Estados alternativos funcionais, mecanismos de *feedback* e resiliência da vegetação tropical

Bolsas Funbio – Conservando o Futuro - Doutorado

PPG Ecologia UFSC

Proponente: Marcio Baldissera Cure – Bacharel em Gestão Ambiental, Mestre em Ecologia. Doutorando em Ecologia.
http://lattes.cnpq.br/1138521779927217/
Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Ciências Físicas e Matemáticas. Campus Universitário Trindade, s/n, Sala 5, MIP, Trindade. CEP 88040-970. Florianópolis, SC. Caixa Postal: 476

Orientadora: Marina Hirota – Professor adjunto. Dedicação exclusiva. Bacharel em Matemática Aplicada e Computacional, Mestre em Engenharia Elétrica, Doutora em Meteorologia.
http://lattes.cnpq.br/1481877400053985/
Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Ciências Físicas e Matemáticas. Campus Universitário Trindade, s/n, Sala 5, MIP, Trindade. CEP 88040-970. Florianópolis, SC. Caixa Postal: 476

Jardim de Maytrea, Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. Foto de Bernardo Flores (2018)

INTRODUÇÃO

Alta diversidade de atributos funcionais em uma floresta da bacia Amazônica implica em incremento da resiliência diante das mudanças climáticas (SAKSCHEWSKI et al., 2016). Atributos funcionais são características, por exemplo, morfológicas, fisiológicas e comportamentais, que descrevem um determinado organismo (TILMAN, 2001) e são adaptações às condições naturais locais (BRODRIBB, 2017). Em contrapartida, os atributos da vegetação influenciam na manutenção destas condições (SCHEFFER et al., 2005). Além disso, quanto maior a variação de atributos, mais eficiente é o aproveitamento dos recursos no ecossistema e maior é a sua produtividade (TILMAN, 2001). Sabe-se, ainda, que a diversidade funcional aumenta com o aumento na riqueza de espécies, uma vez que a variação dos atributos funcionais é maior em comunidades com mais espécies (TILMAN, 2001). Por conseguinte, a diversidade funcional incrementa a resiliência do funcionamento do ecossistema pela redundância e pela variedade de respostas às mudanças ambientais (ELMQVIST et al., 2003). Sendo assim, a perda de atributos funcionais causada pelas mudanças de origem antrópica na biodiversidade, somadas às mudanças climáticas, diminuem a resiliência dos ecossistemas (CHAPIN III et al., 2000). Além disso, a interdependência de causas e efeitos amplificam/diminuem tais perturbações (STROGATZ, 2004), alteram o funcionamento da biosfera, refletem no sistema climático e atingem os seres humanos através de alterações na provisão dos serviços ecossistêmicos (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005). Neste sentido, as mudanças climáticas futuras podem ser absorvidas por sistemas mais resilientes, formados por alta diversidade de atributos funcionais que tem um efeito positivo na biomassa (SAKSCHEWSKI et al., 2016), o que pode potencialmente contribuir para desacelerar as mudanças.

Os sistemas naturais (e humanos) possuem uma capacidade de absorver impactos que se baseia em mecanismos internos de auto-organização como a perda de folhas das árvores de uma floresta no inverno, por exemplo. Essa capacidade é conceituada como resiliência ecológica (HOLLING, 1973, 1996) e é incrementada pela diversidade e redundância funcional (BIGGS et al., 2012). A resiliência tem como princípio a existência de estados alternativos de funcionamento. Estes estados alternativos são caracterizados por diferentes interações e mecanismos de *feedback* (retroalimentação) que podem resultar em uma nova identidade do sistema (SCHEFFER; CARPENTER, 2003). Florestas tropicais e savanas, por exemplo, foram sugeridos como estados alternativos, em parte, moldados por mudanças nos regimes de precipitação média anual (MAP)

(HIROTA et al., 2011). Sendo assim, mudanças graduais em MAP podem potencialmente alterar o funcionamento dos ecossistemas, suas interações e propriedades emergentes, e podem levar a estados alternativos indesejados aos seres humanos. Além disso, é aceitável a possibilidade de uma mudança abrupta na atmosfera terrestre (BARNOSKY et al., 2012) e no sistema terrestre (STEFFEN et al., 2018) como consequência do efeito cascata de impactos pontuais.

