudanças estruturais interferindo nos fluxos ecológicos, e assim por diante (Harper et al. 2005). Harper et al. (2005) também recomendaram usar o termo “influência de borda” ao invés de “efeito de borda”, ofereceram uma definição geral dela – “o efeito de processos (tanto bióticos quanto abióticos) na borda que resulta em uma diferença detectável na composição, estrutura ou função próximo da borda, quando comparados com o ecossistema de qualquer lado da borda”.

Os três estudos acima (Harper et al. 2005; Murcia 1995; Saunders et al. 1991) relacionaram todas as modificações na vegetação e outros aspectos às mudanças microclimáticas ou, em termos mais gerais, aos fluxos resultantes da criação de uma borda. Essa ideia foi desenvolvida por outros estudos teóricos, que propuseram um modelo mais geral de influência de borda (Cadenasso et al. 2003; Ries et al. 2004). No modelo geral de Cadenasso et al. (2003), uma borda é caracterizada essencialmente pelo tipo de fluxo que a atravessa. Os fluxos podem ser de matéria (matéria orgânica, poluição, nutrientes etc), energia (luz, calor, vento), organismos e informação (genes e também sinais visuais, químicos e auditivos que podem interferir no comportamento de

animais), e são mediados pelo nível de contraste entre as duas manchas – quanto maior o contraste, maiores serão os fluxos - e pela estrutura da borda.

Um modelo mais detalhado (Ries et al. 2004) incluiu, além dos fluxos ecológicos, três outros fatores: interações interespecíficas, distribuição diferenciada de recursos na borda e a possibilidade de acesso a recursos nos dois ecossistemas. A influência de borda sobre interações específicas foi discutida com mais detalhes por Fagan et al. (1999), que discutiram que bordas podem alterar interações específicas de quatro maneiras. A primeira seria por alterações nos padrões de movimento de diferentes espécies, por exemplo, impedindo ou facilitando o movimento de alguma espécie e, conseqüentemente, alterando as probabilidades de encontro entre espécies e suas interações. A segunda diz respeito ao aumento da mortalidade de algumas espécies. Um outro modo é a facilitação através da borda, processo no qual uma espécie muito abundante em uma das manchas acaba se espalhando para outra e interagindo com espécies presentes nesta; e, finalmente, a borda pode oferecer novas oportunidades de interações entre espécies, como quando uma espécie animal incapaz de sobreviver na matriz se locomove ao longo da borda, aumentando as probabilidades de encontro e, conseqüentemente, de interações com outras espécies.

Pelo modelo de Ries et al. (2004), espécies podem ser mais frequentes na borda porque algum recurso, tal como a luz ou alguma fonte de alimento, é mais abundante na borda do que no interior do fragmento – o chamado mapeamento de recursos. Além do incremento de recursos na borda, a borda ofereceria a vantagem para que um animal consiga obter recursos complementares no fragmento e na matriz. Fluxos ecológicos, mapeamento de recursos e acessos a recursos complementares, além da qualidade de

hábitat nos dois lados da borda, podem também ser usados para prever como será a resposta de diferentes espécies à criação de bordas (Ries et al. 2004; Ries & Sisk 2004). Por esse modelo, uma espécie será mais abundante na borda quando o ecossistema adjacente oferecer recursos inexistentes no ecossistema de origem, de modo que, dependendo do tipo de borda e de matriz, a mesma espécie pode responder à borda de forma positiva (aumento de abundância), negativa ou neutra (Ries et al. 2004; Ries & Sisk 2004).

## **Material e métodos**

### **Áreas de estudo**

Conduzimos este estudo em 14 bordas distribuídas em oito áreas de cerrado no Estado de São Paulo (tabela 1, fig. 1 e 2). As áreas amostradas apresentavam as fisionomias de campo cerrado (1), cerrado *sensu stricto* (2), cerrado denso (5) e cerradão (6), pela classificação de Ribeiro & Walter (2008). Escolhemos fragmentos com pelo menos 600 m de largura e comprimento, para evitar sobreposição da influência de bordas distintas, e que estivessem adjacentes a plantios de cana-de-açúcar (2 bordas), pastagens (3 bordas), silvicultura de eucalipto (3 bordas), estradas asfaltadas (3 bordas), aceiros em um fragmento de cerrado (2 bordas) ou área urbana (1 borda) (tabela 1). Quatro dos fragmentos se localizam dentro ou adjacentes a estações ecológicas e parques estaduais - Estação Ecológica (E. Ec.) de Assis, E. Ec. de Itirapina, E. Ec. de Jataí, E. Ec. de Santa Bárbara, e Parque Estadual de Vassununga - os outros fragmentos se localizam no Jardim Botânico Municipal de Bauru, na Embrapa Pecuária Sudeste em São Carlos, e no *campus* de São Carlos da Universidade Federal de São. A temperatura média nas áreas de estudo variou de 15 a 30°C durante o período de amostragem, com precipitação anual total entre 1300 e 1600 mm (CIIAGRO 2010). A amostragem foi feita entre novembro de 2009 e junho de 2010, exceto para o fragmento da Universidade Federal de São Carlos, amostrado entre setembro e novembro de 2010.

**Table 1.** Caracterização das bordas estudadas incluindo localização, fisionomia da vegetação e características da matriz e da borda

Local, município <sup>a</sup>	Vegetação	Uso de solo imediatamente adjacente à borda	Uso de solo na vizinhança	Idade da borda	Orientação <sup>c</sup>	Altitude <sup>e</sup>	Coordenadas
Estação Ecológica de Assis, Assis	cerradão	aceiro de ~8 m	cerradão	30 anos <sup>d</sup>	310°	570 m	22° 36,18' S, 50° 22,55 O
Estação Ecológica de Assis, Assis	cerrado denso regenerando depois de plantação de eucalipto, desde 1996 <sup>d</sup>	~30 m de grama, bambu na borda da estrada	estrada de duas faixas; silvicultura e cana-de-açúcar	> 50 anos	310°	570 m	22° 36,63' S 50° 22,57' O
Jardim Botânico Municipal de	cerrado denso	aceiro de ~5 m	pasto, abandonado há 4	~30 anos <sup>e</sup>	35°	560 m	22° 20,20' S, 49° 00,38' O

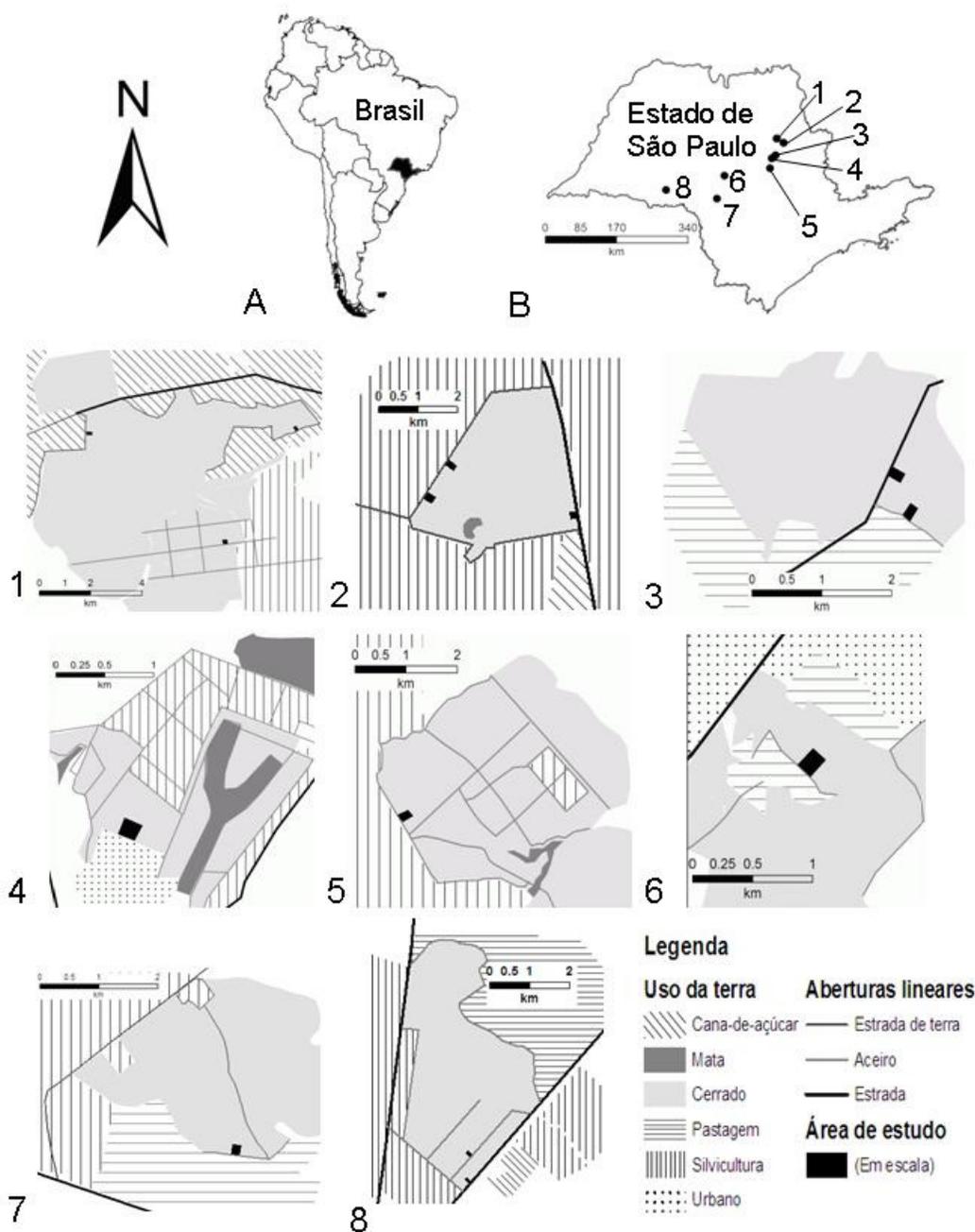
Bauru, Bauru		anos <sup>e</sup>					
<hr/>							
Estação							
Ecológica de	cerrado denso	aceiro de ~8 m	cerradão	~20 anos	355°	580 m	21° 35,61' S,
Jataí, Luiz							47° 46,42' O
Antônio							
<hr/>							
Estação							
Ecológica de	cerradão	estrada de terra de	plantio de cana-	> 30 anos	90°	640 m	21° 33,18' S,
Jataí, Luiz		~10 m	de-açúcar				47° 49,20' O
Antônio (oeste)							
<hr/>							
Fazenda América,							
no leste da							
Estação	cerradão	estrada de terra de	plantio de cana-	> 30 anos	330°	615 m	21° 33,32' S,
Ecológica de		~6 m	de-açúcar, pasto				47° 44,80' O
Jataí, Luiz			antes de 2000 <sup>f</sup>				
Antônio							
<hr/>							

Estação Ecológica de Itirapina, Itirapina	campo cerrado	aceiro de ~15 m, com cerca no meio	Silvicultura de eucalipto	> 20 anos <sup>g</sup>	55°	770 m	22° 12,76' S, 47° 55,59' O
Estação Ecológica de Santa Bárbara, Águas de Santa Bárbara	cerrado <i>sensu stricto</i> regenerando depois de pastagens nativas desde 1984 <sup>h</sup>	~10 m de capim-braquiária ( <i>Urochloa decumbens</i> ), cerca de arame	Pastagem, ocupada por capim-braquiária ( <i>Urochloa decumbens</i> )	26 anos <sup>h</sup>	15°	630 m	22° 49,79' S, 49° 11,88' O
Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos	cerradão	~10 m de capim-colonião ( <i>Panicum maximum</i> )	estrada de duas faixas, de terra antes de 2006 <sup>i</sup> ; cerradão	> 70 anos <sup>i</sup>	110°	740 m	21° 55,57' S, 47° 49,38' O
Embrapa Pecuária Sudeste, São	cerradão	aceiro de ~5 m, cerca de arame	pasto	> 100 anos <sup>i</sup>	40°	740 m	21° 55,87' S, 47° 49,22' O