A cobertura florestal em ecossistemas tropicais é determinada em larga escala pela MAP (HIROTA et al., 2011). Entretanto, existe um intervalo de (MAP) em que pode ocorrer tanto vegetação de floresta como de savana. A existência de mais de um estado de estabilidade com as mesmas condições ambientais, onde a transição de um estado para outro ocorre de forma não linear e com sobreposição em relação à variável independente (MAP), implica na existência de histerese (SCHEFFER; CARPENTER, 2003). Ademais, o limite que separa estes dois estados de estabilidade é caracterizado por uma alta instabilidade (SCHEFFER et al., 2001). A mudança de um estado para o outro (ou sua permanência no estado atual) é controlada pelo balanço entre *feedbacks* positivos e negativos. Existem diversos modelos para explicar a bistabilidade floresta-savana (e.g. BOND; WOODWARD; MIDGLEY, 2005; HIROTA et al., 2011; STAAL et al., 2016; WUYTS; CHAMPNEYS; HOUSE, 2017). Entretanto, há dificuldade em se diminuir a incerteza inerente aos sistemas complexos devido ao grande número de interações, *feedbacks*, variabilidade climática, heterogeneidade espacial, variabilidade individual (VAN NES; SCHEFFER, 2005), pela baixa disponibilidade de dados de campo e pelo erro associado às medições e pela não linearidade das respostas.

Mudanças na vegetação natural do cerrado para pastos e outras culturas podem levar à diminuição de (MAP) e da evapotranspiração (HOFFMANN; JACKSON, 2000; IPCC, 2014). Entretanto, a precipitação não diminuirá uniformemente ao longo do ano. Esta diminuição provavelmente ocorrerá de forma concentrada no início e no fim da estação úmida (HOFFMANN; JACKSON, 2000). No Cerrado e na savana dos llanos, no norte da América do Sul, existe uma “mini-estação seca” no meio da estação úmida que pode aumentar em duração e intensidade em resposta à perda da cobertura natural. Estas mudanças vão alterar os padrões sazonais do clima do Cerrado e refletir de duas maneiras na regeneração da vegetação. Em primeiro lugar, as plântulas são mais sensíveis ao estresse hídrico (i.e. falta de água) no período de chuvas e isto afeta o seu estabelecimento e sobrevivência. Segundo, pelo aumento da probabilidade e intensidade das queimadas que também impactam negativamente a cobertura arbórea. Estes efeitos negativos na

cobertura vegetal retroalimentam as mudanças climáticas que, por sua vez, reforçam esses efeitos (HOFFMANN; JACKSON, 2000) (Figura 1). Além disso, os modos de variabilidade climática tem papel importante na funcionalidade dos ecossistemas (LUCAS et al., 2016). Sendo assim, fica evidente o efeito da sazonalidade nos padrões de distribuição da vegetação tropical e consequentemente na distribuição dos atributos funcionais responsáveis pelas respostas fisiológicas ao estresse hídrico.

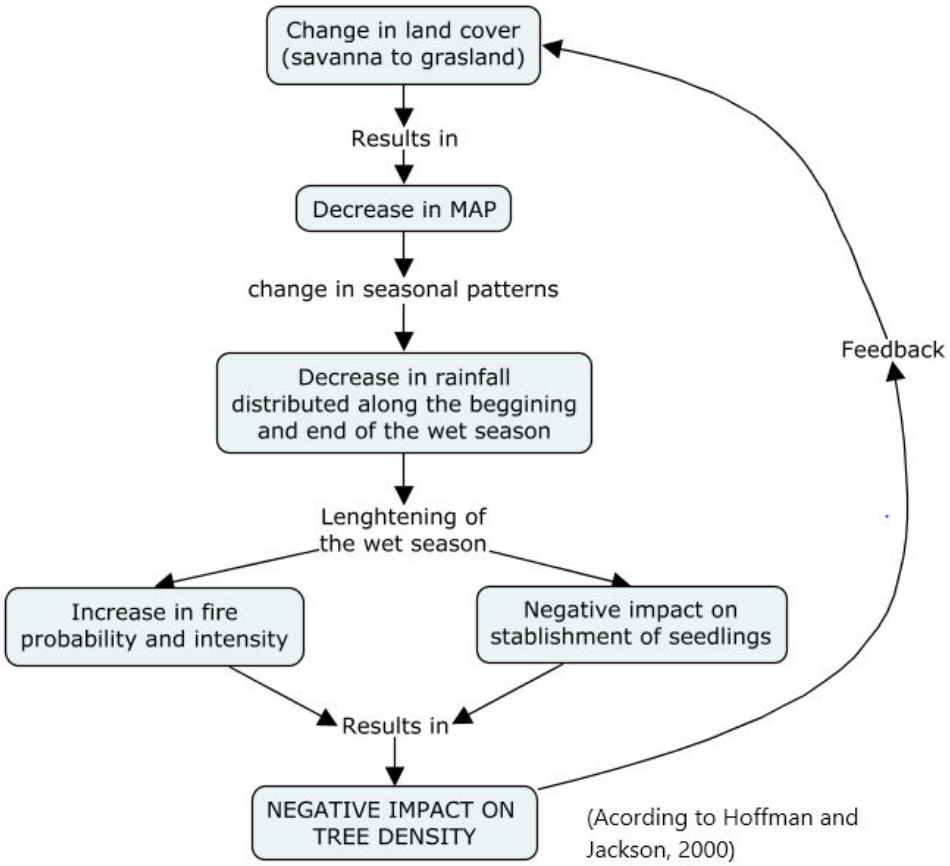

Figura 1: Esquema mostrando o efeito cascata da mudança na cobertura vegetacional do cerrado e o *feedback* positivo na diminuição da precipitação.

Considerações sobre o ciclo da água nas plantas

A força motriz para a transpiração e para o movimento de água nas plantas é a diferença de potencial hídrico entre o solo e a atmosfera, assim como a quantidade de água no solo (HILLEL, 2004; LARCHER, 2000; TYREE, 1999). A coluna d'água no interior da planta está sob tensão, i.e. pressão do xilema (P_x). Esta tensão se dá pela diferença de pressão entre a atmosfera e o xilema nas superfícies onde ocorre transpiração. Além do mais, esta tensão se propaga através da continuidade da coluna d'água de forma decrescente das folhas às raízes. Dessa forma, a água flui do solo (maior pressão) para a atmosfera (menor pressão). Neste sentido, a diminuição da precipitação,

juntamente com o aumento na temperatura levam ao declínio na umidade do solo e ao aumento da demanda evaporativa por parte da atmosfera. Sob estresse hídrico, há aumento na tensão na coluna d'água no interior do xilema (P_x) que causa a diminuição do potencial hídrico do xilema (Ψ_x). Sendo assim, quando o P_x está abaixo da pressão perfeita do vácuo, diz-se que a água está em uma condição metaestável, pois se houver uma ruptura na coluna d'água, esta permanecerá rompida até que o valor de P_x esteja acima do estabelecido para o vácuo (TYREE, 1999). Esta ruptura causada por entrada de ar no xilema é conhecida como cavitação. Com a formação de bolhas de ar devido à cavitação, há a descontinuidade da coluna d'água e a interrupção do transporte de água pelo canal. Esse processo denomina-se embolismo (TYREE, 1999) e está relacionado com a diminuição da fotossíntese e com a mortalidade do organismo ou a perda de parte dele, como ramos e folhas. Além disso, a morte induzida pela seca provavelmente não será por insuficiência de carbono para o metabolismo e sim por falha hidráulica (ROWLAND et al., 2015). Entretanto, existem mecanismos de regulação hídrica da planta impulsionado por sinais químicos, como através do fechamento dos estômatos quando o Ψ atinge valores críticos antes de haver embolismo (BRODRIBB, 2017; CHOAT et al., 2018; O'BRIEN et al., 2017; TYREE, 1999). Sendo assim, mudanças na temperatura e na precipitação estão ligadas à mortalidade de árvores em diversas regiões do planeta e as projeções para o futuro são de aumento desta mortalidade (ALLEN et al., 2010).