Carlos		farpado					
	cerrado <i>sensu</i>						
Universidade Federal de São Carlos, São Carlos	<i>stricto</i> regenerando depois de eucalipto desde ~1978 <sup>j</sup>	rua pavimentada; aceiro antes de 2009 <sup>k</sup>	urbana (universidade), eucalipto antes de 2007 <sup>k</sup>	~32 anos <sup>j</sup>	20°	870 m	21° 58,62' S, 47° 52,79' O
Parque Estadual de Vassununga, Santa Rita do Passa Quatro	cerradão	aceiro de ~5 m dominado por capim-colonião, cerca e 30 m de grama baixa	estrada de 4 pistas, silvicultura de eucalipto	~80 anos	260°	680 m	21° 38,38' S, 47° 36,83' O
Parque Estadual de Vassununga, Santa Rita do	cerrado denso	estrada de terra de ~10 m	Eucalipto; pastagem antes de 1990 <sup>l</sup>	> 21 anos <sup>l</sup>	125°	650 m	21° 38,11' S, 47° 39,04' O

Passa Quatro							
Parque Estadual			Eucalipto;				
de Vassununga,		estrada de terra de	pastagem antes de	> 21 anos <sup>l</sup>	125°	670 m	21° 37,68' S,
Santa Rita do	cerrado denso	~10 m	1990 <sup>l</sup>				47° 38,75' O
Passa Quatro							

<sup>a</sup> Todas as áreas são dentro do Estado de São Paulo, região Sudeste. Quando há mais de uma borda na mesma área e com a mesma matriz, nos referimos a elas como “oeste” e “leste” ou como “sul” e “norte”. <sup>c</sup> Da borda para interior, obtida a partir de imagens de satélite no Google Earth 5.2. <sup>e</sup> Medida no local, com um GPS Garmin CSx60. <sup>d</sup> Com. pess. Antônio C. G. Melo, E. Ec. Assis. <sup>e</sup> Com. pess. Luiz C. de A. Neto, gestor do Jardim Botânico Municipal de Bauru; <sup>f</sup> Com. pess. do atual proprietário da Fazenda América; <sup>g</sup> Com. pess. Paulo H. P. Ruffino, chefe da E. Ec. Itirapina; <sup>h</sup> Com. Pess. Aduino Fiorucci, chefe da E. Ec. Santa Bárbara; <sup>i</sup> Com. pess. Adilson Malagutti, Embrapa Pecuária Sudeste; <sup>j</sup> Com. pess. Maria Inês S. Lima, Universidade Federal de São Carlos; <sup>k</sup> Observação pessoal; com. pess. Rafael M. Silva, International Paper do Brasil.



**Figura 1.** A: Localização do Estado de São Paulo; B: localização das áreas de estudo; 1-8: localização de cada borda dentro da área. 1: Estação Ecológica (E. Ec.) de Jataí, Luiz Antônio; 2: Parque Estadual de Vassununga, Santa Rita do Passa Quatro; 3: Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos; 4: Universidade Federal de São Carlos, São Carlos; 5: Estação Ecológica de Itirapina, Itirapina; 6: Jardim Botânico Municipal de Bauru, Bauru; 7: Estação Ecológica de Santa Bárbara, Águas de Santa Bárbara; 8: Estação Ecológica de Assis, Assis. A principal fisionomia é campo cerrado em 5; cerrado *sensu stricto* em 4 and 7; cerrado denso na borda sul em 1, nas bordas lestes em 2, em 6 e na borda leste em 8; e cerradão nas outras bordas.

A



B



C



**Figura 2.** Imagens da borda (esquerda) e do interior nas áreas de estudo. A – borda com aceiro na Estação Ecológica de Assis, B – borda com aceiro na Estação Ecológica de Jataí, C – borda com eucalipto na Estação Ecológica de Itirapina (*continua*)

D



E



F



**Figura 2 (continuação).** D – borda com eucalipto no Parque Estadual de Vassununga, E – borda leste com cana de açúcar na Estação Ecológica de Jataí, F – borda oeste com cana-de-açúcar na Estação Ecológica de Jataí.

G



H



I



**Figura 2 (continuação).** G – borda com pastagem no Jardim Botânico Municipal de Bauru, H – borda com pastagem em São Carlos, I – borda com pastagem na Estação Ecológica de Santa Bárbara (Continua)

J



K



L



**Figura 2 (continuação).** J – borda com área urbana em São Carlos, K – borda com estrada na Estação Ecológica de Assis, L – borda com estrada em São Carlos (*Continua*)

M

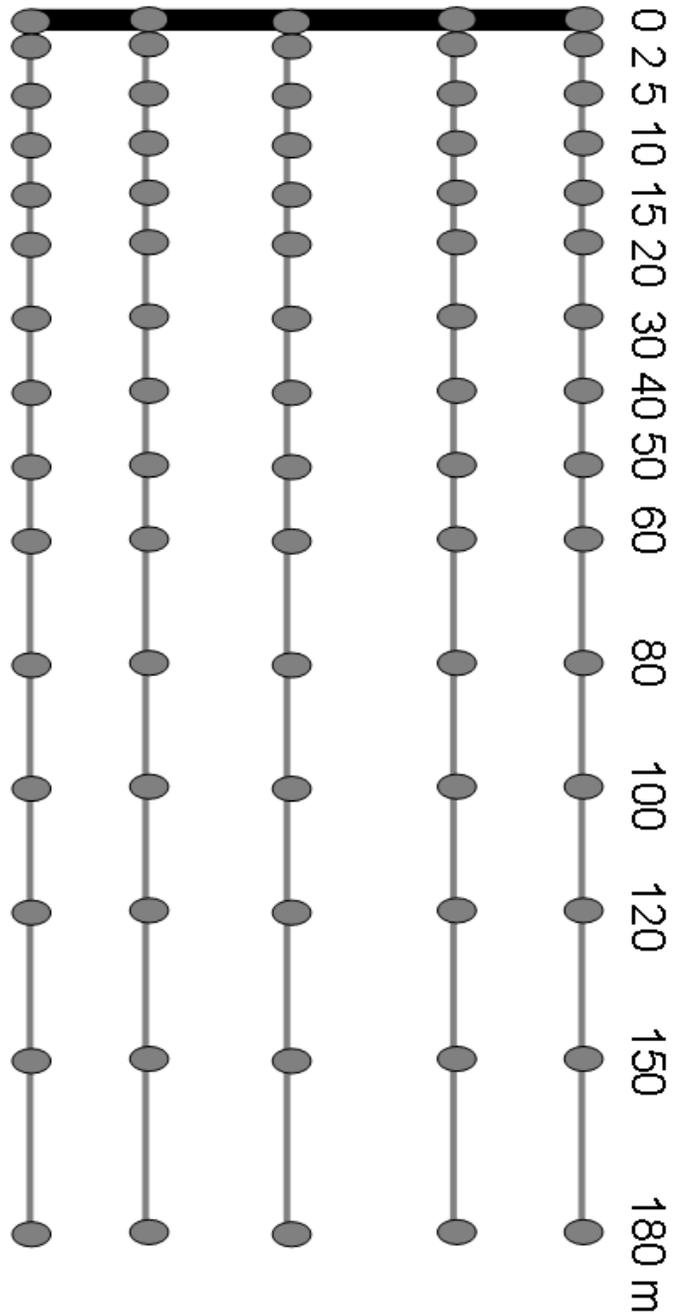


**Figura 2 (continuação).** M – borda com estrada no Parque Estadual de Vassununga.

### **Desenho amostral**

Em cada borda, nós instalamos cinco transectos de 180 m, na direção borda – interior, localizados a pelo menos 300 m de todas as outras bordas (fig. 2). A distância entre transectos adjacentes variou aleatoriamente de 20 a 40 m. Em cada transecto, nós colocamos 15 pontos amostrais, em 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150 e 180 m da borda. Em uma das bordas (borda com estrada, em Assis) a amostragem foi realizada até os 100 m, uma vez que além dos primeiros 100 m a vegetação aparentava estar em regeneração a menos tempo, e comparações entre os primeiros 100 m e o restante da área não seriam válidas. O primeiro ponto de cada transecto (ou seja, aos 0 m) foi colocado na linha de criação da borda. Na maior parte dos casos esta linha foi localizada por uma elevação de terra na borda; nas bordas onde esta elevação não existia (bordas em Assis e Santa Bárbara e a borda com estrada em Vassununga), o primeiro ponto amostral foi colocado onde começava a vegetação lenhosa; a vegetação herbácea

não foi considerada por ser composta principalmente de gramíneas invasoras e ocupar tanto o fragmento quanto parte da matriz.



**Figura 3.** Disposição dos pontos amostrais nos transectos, em cada borda. Os números são a distância (borda-interior) de cada ponto amostral.

## **Coleta e tratamento de dados**

Em cada ponto amostral nós medimos quatro variáveis microclimáticas (temperatura, umidade e velocidade do ar e irradiância), duas variáveis estruturais (altura e cobertura de dossel), e biomassa de graminóides (total, de espécies exóticas e de espécies nativas).

Nós medimos velocidade do vento, irradiância, umidade relativa do ar e temperatura usando o anemohigrotermômetro e luxímetro THAL 300 da Instruthem, uma única vez em cada borda, em dias claros ou nublados, mas não chuvosos. Um único pesquisador percorreu os cinco transectos sequencialmente tão rápido quanto possível, fazendo uma medição das quatro variáveis em cada ponto, exceto em duas bordas (Santa Bárbara e a borda com aceiro no Jataí), onde dois pesquisadores percorreram simultaneamente de dois a três transectos cada. Este método, apesar de não permitir medidas simultâneas em todos os pontos e portanto estar sujeito a erro devido à variação temporal, é comum em estudos de influência de borda (Delgado et al. 2007; Didham & Lawton 1999; Gehlhausen et al. 2000; Pohlman et al. 2007). Nós medimos a velocidade do vento a 1.8 m acima do solo na direção em que o vento foi mais forte, e medimos irradiância, temperatura e umidade do ar a 1,3 m, diretamente acima do ponto amostral. Nós não protegemos o termômetro da radiação solar direta. Para diferenciar entre variação temporal e influência de borda, nós percorremos três transectos na direção borda-interior e dois transectos na direção interior-borda em cada local

Nós começamos as medições microclimáticas entre 10h15 e 11h30, e a amostragem dos cinco transectos levava de 90 a 180 minutos. Nós anotamos a hora em que cada medida foi feita, e testamos se havia correlação significativa entre os valores

medidos e o tempo decorrido desde a primeira medição daquela borda, usando o coeficiente de correlação linear de Pearson, no programa estatístico Past 2.03 (Hammer 2001). Quando esta correlação foi significativa ( $p < 0.05$ ), nós usamos a equação (1) para destendenciar as medições:

$$D = O - E + O_{médio} \quad (1)$$

Onde  $D$  é o valor destendenciado,  $O$  é o valor medido,  $O_{médio}$  é a média dos valores medidos naquela borda, e  $E$  é o valor predito pela regressão linear dos mínimos quadrados entre os valores medidos (variável dependente) e o tempo (variável independente). Com isso esperamos ter uma estimativa dos valores médios em cada distância desconsiderando a variação temporal ao longo do dia. Como esse procedimento só padroniza os dados para uma mesma borda, comparações entre bordas não foram feitas.