Objetivos geral e específico

Perante o que foi exposto, a seguinte pergunta é o ponto de partida para este projeto: (1) Existem estados alternativos funcionais na vegetação tropical? Neste sentido, o OBJETIVO deste projeto é **(1) entender a resiliência da vegetação em um contexto de mudanças com base na caracterização dos atributos e mecanismos relacionados à estratégia hídrica das plantas.** Em outras palavras, queremos testar a existência de estados alternativos funcionais da vegetação em ecossistemas tropicais em um gradiente de variabilidade climática do Cerrado para a Amazônia. Nenhum estudo até o presente momento caracterizou funcionalmente os estados alternativos e comparou com os padrões baseados em cobertura de árvores. Sabe-se que a diversidade de atributos funcionais tem potencial de incrementar a resiliência (SAKSCHEWSKI et al., 2016; TILMAN, 2001), entretanto, não há evidencias empíricas da relação mecanística dos atributos funcionais da vegetação tropical com o balanço de *feedbacks* que determina o quanto as interações internas do sistema se mantêm e quanto esse sistema oscila. Acreditamos que uma maior

heterogeneidade espacial e temporal implica em maior resiliência uma vez que a comunidade estaria naturalmente melhor "preparada" para lidar com a amplitude de condições impostas pelo ambiente (HOLLING, 1973) quando apresenta maior diversidade de atributos funcionais otimizando os fluxos de massa e energia. Com base na análise dos atributos funcionais e de variáveis ambientais, esperamos contribuir com o entendimento dos processos ecossistêmicos relacionados ao ciclo da água em áreas de floresta, savana e de transição floresta-savana. Nossos resultados podem ajudar a entender, uma vez que não está claro na literatura científica, as diferentes configurações relacionadas com a distribuição da vegetação. Este projeto faz parte de uma tese mais completa e é baseado em evidências empíricas com dados de campo. Sendo assim, o projeto aqui apresentado é fundamental no estudo como um todo.

O **Objetivo específico** é definir os estados alternativos funcionais da vegetação tropical. Que atributos funcionais determinam os estados alternativos da vegetação? Nossa hipótese é que as características funcionais que influenciam nos mecanismos de *feedback* que determinam estados alternativos são as características ligadas aos processos do ecossistema que influenciam a mortalidade e o crescimento das árvores ao longo do tempo. Estas características são fundamentais para entender os estados alternativos, pois são a base para se entender a dinâmica da vegetação.

METODOLOGIA

Para caracterizar os estados alternativos funcionais da vegetação tropical, os campos serão realizados em um gradiente de variabilidade climática (incluindo sazonalidade e variabilidade interanual) na região tropical do Brasil e incluem (1) Serra do Araripe (CE); (2) Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros em Alto Paraíso de Goiás (GO); e (3) Nova Xavantina (MT). Nova Xavantina está localizada na fronteira geográfica entre a Floresta Amazônica e a savana. Os outros locais de estudo em que realizaremos amostragens não estão nesta fronteira geográfica, mas na escala de paisagem existem transições entre floresta e savana. Neste caso, a floresta se caracteriza por ser uma floresta de galeria.

Os estados alternativos podem ser identificados por diferenças na composição e dominância das espécies (ou gêneros, ou famílias) e os *feedbacks* que mantém as condições e relações que caracterizam os diferentes estados se baseiam na interação de elementos bióticos, abióticos e de mecanismos químicos (SCHEFFER et al., 2001). Em cada local será realizada a amostragem dos atributos da vegetação, assim como a

identificação das espécies e respectivas abundâncias relativas. As amostragens serão realizadas em dez parcelas de 10m x 20m em cada local (i.e. savana e floresta).

Será amostrado o P_{50} (atributo hidráulico que define o potencial hídrico a 50% de abertura dos estômatos) nas espécies dominantes em três comunidades arbóreas distribuídas na faixa tropical brasileira que compreende o Cerrado e a Amazônia. Este atributo é um bom indicador de vulnerabilidade à seca (ANDEREGG et al., 2016), pois mostra a resposta da planta perante déficit hídrico pelo controle da perda de água. Da mesma forma, mediremos atributos de medição rápida relacionados à morte e ao crescimento, como a densidade da madeira, tamanho das plantas [i.e. DBH (diâmetro na altura do peito) e altura da árvore] (O'BRIEN et al., 2017; TRUGMAN et al., 2018) e área folhar total. Estes atributos serão analisados juntamente com os atributos do TRY database (http://www.try-db.org/) (KATTGE et al., 2011) que serão analisados na escala regional e comparados com os dados coletados em campo na escala da paisagem. Os estados alternativos funcionais da vegetação serão definidos, também, com base em dois critérios: 1) na proporção de indivíduos generalistas/especialistas, considerando que os generalistas são espécies que ocorrem tanto em áreas com formações savânicas, como em áreas com formações florestais, e portanto apresentam uma alta plasticidade (MARACAHIPES et al., 2018); e 2) na estratégia de alocação do carbono proveniente da fotossíntese (i.e. plantas C3 e C4) (i.e. forma de alocação do carbono absorvido através da fotossíntese), já que a resposta da vegetação aos eventos de seca está relacionado com a alocação ótima de carbono (TRUGMAN et al., 2018). Será feita a clusterização da vegetação por similaridade entre os atributos por meio de análises multivariadas. Analisaremos a distribuição dos atributos em relação a MAP, ao *Markham seasonality index* (MSI), ao tamanho da estação seca (DSL) e à temperatura média anual (MAT).

As análises dos atributos serão feitas com o apoio do Professor Rafael Oliveira da UNICAMP que fornecerá capacitação e disponibilizará seu laboratório e material. Os outros atributos deverão ser medidos nas espécies que representam, coletivamente, pelo menos 80% da abundância relativa das comunidades amostradas (PÉREZ-HARGUINDEGUY et al., 2016). Ressalta-se a importância de um considerável esforço amostral, entretanto, a amostragem de pelo menos um indivíduo por espécie é suficiente para estimar a média dos atributos funcionais das comunidades e fazer inferências de interesse ecológico (BARALOTO et al., 2010). As amostragens dos atributos funcionais seguirão as recomendações e os procedimentos propostos em PÉREZ-HARGUINDEGUY et al. (2016). Além disso, ainda existem herbários e xilotecas que

armazenam informações botânicas das espécies brasileiras de diferentes regiões do país e que permitem comparações (e.g. MELO-JR; AMORIM, 2017).

Os atributos serão analisados dentro das comunidades intra e interespecificamente para comparar a média e a variância dos atributos dentro das espécies e entre as comunidades nos locais amostrados. A partir daí será avaliado o papel da variabilidade de atributos em comunidades com formações florestais, savânicas e na transição. Aumento da variabilidade pode indicar que o sistema esteja próximo da transição para um estado alternativo (HASTINGS, 2013). Por exemplo, a transição Floresta-Cerrado é caracterizada por ser mais dinâmica (MARIMON et al., 2013; MIGUEL et al., 2011), ou seja, possui baixa estabilidade. As análises serão realizadas no R (R TEAM, 2016).

ATIVIDADES PREVISTAS

Objetivo específico: Definir os estados alternativos funcionais da vegetação tropical.

Indicador: A diferença de atributos funcionais, a composição da vegetação, a proporção de espécies generalistas e especialistas, a estratégia de alocação de carbono (i.e. C3 e C4) serão usados para definir os estados alternativos funcionais da vegetação tropical do Brasil.

Meta: Obter dados sobre a composição funcional das comunidades estudadas.

Atividade: Realização de saídas de campo para coleta de dados e análise dos atributos em relação às variáveis climáticas.

Cronograma: 3º, 4º e 5º Semestres

DETALHAMENTO DA INFRAESTRUTURA FÍSICA E TECNOLÓGICA

Com exceção dos trabalhos de campo, todas as outras fases do projeto serão realizadas nas dependências da UFSC. As medições do P_{50} serão viabilizadas através de treinamento do grupo de campo com o grupo de pesquisa do Professor Rafael Oliveira do Instituto de Biologia da Unicamp.

CRONOGRAMA

	2018		2019		2020		2021	
	1º sem	2º sem	3º sem	4ºsem	5º sem	6º sem	7º sem	8º sem
Entrega do projeto		X						
Disciplinas	X	X	X		X	X		
Coleta dos dados			X	X	X			
Estágio docência						X	X	
Análise dos dados			X	X	X	X	X	
Escrita				X	X	X	X	
Qualificação					X			
Defesa								X

* Pretendo apresentar os resultados parciais em eventos nacionais e internacionais durante o curso de doutorado.