Nós usamos uma régua telemétrica de 15 m para medir altura máxima da vegetação. até a folha ou ramo mais alto localizado dentro de um raio de um metro ao redor do ponto amostral. Em oito pontos amostrais em três sítios diferentes, esta altura foi maior do que 15 m, assim, nós estimamos a distância do topo da régua até a folha o ramo mais alto; a maior altura estimada deste modo foi de 16,5 m. Para medir a cobertura de dossel, nós tiramos fotos hemisféricas usando uma lente olho-de-peixe (Nikon FC-E8) em uma máquina fotográfica digital Nikon Coolpix 5000. Para tirar as fotos, colocamos a máquina fotográfica em um tripé a 1,3 m acima do solo, a nivelamos e direcionamos o topo da máquina para o norte. Usamos o *software* Gap Light Analyzer (Frazer et al. 1999) para obter a porcentagem de abertura de dossel a partir das fotos.

Nós coletamos as partes epígeas (mas não raízes) de todos os graminóides (Poaceae, Cyperaceae e Commelinaceae) em uma parcela de 0,5 x 0,5 m alocada arbitrariamente até 0,5 m de cada ponto de amostragem. Nós identificamos as gramíneas exóticas até espécie, separamos os graminóides nativos em morfoespécies e os identificamos quando possível, e medimos a sua biomassa seca depois de secar por 72 horas a 70°C.

### **Análise de dados**

A influência de borda pode ser caracterizada pela distância de influência de borda (DIB), que representa até que distância da borda uma variável difere estatisticamente de valores de referência representativos do interior do fragmento, e pela magnitude de influência de borda (MIB), que representa a intensidade desta diferença (Harper et al. 2005). Nós estimamos ambos os parâmetros separadamente em cada sítio ou local de estudo para as seguintes variáveis: biomassa total de graminóides (total, exóticos e nativos, e espécies mais comuns, ou seja, que ocorreram em pelo menos 20% das parcelas no dado local de estudo); altura e cobertura de dossel; e para os valores observados e destendenciados de temperatura, umidade, vento e irradiância.

Nós estimamos DIB por meio de um procedimento de aleatorização, Teste de Aleatorização para determinar a Influência de Borda (Randomization Test for assessing Edge Influence – RTEI) em R 2.7.2, usando uma rotina produzida por nós especificamente para este fim (Apêndice 1). RTEI requer a designação de um sistema de referências com o qual os dados coletados em diferentes distâncias da borda são comparados. Nós usamos para este sistema de referência os dados coletados em 120, 150

e 180 m da borda, já que normalmente a influência de borda não se estende além dos 100 m (Harper et al. 2005). Na borda com rodovia na Estação Ecológica de Assis a vegetação mudava depois dos 100 m, provavelmente por estar em regeneração a menos tempo, e, por isso, usamos como referências as coletas feitas em 80 e 100 m. A significância é calculada do seguinte modo (Mascarúa Lopes et al. 2006):

1. Calcula-se a magnitude de influência de borda ( $MIB_{obs}$ ) em uma dada distância usando as amostras na borda e as amostras de referência, com a equação (2) (Harper et al. 2005):

$$MIB_{obs} = \frac{\bar{e} - \bar{r}}{\bar{e} + \bar{r}} \quad (2)$$

Onde  $\bar{e}$  e  $\bar{r}$  são respectivamente os valores médios na borda e no sistema de referência.

2. Para cada uma das distâncias, cria-se um conjunto de dados contendo as cinco amostras na borda e as 15 amostras de referência, selecionando aleatoriamente cinco destes valores para serem usados como amostra de borda, e assim calcula-se a magnitude de influência borda ( $MEI_{aleator}$ ) entre estes cinco valores e os 15 valores restantes.

3. Repete-se o passo 2 por 10 000 vezes. Isso vai criar uma distribuição de valores de  $MIB_{aleator}$  sob a hipótese nula de não haver diferença entre borda e interior.

4. Finalmente, calcula-se a significância para um teste bi-caudal usando a equação (3):

$$p = 2 \{ \text{mínimo de } [\text{Prob} (MEI_{aleator} \leq MEI_{obs}), \text{Prob} (MEI_{aleator} \geq MEI_{obs})] \} \quad (3)$$

onde Prob (equação) é a proporção dos valores de  $MEI_{aleator}$  que satisfazem a equação.

Nas bordas de cerrado *sensu stricto* e campo cerrado nós usamos o teste exato de Fisher (Lowry 2010) para testar a hipótese nula de não haver associação entre presença de gramíneas exóticas e graminóides nativos, e também comparamos a biomassa média por parcela de graminóides exóticos e nativos usando o teste t de permutação (Hammer 2001).

## **Resultados**

A distância de influência de borda (DIB) variou de 2 a 60 m para variáveis microclimáticas, 2 a 100 m para estrutura de dossel, e de 0 a 20 m para graminóides. No entanto, a influência de borda apresentou ampla variação entre variáveis e bordas, e não foi significativa em pelo menos metade das bordas para diferentes variáveis (tabela 2). Em três bordas nós não encontramos influência de borda além dos 2 m para qualquer variável analisada, e nas outras bordas nós encontramos influência de borda significativa em até quatro variáveis.

**Table 2.** Distância de influência de borda (m), representada pelo conjunto de distâncias que foram significativamente diferentes do interior ( $p < 0.05$ ), e magnitude de influência de borda (MIB, padronizada de -1 a +1), sublinhada e em outra linha. A distância de pico é apresentada entre parênteses depois da MIB nos casos em que o pico não ocorre na primeira distância significativamente diferente do interior.

Borda	Microclima			Estrutura de dossel		Graminóides		Total
	Vegetação-matriz, local	Temperatura <sup>b</sup>	Umidade <sup>b</sup>	Luz	Altura máxima	Cobertura	Exóticos	
Cerradão - aceiro, Assis	0 – 15	0 – 15 (0 – 5)	0	0 – 10	0, 50	0	ns	ns
	<u>0.06</u>	<u>-0.10</u>	<u>0.69</u>	<u>-0.37</u>	<u>-0.07</u>	<u>1</u>		
Cerrado denso - aceiro, Jataí	5	0 – 2 – 15 (0 – 5)	ns	2 – 5 – 10,	40	ausentes	ns	ns
	<u>0.02</u>	<u>-0.08 (2)</u>		20	<u>0.02</u>			
				<u>0.20 (5)</u>				
Campo cerrado – eucalipto, Itirapina	ns	ns	ns	ns	ns	0 – 5, 20	0 – 5;	ns
						<u>0.87</u>	<u>-1</u>	
Cerrado denso – eucalipto, Vassununga (sul)	ns	ns	15 – 20, 40	10 – 20,	0 – 40, 60 –	ns	0 – 5, 40;	2 – 5, 40
			– 60	60	100		<u>-1</u>	<u>-1 (5)</u>
			<u>-0.44 (50)</u>	<u>0.21</u>	<u>0.09 (30)</u>			
Cerrado denso – eucalipto, Vassununga (norte)	ns	0, 5 – 10, 30 (0	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		<u>-0.06</u>						

Cerradão – cana-de-açúcar, Jataí (leste) <sup>c</sup>	0 – 80 (0) <u>-0.03</u>	2, 15 (ns) 0.06 (15)	20, 50 <u>-0.62</u> (50)	ns	0 <u>-0.06</u>	ausentes	ns	ns
Cerradão – cana-de-açúcar, Jataí (oeste)	ns	ns	ns	ns	0 – 2 <u>-0.02</u>	ausentes	ns	ns
Cerrado denso – pasto, Bauru	0 – 60 (0 – 2) <u>0.03</u>	0 – 5, 15 – 30 <u>-0.09</u> (5)	0 – 15, 30, 50 <u>0.78</u> (15)	ns	0 – 2, 10 – 15 <u>-0.04</u>	0 <u>1</u>	ns	0 <u>0.94</u>
Cerradão – pasto, São Carlos	0 – 40; <u>0.03</u> (2)	0 – 5, 15 – 30 <u>-0.08</u> (30)	0 – 2 <u>0.42</u>	10 – 20 <u>0.21</u>	0 – 2 <u>-0.05</u>	ausentes	ns	ns
Cerrado <i>sensu stricto</i> – pasto, Santa Bárbara	0 – 20, 40, 60 <u>0.05</u>	0 – 15, 30 – 50 <u>-0.11</u>	ns	ns	0, 40 <u>-0.16</u>	0 – 15 <u>0.88</u> (2)	2, 10 <u>-1</u>	ns
Cerrado <i>sensu stricto</i> – urbano, São Carlos	ns	ns	ns	2 <u>-0.22</u>	20, 60 <u>0.22</u>	2 <u>0.69</u>	ns	ns
Cerrado denso em regeneração – estrada, Assis	0 – 15 <u>-0.03</u> (2)	ns	2 <u>-0.66</u>	ns	ns	ausentes	ns	ns
Cerradão – estrada, São Carlos	ns	2 <u>-0.05</u>	ns	0 – 10, 20 <u>0.19</u> (2)	0 <u>-0.044</u>	ns	0 <u>0.79</u>	0, 5 <u>0.96</u>
Cerradão – estrada, Vassununga	ns	10	2	0 – 2	0	0	ns	0

-0.05

-0.67

-0.11

-0.040

1

0.81

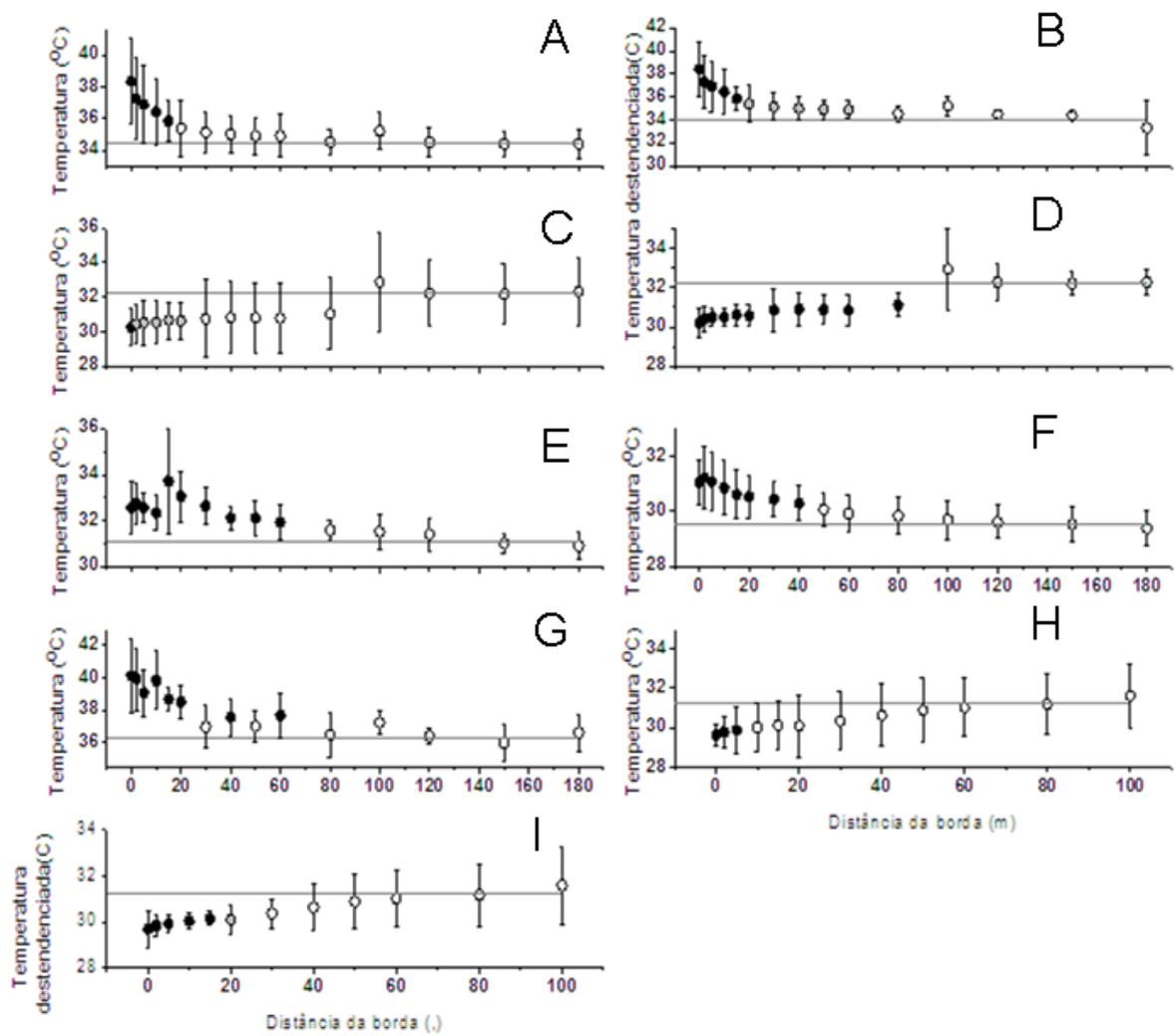
---

<sup>a</sup> Se refere à cidade para São Carlos e Bauru, e para o nome da unidade de conservação nos outros sítios. <sup>b</sup> Quando resultados para valores originais e destendenciados são diferentes, os resultados para valores originais estão entre parênteses e em itálico, e MIB e distância de pico são para valores destendenciados. <sup>c</sup> Área localizada na Fazenda América, adjacente à Estação Ecológica de Jataí.

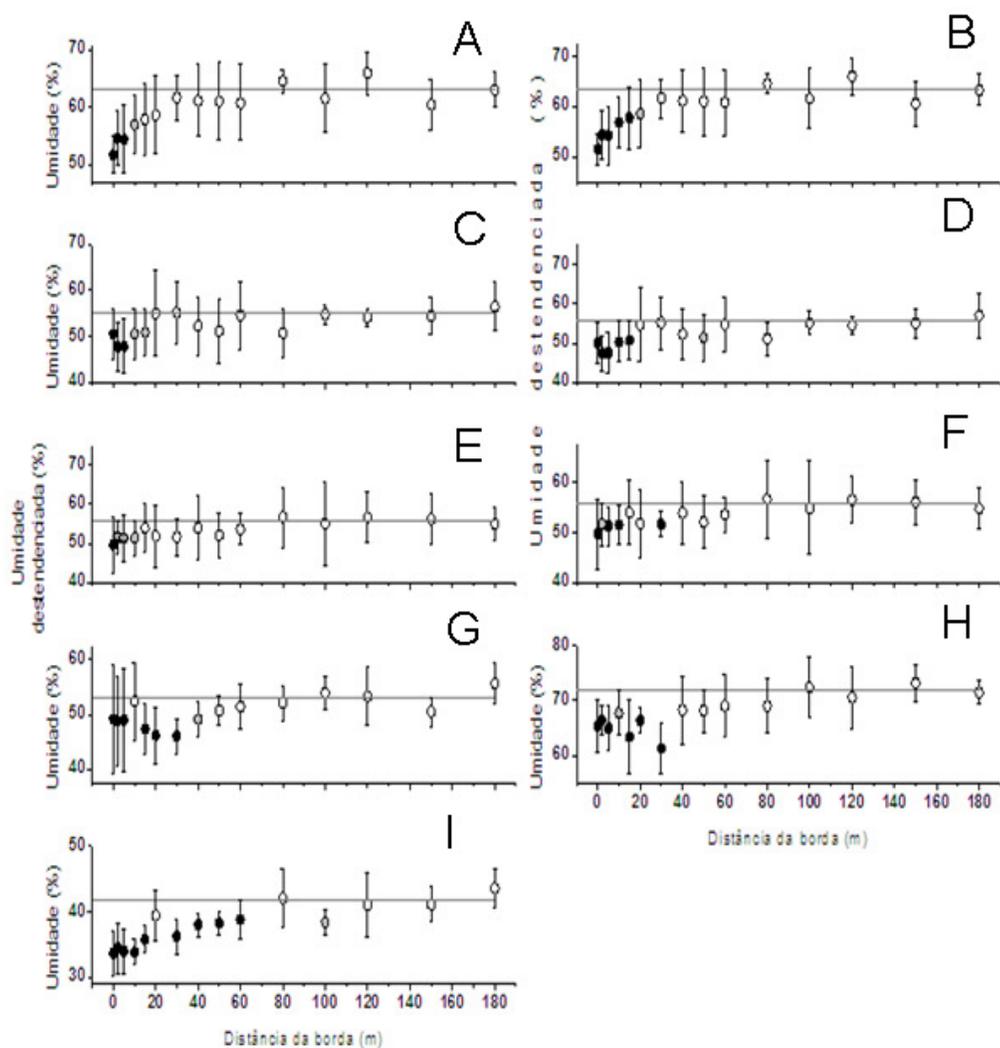
### **Temperatura, umidade do ar e vento**

O destendenciamento foi necessário em nove bordas para temperatura, 11 bordas para umidade, e duas bordas para vento. Em geral, resultados para dados originais e destendenciados foram similares, mas a DIB para valores destendenciados foi maior (tabela 2). Na borda leste com cana-de-açúcar (Jataí), no entanto, nós detectamos influência significativa de borda apenas sobre os valores destendenciados.

Em três bordas com pastagem, na borda norte com eucalipto em Vassununga e na borda com aceiro em Assis, a temperatura foi de 1 a 4°C mais alta na borda do que no interior, com DIB de 15 a 60 m (tabela 2). Padrões para umidade do ar nestas bordas foram similares mas opostos, com umidade 5 a 10% menor nos primeiros 10 a 50 m. Em duas bordas nós observamos influência de borda negativa sobre umidade mas nenhuma influência de borda sobre temperatura. Um padrão inesperado de temperatura mais baixa na borda, especialmente para os valores destendenciados, foi observado em duas bordas de cerradão (tabela 2), nas quais a temperatura na borda foi até 2°C mais baixa do que no interior. Nós observamos influência de borda significativa sobre velocidade do vento apenas na borda com estrada em Vassununga, com velocidade do vento marginalmente maior ( $p \sim 0.05$ ) nos dois primeiros metros.



**Figura 4.** Influência de borda sobre temperatura do ar nas bordas onde ela foi significativa. Símbols pretos: diferenças significativas dos valores de referência de interior ( $p < 0,05$ ); símbolos cinza: diferenças marginalmente significativas ( $0,05 < p < 0,10$ ); símbolos vazios: diferenças não significativas ( $p > 0,10$ ); a linha horizontal representa a média dos valores de referência, medidos entre 120 e 180 m da borda. B, D e I mostram valores de temperatura destendenciados em relação ao tempo; os outros gráficos mostram os valores originais. A, B: borda com aço em Assis; C, D: borda leste com cana-de-açúcar no Jataí; E, F, G: bordas com pastagens em Bauru, São Carlos e Santa Bárbara, respectivamente; H, I: borda com estrada em Assis.

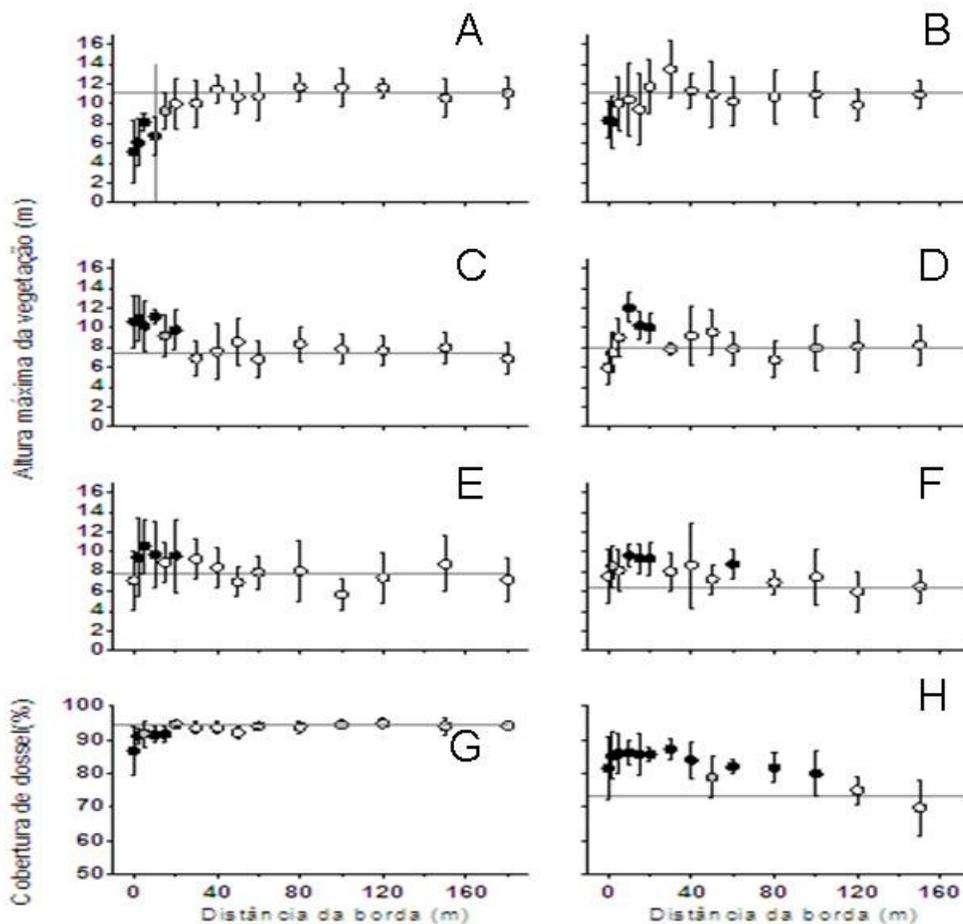


**Figura 5.** Influência de borda sobre umidade do ar nas bordas onde ela foi significativa. Símbols pretos: diferenças significativas dos valores de referência de interior ( $p < 0,05$ ); símbolos cinza: diferenças marginalmente significativas ( $0,05 < p < 0,10$ ); símbolos vazios: diferenças não significativas ( $p > 0,10$ ); a linha horizontal representa a média dos valores de referência, medidos entre 120 e 180 m da borda. B, D, E e F mostram valores de temperatura destendenciados em relação ao tempo; os outros gráficos mostram os valores originais. A, B: borda com acieiro em Assis; C, D: borda com acieiro no Jataí; E, F: borda norte com eucalipto em Vassununga; G, H, I: bordas com pastagem em Bauru, São Carlos e Santa Bárbara, respectivamente.

## **Estrutura de dossel e irradiância**

Padrões borda-interior na estrutura de dossel variaram amplamente, e foram significativos em seis bordas de cerrado denso e cerradão (tabela 2, figura 6). Em uma borda com aceiro e uma com estrada, a altura máxima da vegetação foi menor do que nas condições de referência de interior, enquanto em outra borda com estrada ela foi maior. Em três outras bordas nós observamos uma resposta não-monotônica, com a altura máxima da vegetação aumentando nos primeiros 5 a 10 m e depois decaindo novamente, para retornar aos valores de referência 15 a 20 m da borda (figura 3).

Em relação à cobertura de dossel e à irradiância, nós detectamos influência de borda além dos dois primeiros metros em apenas duas bordas de cerradão (tabela 2, figura 3). Na borda com pasto em Bauru, a cobertura de dossel foi menor nos primeiros 15 m, e irradiância foi mais elevada nos primeiros 50 m. Por outro lado, a cobertura de dossel na borda sul com eucalipto em Vassununga foi superior aos valores de referências até 100 m da borda, com irradiância inferior entre 15 e 60 m.