** Pretendo também cursar disciplinas em outras universidades, como na UNICAMP e no INPA.

ORÇAMENTO PREVISTO

Orçamento da Pesquisa						
Categoria de despesa	**Descrição dos itens**	**Material será cedido para Instituição (Sim ou Não)**	**Quantidade**	**Unidade (un; litro; metro; dia; km)**	**Valor Unitário (R$)**	**Valor Total (R$)**
	Trena de 50m	sim	3	Unidade	R$ 50,00	**150,00**
	Pincel atômico Pilot	sim	5	Unidade	R$ 3,00	**15,00**
	Podão de coleta botânica	sim	1	Unidade	R$ 1.400,00	**1.400,00**
	Prancheta	sim	2	Unidade	R$ 5,00	**10,00**
	Canetas	sim	10	Unidade	R$ 2,00	**20,00**
	Caderno	não	1	Unidade	R$ 5,00	**5,00**
	GPS	sim	1	Unidade	R$ 1.000,00	**1.000,00**

Serviço de Terceiros Pessoa Física	Mateiro/Escalador		15	Diárias	R$ 50,00	**750,00**
Serviço de Terceiros Pessoa Jurídica	Análise de solo		90	Análises	R$ 30,00	**2.700,00**
Viagens	Passagens - Florianópolis/Campinas/Florianópolis		1	ida e volta	R$ 500,00	**500,00**
	Passagens - Florianópolis/Brasília/Florianópolis		4	ida e volta	R$ 400,00	**1.600,00**
	Passagens - Florianópolis/Nova Xavantina/Florianópolis		4	ida e volta	R$ 1.200,00	**4.800,00**
	Passagens - Florianópolis/Juazeiro do Norte/Florianópolis		4	ida e volta	R$ 1.400,00	**5.600,00**
	Aluguel de carro		60	Dias	R$ 100,00	**6.000,00**
	Gasolina		300	Litros	R$ 4,00	**1.200,00**
	Hospedagem		160	Diárias	R$ 50,00	**8.000,00**
	Alimentação		60	alimentação diária	R$ 100,00	**6.000,00**

Equipamentos	Guia Botânico de Campo	sim	3	Unidade	R$ 80,00	**240,00**
TOTAL						**39.990,00**

RESULTADOS ESPERADOS

Esperamos encontrar que os atributos funcionais da vegetação tropical definem estados alternativos funcionais e são determinados por variáveis climáticas. Esperamos que o aumento da variabilidade climática implica em maior resiliência e em menor estabilidade das comunidades vegetais.

Nossos resultados podem ajudar a entender, uma vez que não está claro na literatura científica, as diferentes configurações relacionadas com a distribuição da vegetação em relação às variáveis ambientais, como a quantidade de precipitação (HIROTA et al., 2011). Sendo assim, nossos resultados servirão para ratificar a importância da conservação da biodiversidade, uma vez que a diversidade funcional aumenta com a riqueza (TILMAN, 2001) e está relacionada à resiliência e à provisão de serviços ecossistêmicos (BIGGS et al., 2012; ELMQVIST et al., 2003). Portanto, este estudo nos ajudará a entender como funcionam os ecossistemas na fronteira de transição entre a Amazônia e o Cerrado, permitindo à sociedade manejar o risco de transições ecológicas indesejadas.

BIBLIOGRAFIA

ALLEN, C. D. et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 4, p. 660–684, 2010.

ANDEREGG, W. R. L. et al. Meta-analysis reveals that hydraulic traits explain cross-species patterns of drought-induced tree mortality across the globe. **PNAS**, p. 1–6, 2016.

BARALOTO, C. et al. Functional trait variation and sampling strategies in species-rich plant communities. **Functional Ecology**, v. 24, p. 208–216, 2010.

BARNOSKY, A. D. et al. Approaching a state shift in Earth's biosphere. **Nature**, v. 486, n. 7401, p. 52–58, 2012.

BIGGS, R. et al. Toward Principles for Enhancing the Resilience of Ecosystem Services. **Annual Review of Environment and Resources**, n. 37, p. 421–448, 2012.

BOND, W. J.; WOODWARD, F. I.; MIDGLEY, G. F. The global distribution of ecosystems in a world without fire. **New Phytologist**, v. 165, p. 525–538, 2005.

BRODRIBB, T. J. Progressing from "functional" to mechanistic traits. **New Phytologist**, v. 215, n. 9, 2017.

CARDINALE, B. J. et al. Biodiversity loss and its impacton humanity. **Nature**, v. 486, n. 7401, p. 59–67, 2012.

CHAPIN III, F. S. et al. Consequences of changing biodiversity. **Nature**, v. 405, n. 6783, p. 234–42, 2000.

CHOAT, B. et al. Triggers of tree mortality under drought. **Nature**, v. 558, p. 531–539, 2018.

ELMQVIST, T. et al. Response diversity, ecosystem change, and resilience. **Frontiers in Ecology and the Environment2**, v. 1, n. 9, p. 488–494, 2003.