**Figura 6.** Influência de borda sobre estrutura de dossel em cerrado denso e cerradão; altura de dossel representa a altura máxima da vegetação. Símbolos pretos: diferenças significativas dos valores de referência de interior ( $p < 0,05$ ); símbolos cinza: diferenças marginalmente significativas ( $0,05 < p < 0,10$ ); símbolos vazios: diferenças não significativas ( $p > 0,10$ ); a linha horizontal representa a média dos valores de referência, medidos entre 120 e 180 m da borda. A – F: influência de borda sobre altura máxima da vegetação na borda com aceiro em Assis (A), borda com estrada em Vassununga (B), borda com estrada em São Carlos (C), borda com pastagem em São Carlos (D), borda com aceiro no Jataí (E) e na borda sul com eucalipto em Vassununga (F). G, H: influência de borda sobre cobertura de dossel na borda com pastagem em Bauru e na borda sul com eucalipto em Vassununga.

## Graminóides

A influência de borda sobre graminóides também variou entre as áreas, sendo a distância e magnitude de influência de borda normalmente maior para as espécies exóticas em áreas de campo cerrado e cerrado *sensu stricto*, e para biomassa total de graminóides em áreas de cerradão. Em linhas gerais, nós observamos influência de borda positiva sobre espécies exóticas, especialmente em áreas de campo cerrado e cerrado

*sensu stricto*, e influência de borda negativa sobre espécies nativas. Nós observamos aumento na biomassa total de graminóides em três bordas de cerrado denso e cerradão, com pastagem e estrada, em até 5 m da borda, e redução de biomassa em uma borda de cerrado denso com eucalipto (tabela 2). Nós não observamos influência de borda sobre biomassa total em qualquer outra borda.

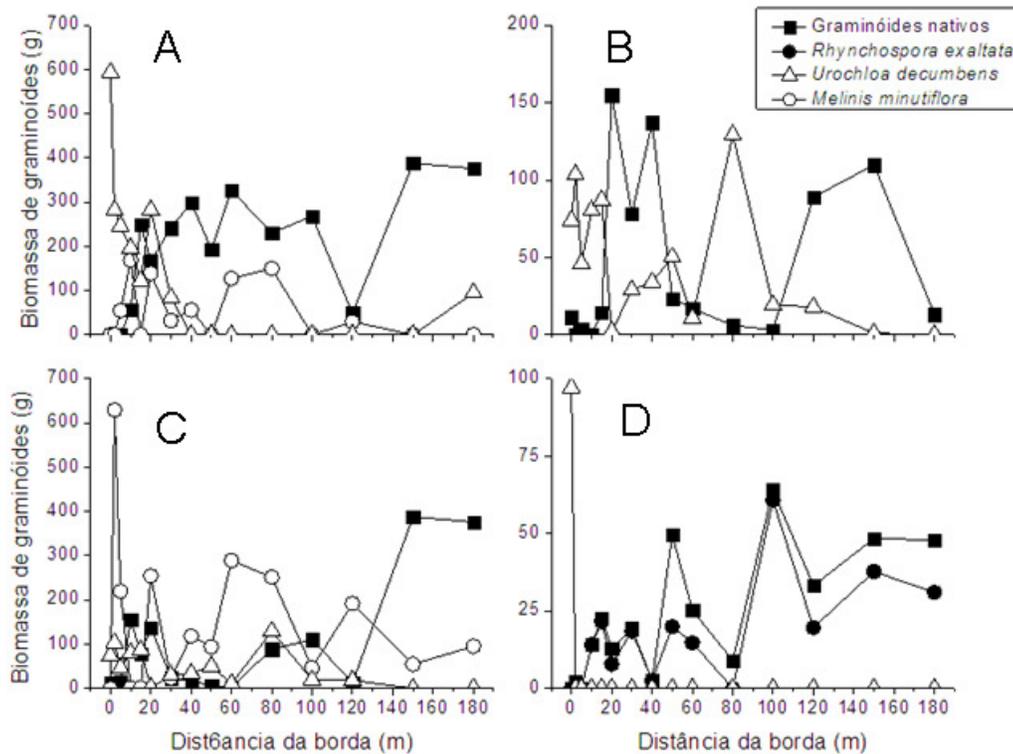
Em relação às espécies exóticas, nas bordas de cerrado denso e cerradão elas foram encontradas apenas na borda imediata (14 coletas na distância de 0 m), exceto para três ocorrências entre 2 e 10 m; em três bordas isso resultou em influência de borda significativa aos 0 m. Na áreas de cerrado *sensu stricto* e campo cerrado, no entanto, elas ocorreram em toda a extensão dos transectos, sendo significativamente mais abundantes na borda, com DIB de 2 a 20 m (tabela 2, figura 5).

As gramíneas exóticas encontradas foram o capim-braquiária (*Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster), capim-gordura (*Melinis minutiflora* P. Beauv.), e capim-colonião (*Panicum maximum* Jacq.). *U. decumbens* foi uma das três espécies mais abundantes na área de campo cerrado (figura 5), junto com *Andropogon bicornis* e *Bulbostylis* sp, com 25 ocorrências cada. A biomassa de *U. decumbens* foi significativamente maior em 0 – 5 m da borda do que no interior. Esta espécie foi, também, a espécie mais abundante nas bordas de cerrado *sensu stricto* com pastagem, ocorrendo em 42 parcelas (nenhuma outra espécie foi encontrada em mais de 8 parcelas); e a segunda espécie mais abundante na outra área de cerrado *sensu stricto*, com 18 ocorrências e com biomassa significativamente superior aos 0 m (figura 3). Neste último local a espécie mais abundante foi *M. minutiflora*, com 41 ocorrências, sendo que ela também ocorreu na área de campo cerrado (15 ocorrências), mas não foi amostrada na

borda de cerrado *sensu stricto* com pastagem. *P. maximum* foi encontrado apenas em duas bordas de cerradão com estrada, em Vassununga e em São Carlos.

Graminóides nativos foram encontrados em toda a extensão dos transectos, em todas as áreas de pesquisa. Nós encontramos influência de borda positiva sobre a biomassa total de espécies nativas em uma borda de cerradão com estrada (DIB = 0 m). Por outro lado, encontramos influência de borda negativa na borda de cerrado *sensu stricto* com pastagem, na borda de campo cerrado com eucalipto, e em uma borda de cerradão com eucalipto, com DIB de 5 a 10 m.

Quando analisamos as espécies mais abundantes separadamente, no entanto, nós apenas observamos influência de borda positiva sobre uma espécie de Poaceae que foi mais abundante aos 0 m na borda de cerradão com estrada em São Carlos e uma influência de borda negativa marginalmente significativa sobre *Andropogon* sp. (Poaceae), ausente entre 0 e 10 m na área de campo cerrado. Nós encontramos associações negativas significativas entre graminóides exóticos e nativos nas bordas de campo cerrado com eucalipto ( $p < 0,0001$ ) e de cerrado *sensu stricto* com pastagem ( $p = 0,001$ ), e uma associação negativa marginalmente significativa na outra área de cerrado *sensu stricto* ( $p = 0,09$ ). Por outro lado, nós encontramos diferenças significativas ( $p_{\text{permutação}} < 0,0001$ ) entre suas biomassas médias por parcelas apenas nesta última borda (gramíneas exóticas:  $182,0 \pm 308,6 \text{ g.m}^{-1}$ , graminóides nativos:  $39,1 \pm 91,1 \text{ g.m}^{-1}$ ).



**Figura 7.** Biomassa total de graminóides nas bordas de campo cerrado e cerrado *sensu stricto* e em uma borda de cerradão. Símbols pretos representam espécies nativas, símbolos vazios representam espécies exóticas. A: borda de campo cerrado com eucalipto em Itirapina; B: borda de cerrado *sensu stricto* com pastagem em Santa Bárbara; C: borda de cerrado *sensu stricto* com área urbana em São Carlos; D: borda sul de cerradão com eucalipto em Vassununga.

## Discussão

Nossos resultados mostram uma grande variação na significância da influência de borda no cerrado paulista. Esta variação aparenta estar relacionada com fatores como estrutura da vegetação e tipo de matriz, com algumas matrizes, como pastagens, exercendo influência de borda tanto sobre o microclima quanto sobre algum aspecto da vegetação. No entanto, fatores como estrutura da vegetação, tipo de matriz e orientação aparentemente não são suficientes para explicar a variação na influência de borda, já que

bordas de cerradão com a mesma orientação e expostas à mesma matriz apresentaram influência de borda sobre variáveis diferentes. Por exemplo, as duas bordas de cerradão com pastagens eram voltadas para o sul; mas enquanto em uma delas nós observamos influência de borda sobre altura máxima da vegetação, na outra a influência de borda foi observada sobre cobertura de dossel. Similarmente, nós observamos influência de borda sobre a umidade do ar em apenas uma das bordas de cerradão com eucalipto, apesar das duas bordas terem a mesma orientação e estarem localizadas no mesmo fragmento. Assim a influência de borda, além de depender da orientação, matriz e outros fatores, varia entre fragmentos e inclusive dentro do mesmo fragmento mesmo que as outras condições sejam similares.

No entanto, alguns padrões relacionados ao tipo de matriz podem ser percebidos. Por exemplo, as duas bordas com aceiro apresentaram influência de borda tanto sobre o microclima quanto sobre a altura máxima da vegetação. Sabe-se que a criação de distúrbios lineares, como estradas, modifica o microclima na borda, mesmo que haja vegetação dos dois lados da área perturbada (Delgado et al. 2007; Pohlman et al. 2007), e que estradas florestais ou aceiros podem provocar modificações na comunidade vegetal (Bowering et al. 2006; Avon et al. 2010). Os nossos resultados mostram que mesmo um aceiro com menos de 10 m de largura pode provocar mudanças significativas no microclima até uma distância de pelo menos 15 m da borda, provavelmente devido ao aumento da incidência solar na borda. A máxima distância de influência de borda sobre o microclima foi de 60 m, sendo menor do que a observada na Amazônia e na Mata Atlântica (Didham & Lawton 1999; Siqueira et al. 2004), mas maior do que a observada

em outras florestas temperadas, subtropicais e tropicais na Europa, nas Ilhas Canárias e na Austrália (Delgado et al. 2007; Honnay et al. 2002; Pohlman et al. 2007).

Em linhas gerais, a influência de borda é causada por fluxos de matéria e energia entre a matriz e o fragmento, levando a modificações na estrutura da vegetação, nos processos ecológicos, e na distribuição de recursos (Cadenasso et al. 2003; Harper et al. 2005; Ries et al. 2004). Teoricamente, quanto maior for o contraste entre o fragmento e a matriz, maiores serão os fluxos e, conseqüentemente, a influência de borda (Cadenasso et al. 2003). Por contraste se entende a diferença em estrutura, função, composição ou microclima entre os dois ambientes (Harper et al. 2005). Os nossos resultados concordam em parte com este modelo, já que a influência de borda sobre o microclima foi mais evidente em áreas adjacentes a pastagens do que em bordas com aceiros. No entanto, apesar do alto contraste, nós não detectamos aumento da temperatura em bordas com estrada e com cana-de-açúcar. No caso das estradas, isso provavelmente se deveu à existência de uma zona de amortecimento entre a estrada e o cerrado.

Embora diversos estudos tenham detectado aumento da temperatura na borda de diferentes ecossistemas (Delgado et al. 2007; Didham & Lawton 1999; Gehlhausen et al. 2000; Heithecker & Halpern 2007; Honnay et al. 2002; Pohlman et al. 2007; Siqueira et al. 2004), a ausência de influência de borda sobre a temperatura também foi detectada em alguns estudos, podendo estar relacionada à orientação da borda, estação do ano ou matriz (Delgado et al. 2007; Gehlhausen et al. 2000; Pohlman et al. 2007). No nosso caso, é possível que em algumas matrizes a mudança na temperatura seja neutralizada por características da própria matriz. Assim, nas bordas com estrada e com cana-de-açúcar, é possível que o aumento da temperatura tenha sido neutralizado por uma maior incidência

de vento na borda: as plantações de cana-de-açúcar eram bastante extensas, o que provavelmente permitiu maiores velocidades de vento; já no caso de estradas, o aumento do vento seria devido ao tráfego de veículos. Outra explicação para as estradas é que, embora o contraste entre o fragmento e a estrada seja muito grande, havia uma espécie de “zona de amortecimento” entre a estrada e o fragmento: em São Carlos esta zona consistia de uma faixa de ~10 m de capim-colonião de aproximadamente 2 m de altura, em Vassununga era uma faixa de grama baixa e com capim-colonião na borda, e em Assis era uma faixa com capim-braquiária isolada da estrada por touceiras de bambu, com um aceiro imediatamente adjacente à borda. O contraste do cerrado com esta zona de amortecimento é muito menor do que com a estrada, o que deve ter reduzido a influência de borda.

A importância da zona de amortecimento também é indicada pela influência de borda sobre altura máxima da vegetação no fragmento em São Carlos, mas não nas outras bordas com estrada: embora esta borda tenha a menor intensidade de tráfego de todas as outras, ela também tem a menor zona de amortecimento, de modo que a presença de uma zona de amortecimento entre uma estrada e a vegetação natural pode ser tão determinante quanto a intensidade do tráfego. No entanto, tendo em vista que o mesmo fragmento pode apresentar ampla variação nos padrões de temperatura borda-interior em diferentes momentos (Newmark 2001), os nossos resultados não podem ser considerados como uma evidência conclusiva de ausência de influência de borda sobre a temperatura em matrizes de cana-de-açúcar e de estrada. Estudos de longo prazo, que acompanhem a variação no microclima na borda e no interior ao longo do ano, são necessários, especialmente para confirmar a redução da temperatura da borda em relação ao interior em uma borda com

estrada e outra com cana-de-açúcar, já que este padrão, até onde sabemos, não foi detectado em outros estudos.

Nós não detectamos influência de borda significativa sobre velocidade do vento. Mesmo assim, nós tivemos algumas evidências indiretas de aumento da incidência e/ou velocidade do vento nas bordas. Em primeiro lugar, ventos mais fortes podem resultar em redução da cobertura de dossel, especialmente durante tempestades (Laurance & Curran 2008), e nós observamos cobertura de dossel reduzida em uma borda de cerradão com pasto; e em segundo lugar, como discutido acima, aumento de vento pode ter neutralizado as variações na temperatura. Existem evidências de influência de borda sobre vento na Floresta Amazônica e na Mata Atlântica (Laurance & Curran 2008; Siqueira et al. 2004), em florestas canadenses (Mascarúa Lopes et al. 2006; Saunders et al. 1991) e em outros ecossistemas (Saunders et al. 1991). Por outro lado, ausência de influência de borda sobre velocidade do vento foi observada em uma floresta mesófila adjacente a estradas e linhas de energia (Pohlman et al. 2007). Vento normalmente ocorre em rajadas curtas (observação pessoal), e isso pode ter nos impedido de detectar influência de borda estatisticamente significativa devido à variação natural na velocidade do vento em curtos intervalos de tempo; o mesmo pode ser dito sobre os resultados de Pohlman et al. (2007). Assim, um método que permita mensurar a variabilidade na velocidade do vento simultaneamente em cada ponto amostral pode ser necessário. Uma alternativa é fazer estudos de longo prazo que capturem a variação em condições microclimáticas em diferentes distâncias, mesmo que as medidas não sejam simultâneas (Newmark 2001).

A estrutura da vegetação, representada por altura e cobertura de dossel no nosso estudo, apresentou padrões de influência de borda mais complexos nas nossas bordas de

cerradão. Nós detectamos três padrões distintos de variação da altura máxima da vegetação com distância da borda: um padrão de aumento da altura da borda para o interior, um padrão de redução da altura, e um padrão não-monotônico, com aumento da altura máxima da vegetação seguido da sua redução. Apesar desta variação nos padrões, a distância de influência de borda foi relativamente constante, variando de 10 a 20 m. No caso de respostas não monotônicas e decrescentes, a distância em que a altura foi máxima variou entre 2 e 10 m. Influência de borda negativa sobre altura máxima da vegetação já foi observada em um cerradão no Brasil central (Lima-Ribeiro 2008), assim como na Floresta Amazônica (Didham & Lawton 1999) e em uma floresta subtropical nas Ilhas Canárias (Delgado et al. 2007), e podem ser causados por danos pelo vento (Laurance & Curran 2008).

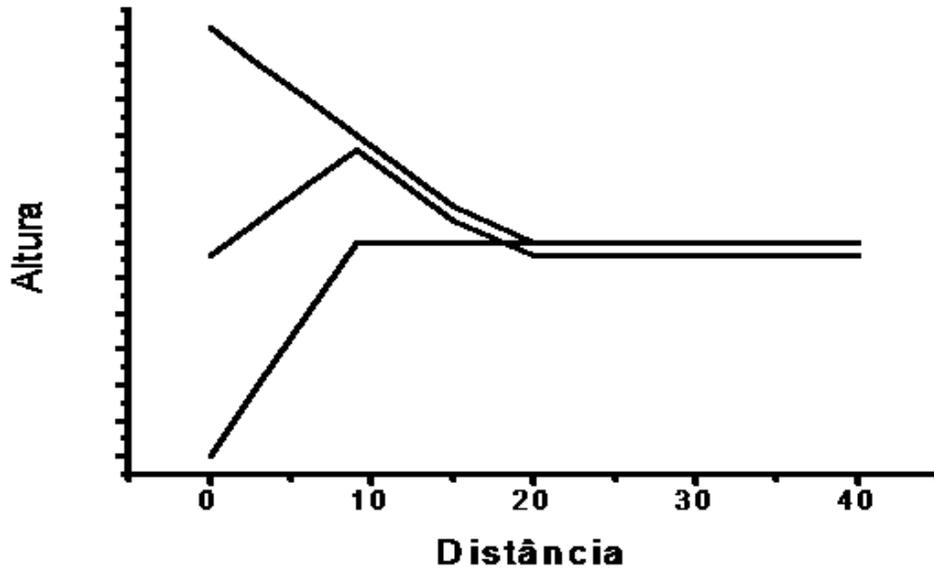
Dano pelo vento pode explicar a redução da altura nos primeiros dois metros na borda com a estrada em Vassununga. Por outro lado, esta redução foi mais perceptível na borda com o aceiro em Assis, uma borda mais recente, com menor contraste e provavelmente menor incidência de vento. Redução gradual da altura de vegetação é um padrão comum em bordas regenerantes, ou seja, onde a linha em que a vegetação foi originalmente cortada não foi mantida (Harper et al. 2005). É possível que este aceiro em Assis fosse mais largo no momento da sua criação, de modo que a vegetação mais baixa na borda represente não uma influência de borda propriamente dita, mas a regeneração da vegetação.

Sendo assim, a influência de borda que poderia ser considerada mais característica do cerrado, pelos nossos resultados, é o aumento na altura do dossel na borda imediata ou nos primeiros 10 m. Não foram encontrados trabalhos na literatura que detectaram altura

máxima da vegetação na borda, no cerrado ou em outros ecossistemas. No entanto, influência de borda positiva, resultante do aumento na incidência luminosa, foi observada em uma floresta de pinheiro na América do Norte, com distância de influência de borda de aproximadamente 5 m, mas sem aumento concomitante na altura média (Bowering et al. 2006).

No caso do cerradão e do cerrado denso, a redução da competição por luz e água resultante da criação da borda permite um maior crescimento das árvores na borda. Por outro lado, a borda normalmente é considerada uma região estressante para espécies nativas, adaptadas às condições de interior (Harper et al. 2005; Saunders et al. 1991). Deste modo, a altura da vegetação na borda de fragmentos de cerradão pode ser resultado de duas influências distintas (figura 8): uma influência de borda positiva resultante da redução da competição e, conseqüentemente, aumento de recursos para os indivíduos crescendo na borda, e uma influência de borda negativa, resultante do estresse das condições microclimáticas encontradas na matriz e na borda. A somatória destas duas influências resulta na influência de borda não monotônica observada em três dos nossos fragmentos. Esta hipótese é apoiada pelo aumento de temperatura, indicativo de estresse ambiental, observado em duas das três bordas com resposta não monotônica, mas não na borda onde encontramos um aumento da altura imediatamente na borda. Assim, quando a consequência da redução da competição for muito mais significativa do que o estresse ambiental na borda, nós iremos observar aumento da altura máxima da vegetação; a resposta não monotônica vai ser observada quando a influência do stress ambiental for expressiva na borda imediata. Por este modelo, ausência de influência de borda

significativa observada em outros fragmentos resulta da neutralização da redução da competição pelo stress ambiental na borda.



**Figura 8.** Modelo para uma influência de borda não monotônica sobre altura de dossel, resultando de duas influências monotônicas, uma positiva e outra negativa; a linha intermediária é a somatória das duas.

Um outro padrão comum de influência de borda é cobertura de dossel reduzida, que foi observada entre 3 e 25 m da borda em áreas sujeitas a incêndios na Amazônia (Didham & Lawton 1999), bordas com estradas nas Ilhas Canárias (Delgado et al. 2007), bordas de retirada de madeira em florestas canadenses (Mascarúa Lopes et al. 2006) e em bordas de florestas mesofíticas nos EUA (Gehlhausen et al. 2000). No nosso estudo, no entanto, nós detectamos cobertura de dossel reduzida, com aumento concomitante de incidência de luz, em apenas uma das nossas onze bordas de cerradão, em Bauru, com distância de influência de borda de 15 m. A ausência de influência de borda nas outras áreas pode ter resultado de influências de borda opostas sobre, por exemplo, árvores de

dossel e de subdossel, de modo que a cobertura total não fosse alterada (Harper & MacDonald 2001); nós também observamos aumento de lianas e vegetação baixa nos primeiros metros da borda (dados não quantificados). Como esta vegetação, embora baixa, ainda assim estivesse acima da altura em que as fotos de dossel foram tiradas, ela pode ter neutralizado a redução da cobertura de dossel de árvores mais altas. Estudos analisando a cobertura de dossel a partir de diferentes alturas são necessárias para confirmar ou refutar esta hipótese.

A influência de borda positiva sobre cobertura de dossel em Vassununga provavelmente reflete a variação natural no solo nesta área, com transição entre neossolo quartzarênico e latossolo (Marco A. Batalha, comunicação pessoal). No entanto, o aumento maior na cobertura de dossel observado imediatamente na borda pode também ter sido influenciado pela irrigação da plantação de eucalipto nesta borda, com 8000 a 21000 L/ha usados imediatamente após o plantio na estação seca (Rafael Mariano da Silva, International Paper do Brasil, com. pess). É possível que a cobertura de dossel na outra borda com silvicultura no mesmo fragmento já fosse elevada demais para que um padrão similar fosse observado.

Nas áreas de cerrado *sensu stricto* e campo cerrado nós observamos extensa invasão por gramíneas africanas. Invasões mediadas por bordas são um fenômeno comum em vegetação savânica e campestre, já que foram observadas em campos australianos e sul-africanos (Cilliers et al. 2008; Morgan 1998), além de serem recorrentes no cerrado (Durigan et al. 2007; Pivello et al. 1999a; Pivello et al. 1999b). Nas bordas de cerradão as gramíneas exóticas estavam restritas à borda imediata (exceto em duas amostras), de modo similar ao que foi observado em uma borda com estrada florestal antiga em uma

floresta europeia (Avon et al. 2010) e também em dois fragmentos de floresta mesofítica norte-americana (Gehlhausen et al. 2000). A explicação mais provável para isso é que estas espécies são heliófilas, típicas de ambientes abertos e, portanto, incapazes de sobreviver nas condições sombreadas do cerrado. Assim, a sua ocorrência na borda seria determinada pelo acesso à luz; em termos teóricos, isso é um caso de distribuição de espécies determinada por “mapeamento de recursos” (*resource mapping*) (Ries et al. 2004).

Em florestas, modificações na composição do subbosque são consideradas modificações secundárias, causados tanto por fatores abióticos quanto pela modificação da estrutura florestal (Harper et al. 2005). No entanto, isso provavelmente não se aplica à invasão de savanas e campos por gramíneas invasoras, já que nós não encontramos evidência de influência de borda sobre irradiância ou cobertura de dossel nessas bordas. É possível que, nestes ambientes abertos e sem dossel contínuo, a expansão de gramíneas resulte diretamente da criação da borda: a criação da borda facilitaria a chegada de propágulos; e a retirada da vegetação nativa na borda imediata abriria espaço físico para que gramíneas exóticas germinassem. A partir do estabelecimento inicial, estas espécies se espalhariam gradativamente, por exemplo, por reprodução vegetativa, para o interior do fragmento, deslocando espécies nativas no processo (Pivello et al. 1999a; Pivello et al. 1999b). O impacto negativo de gramíneas exóticas é indicado, nos nossos dados, pela associação negativa entre elas e os graminóides nativos em duas das nossas bordas e pela biomassa maior de gramíneas exóticas em uma terceira borda, mais invadida. No cerrado, gramíneas exóticas podem também afetar a sobrevivência de plântulas de espécies

arbóreas (Hoffmann & Haridasan 2008), além de deslocar espécies nativas de Asteraceae (Almeida-Neto et al. 2010) e de graminóides (Pivello et al. 1999b).

Além de dinâmica sujeita a influência de borda, gramíneas exóticas também podem apresentar uma espécie de dinâmica de clareiras (Cilliers et al. 2008). Isso explicaria a presença de gramíneas exóticas em até 180 m da borda. No caso da área de cerrado *sensu stricto* em São Carlos, a presença de gramíneas exóticas em toda sua extensão pode ser devida à retirada do plantio de eucalipto na década de 1970 que provavelmente criou condições favoráveis para o estabelecimento e expansão de braquiária e capim-gordura. Assim, nesta área, a influência de borda só foi detectada até 2 m devido ao alto grau de invasão do fragmento; em outras áreas de campo cerrado e cerrado *sensu stricto* a influência de borda foi mais aparente por elas estarem menos invadidas, provavelmente pelo histórico de menor impactação.

### **Conclusões e implicações para conservação**

Nossos resultados mostram uma ampla variação na influência de borda no cerrado; no entanto, alguns padrões são detectáveis: aumento de temperatura e redução da umidade em bordas com pastagens e aceiros, aumento na altura do dossel em algumas bordas de cerradão, e invasão por gramíneas exóticas em fragmentos de cerrado *sensu stricto* e campo cerrado. Em geral, todas as variáveis analisadas estiveram sujeitas à influência de borda em pelo menos um local de estudo, sendo que esta influência parece estar relacionada tanto à matriz quanto à fitofisionomia. A maior distância de influência de borda foi encontrada para temperatura e umidade, e a menor para vento, com variáveis relacionadas a vegetação apresentando distância de influência de borda intermediárias.

No entanto, não é possível prever como será a influência de borda em uma dada área levando em conta apenas a estrutura da vegetação, a matriz e a orientação da borda. Além disso, os nossos resultados para distância de influência de borda devem ser interpretados como uma estimativa mínima, já que uma amostragem com mais de cinco transectos por borda poderia resultar em estimativas de distância de influência de borda maiores (Harper & Macdonald, em preparação). Assim, nós recomendamos, para fins de manejo, que seja considerada uma distância de influência de borda mínima de 80 m – a máxima distância na qual detectamos variações no microclima, independentemente de fitofisionomia e matriz. Em outras palavras, nós recomendamos que a área de interior de fragmentos de cerrado seja calculada com base em uma distância de influência de borda de 80 m.

Além disso, nós recomendamos a criação de zonas de amortecimento entre as áreas de cerrado e as estradas ou pastagens adjacentes. Estas zonas de amortecimento, no entanto, não deveriam ser compostas de espécies exóticas tais como *Panicum maximum* devido à sua alta inflamabilidade (Silva Matos et al. 2002). Recomendamos que elas sejam ocupadas por vegetação não-inflamável e, em situações em que a vizinhança possa aumentar a incidência de vento, contenham uma vegetação alta, que funcione como quebra-vento. Outra questão importante é a dos aceiros: embora eles sejam muito importantes para prevenir a propagação do fogo para o interior de uma área protegida, eles podem apresentar influência de borda de pelo menos 15 m sobre o microclima. Assim, aceiros devem ser planejados levando em conta o impacto que estas mudanças microclimáticas podem causar na comunidade.

## Referências

- Almeida-Neto, M., P. I. Prado, U. Kubota, J. M. Bariani, G. H. Aguirre, e T. M. Lewinsohn. 2010. Invasive grasses e native Asteraceae in the Brazilian Cerrado. *Plant Ecology* **209**:109-122.
- Anderson, L., e S. Burgin. 2002. Influence of woodland remnant edges on small skinks (Richmond, New South Wales). *Austral Ecology* **27**:630-637.
- Avon, C., L. Berges, Y. Dumas, e J. L. Dupouey. 2010. Does the effect of forest roads extend a few meters or more into the adjacent forest? A study on understory plant diversity in managed oak stands. *Forest Ecology e Management* **259**:1546-1555.
- Bowering, M., V. Lemay, e P. Marshall. 2006. Effects of forest roads on the growth of adjacent lodgepole pine trees. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* **36**:919-929.
- Brito, D., e F. A. S. Fernandez. 2000. Dealing with extinctions is forecer: understanding the risks faced by small populations. *Ciência e Cultura* **52**: 161-170.
- Cadenasso, M. L., e S. T. A. Pickett. 2000. Linking forest edge structure to edge function: mediation of herbivore damage. *Journal of Ecology* **88**:31-44.
- Cadenasso, M. L., S. T. A. Pickett, K. C. Weathers, e C. G. Jones. 2003. A framework for a theory of ecological boundaries. *Bioscience* **53**:750-758.
- Carvalho, W. A. C., A. T. Oliveira Filho, M. A. L. Fontes, e N. Curi. 2007. Variação espacial da estrutura da comunidade arbórea de um fragmento de floresta semidecídua em Piedade do Rio Grande, MG, Brasil. *Revista Brasileira de Botânica* **30**: 316-335.

- CIIAGRO - Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas. 2010.  
<<http://www.ciiagro.sp.gov.br/>>
- Cilliers, S. S., N. S. G. Williams, e F. J. Barnard. 2008. Patterns of exotic plant invasions in fragmented urban e rural grasslands across continents. *Landscape Ecology* **23**:1243-1256.
- Coutinho, L. M. 1978. O conceito de cerrado. *Revista Brasileira de Botânica* **1**:17-23.
- Delgado, J. D., N. L. Arroyo, J. R. Arevalo, e J. M. Fernandez-Palacios. 2007. Edge effects of roads on temperature, light, canopy cover, e canopy height in laurel e pine forests (Tenerife, Canary Islands). *Landscape e Urban Planning* **81**:328-340.
- Didham, R. K., J. Ghazoul, N. E. Stork, e A. J. Davis. 1996. Insects in fragmented forests: A functional approach. *Trends in Ecology & Evolution* **11**:255-260.
- Didham, R. K., e J. H. Lawton. 1999. Edge structure determines the magnitude of changes in microclimate e vegetation structure in tropical forest fragments. *Biotropica* **31**:17-30.
- Durigan, G. 2006. Observations on the southern cerrados e their relationship with the core area in R. T. Pennington, G. P. Fewis, e J. A. Ratter, editors. *Neotropical savannas e seasonally dry forests: plant diversity, biogeography, e conservation*. CRC Press, Boca Ratón.
- Durigan, G., M. F. de Siqueira, e G. Franco. 2007. Threats to the cerrado remnants of the state of Sao Paulo, Brazil. *Scientia Agricola* **64**:355-363.
- Eigenbrod, F., S. J. Hecnar, e L. Fahrig. 2009. Quantifying the Road-Effect Zone: Threshold Effects of a Motorway on Anuran Populations in Ontario, Canada. *Ecology e Society* **14**.

- Fagan, W. E., R. S. Cantrell, e C. Cosner. 1999. How habitat edges change species interactions. *American Naturalist* **153**:165-182.
- Fahrig, L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology Evolution e Systematics* **34**:487-515.
- Fletcher, R. J. 2005. Multiple edge effects e their implications in fragmented landscapes. *Journal of Animal Ecology* **74**:342-352.
- Fontoura, S. B., G. Ganade, e J. Laroocca. 2006. Changes in plant community diversity and composition across an edge between Araucaria forest and pasture in South Brazil. *Revista Brasileira de Botânica* **29**: 79-91.
- França, L. C., e M. A. Marini. 2009. A test of the edge effect on predation of natural e artificial bird nests in the Cerrado. *Zoologia* **26**:241-250.
- Fraser, F. J., e P. J. Whitehead. 2005. Predation of artificial ground nests in Australian tropical savannas: inverse edge effects. *Wildlife Research* **32**:313-319.
- Frazer, G. W., C. D. Canham, e K. P. Lertzman. 1999. Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure e gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual e program documentation. Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia.
- García, D., e N. A. Chacoff. 2007. Scale-dependent effects of habitat fragmentation on hawthorn pollination, frugivory, e seed predation. *Conservation biology* **21**:400-411.
- Gehlhausen, S. M., M. W. Schwartz, e C. K. Augspurger. 2000. Vegetation e microclimatic edge effects in two mixed-mesophytic forest fragments. *Plant Ecology* **147**:21-35.

- Goosem, M. 2000. Effects of tropical rainforest roads on small mammals: edge changes in community composition. *Wildlife Research* **27**:151-163.
- Gottsberger, G., e I. Silberbauer-Gottsberger 2006. *Life in the Cerrado: a South American Tropical Seasonal Ecosystem*. Reta Verlag, Ulm.
- Hammer, Ø. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education e Data Analysis. . Page 9pp. in D. A. T. Harper, editor. Ryan , P. D., *Palaeontologia Electronica*.
- Harper, K. A., D. Lesieur, Y. Bergeron, e P. Drapeau. 2004. Forest structure e composition at young fire e cut edges in black spruce boreal forest. *Canadian journal of forest research* **34**:289-302.
- Harper, K. A., e S. E. MacDonald. 2001. Structure e composition of riparian boreal forest: New methods for analyzing edge influence. *Ecology* **82**:649-659.
- Harper, K. A., e S. E. Macdonald. 2002. Structure e composition of edges next to regenerating clear-cuts in mixed-wood boreal forest. *Journal of vegetation science* **13**:535-546.
- Harper, K. A., S. E. Macdonald, P. J. Burton, J. Q. Chen, K. D. Brosofske, S. C. Saunders, E. S. Euskirchen, D. Roberts, M. S. Jaiteh, e P. A. Esseen. 2005. Edge influence on forest structure e composition in fragmented landscapes. *Conservation Biology* **19**:768-782.
- Harper, K. A., L. Mascarua-Lopez, S. E. Macdonald, e P. Drapeau. 2007. Interaction of edge influence from multiple edges: examples from narrow corridors. *Plant Ecology* **192**:71-84.

- Heithecker, T. D., e C. B. Halpern. 2007. Edge-related gradients in microclimate in forest aggregates following structural retention harvests in western Washington. *Forest Ecology e Management* **248**:163-173.
- Hoffmann, W. A., e M. Haridasan. 2008. The invasive grass, *Melinis minutiflora*, inhibits tree regeneration in a Neotropical savanna. *Austral Ecology* **33**:29-36.
- Honnay, O., K. Verheyen, e M. Hermy. 2002. Permeability of ancient forest edges for weedy plant species invasion. *Forest Ecology e Management* **161**:109-122.
- Jardim, A. V. F., e M. A. Batalha. 2009. Dispersal Syndromes Related to Edge Distance in Cerrado Senu Stricto Fragments of Central-Western Brazil. *Brazilian Archives of Biology e Technology* **52**:1167-1177.
- Klink, C. A., e R. B. Machado. 2005. Conservation of the Brazilian Cerrado. *Conservation Biology* **19**:707-713.
- Laurance, W. F., e T. J. Curran. 2008. Impacts of wind disturbance on fragmented tropical forests: A review e synthesis. *Austral Ecology* **33**:399-408.
- Laurance, W. F., L. V. Ferreira, J. M. Rankin-De Merona, e S. G. Laurance. 1998. Rain forest fragmentation e the dynamics of Amazonian tree communities. *Ecology* **79**:2032-2040.
- Li, L. G., X. Y. He, X. Z. Li, Q. C. Wen, e H. S. He. 2007. Depth of edge influence of the agricultural-forest landscape boundary, Southwestern China. *Ecological Research* **22**:774-783.
- Lima-Ribeiro, M. D. 2008. Edge effects on vegetation e population structure in Cerradao fragments of Southwest Goias, Brazil. *Acta Botanica Brasilica* **22**:535-545.
- Lowry, R. 2010. *Concepts & Applications of Inferential Statistics*.

- Marchand, P., e G. Houle. 2006. Spatial patterns of plant species richness along a forest edge: What are their determinants? *Forest Ecology e Management* **223**:113-124.
- Mascarúa Lopes, L. E., K. A. Harper, e P. Drapeau. 2006. Edge influence on forest structure in large forest remnants, cutblock separators, e riparian buffers in managed black spruce forests. *Écoscience* **13**:8.
- Melo, C., e M. A. Marini. 1997. Predação de ninhos artificiais em fragmentos do Brasil central. *Ornitologia neotropical* **8**:7-14.
- Meyer, S. T., I. R. Leal, e R. Wirth. 2009. Persisting Hyper-abundance of Leaf-cutting Ants (*Atta* spp.) at the Edge of an Old Atlantic Forest Fragment. *Biotropica* **41**:711-716.
- Moenting, A. E., e D. W. Morris. 2006. Disturbance e habitat use: is edge more important than area? *Oikos* **115**:23-32.
- Morgan, J. W. 1998. Patterns of invasion of an urban remnant of a species-rich grassland in southeastern Australia by non-native plant species. *Journal of Vegetation Science* **9**:181-190.
- Murcia, C. 1995. EDGE EFFECTS IN FRAGMENTED FORESTS - IMPLICATIONS FOR CONSERVATION. *Trends in Ecology & Evolution* **10**:58-62.
- Myers, N. 2003. Biodiversity hotspots revisited. *Bioscience* **53**:916-917.
- Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B. da Fonseca, e J. Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* **403**:853-858.
- Newmark, W. D. 2001. Tanzanian forest edge microclimatic gradients: Dynamic patterns. *Biotropica* **33**:2-11.

- Olifiers, N., e R. Cerqueira. 2006. Fragmentação de Habitat: Efeitos históricos e ecológicos. in C. F. D. Rocha, H. G. Bergallo, M. V. Sluys, e A. M. A. S., editors. **Biologia da Conservação: Essências**. Dirlene Ribeiro Martins, São Carlos.
- Paciencia, M. L. B., e J. Prado. 2004. Efeitos de borda sobre a comunidade de pteridófitas na Mata Atlântica da região de Una, sul da Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Botânica* **27**: 641-653.
- Pires, A. S., F. A. S. Fernandez, e C. S. Barros. 2006. Vivendo em um mundo em pedaços: efeitos da fragmentação florestal sobre comunidades e populações animais in C. F. D. Rocha, H. G. Bergallo, M. V. Sluys, e M. a. S. Alves, editors. *Biologia da conservação: essências*. RiMa, São Carlos.
- Pires, A. S., F. A. S. Fernandez, D. Freitas, e B. R. Feliciano. 2005. Influence of edge e fire-induced changes on spatial distribution of small mammals in Brazilian Atlantic forest fragments. *Studies on Neotropical Fauna e Environment* **40**:7-14.
- Pivello, V. R., V. M. C. Carvalho, P. F. Lopes, A. A. Peccinini, e S. Rosso. 1999a. Abundance e distribution of native e alien grasses in a "cerrado" (Brazilian savanna) biological reserve. *Biotropica* **31**:71-82.
- Pivello, V. R., C. N. Shida, e S. T. Meirelles. 1999b. Alien grasses in Brazilian savannas: a threat to the biodiversity. *Biodiversity e Conservation* **8**:1281-1294.
- Pohlman, C. L., S. M. Turton, e M. Goosem. 2007. Edge effects of linear canopy openings on tropical rain forest understory microclimate. *Biotropica* **39**:62-71.
- Reis, N. R., M. L. S. Barbieri, I. P. Lima, e A. L. Peracchi. 2003. O que é melhor para manter a riqueza de espécies de morcegos (Mammalia, Chiroptera): um fragmento

- florestal grande ou vários fragmentos de pequeno tamanho? *Revista brasileira de zoologia* **20**:225-230.
- Ribeiro, J. F., e B. M. T. Walter. 2008. As principais fisionomias do bioma Cerrado. Pages 151-199 in S. M. Sano, S. P. Almeida, e J. F. Ribeiro, editors. *Cerrado: Ecologia e flora*. Embrapa Informação Tecnológicas, Brasília - DF.
- Ries, L., R. J. Fletcher, J. Battin, e T. D. Sisk. 2004. Ecological responses to habitat edges: Mechanisms, models, e variability explained. *Annual Review of Ecology Evolution e Systematics* **35**:491-522.
- Ries, L., e T. D. Sisk. 2004. A predictive model of edge effects. *Ecology* **85**:2917-2926.
- Santos, A. M. M., e B. A. Santos. 2008. Are the vegetation structure and composition of the shrubby Caatinga free from edge influence? *Acta Botanica Brasilica* **22**: 1077-1084.
- Saunders, D. A., R. J. Hobbs, e C. R. Margules. 1991. Biological consequences of ecosystem fragmentation - a review. *Conservation Biology* **5**:18-32.
- Schultz, C. B., e E. E. Crone. 2005. Patch size e connectivity thresholds for butterfly habitat restoration. *Conservation biology* **19**:887-896.
- Silva Matos, D. M., C. J. F. Santos, e D. R. Chevalier. 2002. Fire e restoration of the largest urban forest of the world in Rio de Janeiro City, Brazil. *Urban Ecosystems*.
- Siqueira, L. P., M. B. Matos, D. M. Silva Matos, R. d. C. Q. Portela, M. I. G. Braz, e L. Silva-Lima. 2004. Using the variances of microclimate variables to determine edge effects in small Atlantic rain forest fragments, South-Eastern Brazil. *Ecotropica* **10**:59-64.

- Smith, T. M., J. S. Hindell, G. P. Jenkins, e R. M. Connolly. 2010. Seagrass patch size affects fish responses to edges. *Journal of Animal Ecology* **79**:275-281.
- Toledo-Aceves, T., e F. García-Oliva. 2008. Effects of forest-pasture edge on C, N e P associated with *Caesalpinia eriostachys*, a dominant tree species in a tropical deciduous forest in Mexico. *Ecological research* **23**:271-280.
- Vanwallegem, T., e R. K. Meentemeyer. 2009. Predicting Forest Microclimate in Heterogeneous Landscapes. *Ecosystems* **12**:1158-1172.
- Yahner, R. H. 1988. Changes in wildlife communities near edges. *Conservation biology* **2**:333-339.

**Apêndice. Código de R usado para fazer a análise da influência de borda usando o procedimento RTEI – *Randomization test for assessing edge influence*.**

```
RTEI <- function (x, Ntrans=5, Nedge=12, Nint=3,
Nperm=10000, alpha=0.05, probs=TRUE) {
```

```
  # This is a function for depth of edge influence - DEI
  analysis, based on permutation of critical values obtained using
  edge e interior values. x: data set, with two columns: dist - the
  distance of each measurement, e a second column, with the values
  measured; Ntrans: number of edge-interior transectos, defaults to
  5; Nedge: number of samples considered to be edge, in each
  transect, defaults to 12; Nint: number of samples considered to
  be interior, in each transect, defaults to 3; Nperm: number of
  permutations, defaults to 10000; alpha: critical alpha level,
  defaults do 0.05; probs: if you want the probabilities of each
  distance being significantly different from interior (TRUE) or
  only if the probability is below or above the alpha level
  (FALSE), defaults to TRUE.
```

```
  #When using this script in a publication, please cite the
  following two papers: Harper, K. A. e Macdonald, S. E..
  Quantifying distance of edge influence: a comparison of methods e
  a new randomization method. In prep. e Dodonov, P., Harper, K.
```

A., e Silva Matos, D. M. Variation in vegetation e microclimate at forest edges related to land use e vegetation structure in cerrado in São Paulo, Brazil. *In prep.*

```
# Variables included in the function: coisa (the data set);  
Ntrans (number of transects); Nedge (number of distances or rows  
corresponding to the edge); Nint (number of distances or rows  
corresponding to the interior).
```

```
# Input file: must have two columns. The first column, dist,  
contains the distances of each measurement; the second column  
contains the values of the variable.
```

```
# Step 1: sort according to distances from the edge  
coisa <- x[order(x$dist),]  
  
# Step 2: Separate the dataset into two, one for the edge  
values e one for the interior values. This step puts all measures  
taken at the edge into one objects, e all measurements taken in  
the interior into another object.
```

```
edge=Ntrans*Nedge #number of edge measurement  
int=Ntrans*Nint #number of interior measurements  
coisa.edge <- coisa[1:edge,]  
  
#Edge values are transformed into a matrix
```

```

    coisa.edge=t(matrix(data=coisa.edge[,2],          nrow=Ntrans,
ncol=Nedge))

    coisa.int <- coisa[edge+1:int,2]

    #Create an object with each row containg edge values e
interir values

    joined = matrix (nrow=Nedge, ncol=Ntrans+Ntrans*Nint)
    for (i in 1:Nedge) joined[i,]=c(coisa.edge[i,],coisa.int)

    # Create a function that calculates the mean difference of a
vector, permutes it e recalculates it.

    permute.MEI <- function (x) {
    permutation=numeric(0)
    perm.MEI=numeric(0)
    real.MEI      <-      (mean(x[1:Ntrans],na.rm=TRUE)      -
mean(x[(Ntrans+1):length(x)],na.rm=TRUE))/(mean(x[1:Ntrans],na.rm
=TRUE) + mean(x[(Ntrans+1):length(x)],na.rm=TRUE))

    Nperm <- Nperm-1
    for (i in 1:Nperm) {
    permutation <- sample (x)
    perm.mean.edge=mean(permutation[1:Ntrans],na.rm=TRUE)
    perm.mean.int=mean(permutation[(Ntrans+1):length(permutation
)],na.rm=TRUE)
    perm.MEI[i]      <-      (perm.mean.edge      -
perm.mean.int)/(perm.mean.edge + perm.mean.int)

```

```

    }
    perm.MEI=c(perm.MEI,real.MEI)
    if      (probs==TRUE)      {prob.below      <-
length(perm.MEI[perm.MEI<=real.MEI])/length(perm.MEI)
    prob.above      <-
length(perm.MEI[perm.MEI>=real.MEI])/length(perm.MEI)
    output      <-
c(mean(x[1:Ntrans],na.rm=TRUE),real.MEI,prob.below,prob.above)
    output}
    else {lim.inf <- quantile(perm.MEI,(alpha/2),na.rm=TRUE)
lim.sup <- quantile(perm.MEI,(1-alpha/2),na.rm=TRUE)
sign.MEI.inf <- ifelse(real.MEI<=lim.inf,1,0)
sign.MEI.sup <- ifelse (real.MEI>=lim.sup,1,0)
    output<-
c(mean(x[1:Ntrans],na.rm=TRUE),real.MEI,sign.MEI.inf,sign.MEI.sup
)
    output
    }
    }
    answer=apply(joined,1,permute.MEI)
    t(answer)}

```