HASTINGS, A. Multiple Stable States and Regime Shifts in Ecological Systems. **Mathematics Today**, n. February, p. 1–3, 2013.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. [s.l.] Elsiever Academic Press, 2004.

HIROTA, M. et al. Global Resilience of Tropical Forest and Savanna to Critical Transitions. **Science**, v. 334, n. October, p. 232–235, 2011.

HIROTA, M.; OYAMA, M. D.; NOBRE, C. Concurrent climate impacts of tropical South America land-cover change. **Atmospheric Science Letters**, v. 267, n. February, p. 261–267, 2011.

HOFFMANN, W. A.; JACKSON, R. B. Vegetation-climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. **Journal of Climate**, p. 1593–1602, 2000.

HOLLING, C. S. Resilience and Stability of Ecological Systems. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 4, n. 1, p. 1–23, 1973.

HOLLING, C. S. Engineering Resilience versus Ecological Resilience. **The National Academy of Science**, n. 1996, 1996.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Cambridge: [s.n.].

KATTGE, J. et al. TRY – a global database of plant traits. **Global Change Biology**, v. 17, p. 2905–2935, 2011.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. [s.l.] Rima, 2000.

LUCAS, C. et al. Sensitivity of subtropical forest and savanna productivity to climate variability in South America, Uruguay. **Journal of Vegetation Science**, p. 1–14, 2016.

MARACAHIPES, L. et al. How to live in contrasting habitats? Acquisitive and conservative strategies emerge at inter- and intraspecific levels in savanna and forest

woody plantas. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution, and Systematics**, 2018.

MARIMON, B. S. et al. Disequilibrium and hyperdynamic tree turnover at the forest – cerrado transition zone in southern Amazonia. **Plant Ecology & Diversity**, p. 1–12, 2013.

MELO-JR, J. C. F. DE; AMORIM, M. W. Anatomia ecológica do lenho de Richeria grandis Vahl (Phyllanthaceae) de Floresta Atlântica e Amazônica. **Ernstia**, v. 27, n. 1, p. 93–109, 2017.

MIGUEL, A. et al. Dinâmica da comunidade lenhosa de uma floresta de galeria na transição Cerrado-Floresta Amazônica no Leste de Mato Grosso, em um período de sete anos (1999 a 2006). **Biota Neotrópica**, v. 11, n. 1, 2011.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: Synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2005.

O'BRIEN, M. J. et al. A synthesis of tree functional traits related to drought-induced mortality in forests across climatic zones. **Journal of Applied Ecology**, v. 54, p. 1669–1686, 2017.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N. et al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany,** v. 64, p. 715–716, 2016.

ROWLAND, L. et al. Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. **Nature**, p. 1–13, 2015.

SAKSCHEWSKI, B. et al. Resilience of Amazon forests emerges from plant trait diversity. **Nature Climate Change**, v. 1, n. August, 2016.

SCHEFFER, M. et al. Catastrophic shifts in ecosystems. **Nature**, v. 413, n. October, p. 591–596, 2001.

SCHEFFER, M. et al. Synergy between small- and large-scale feedbacks of vegetation on the water cycle. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1003–1012, 2005.

SCHEFFER, M.; CARPENTER, S. R. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. **Trends in ecology and Evolution**, v. 18, n. 12, p. 648–656, 2003.

STAAL, A. et al. Bistability, spatial interaction, and the distribution of Tropical Forests and Savannas. **Ecosystems**, p. 1–12, 2016.

STEFFEN, W. et al. Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. **PNAS**, p. 1–8, 2018.

STROGATZ, S. H. **Non-linear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering**. [s.l: s.n.].

TEAM, R. C. **R: A language and environment for statistical computing**Viena, 2016. Disponível em: <http://www.r-project.org/>

TILMAN, D. **Functional diversity**, 2001. (Nota técnica).

TRUGMAN, A. T. et al. Tree carbon allocation explains forest drought-kill and recovery patterns. **Ecology Letters2**, 2018.

TYREE, M. T. Water relations and hydraulic architecture. In: PUGNAIRE, F. I.; VALLADARES, F. (Eds.). . **Functional plant ecology**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1999. p. 175–211.

VAN NES, E. H.; SCHEFFER, M. A strategy to improve the contribution of complex simulation models to ecological theory. **Ecological Modelling**, v. 185, p. 153–164, 2005.

WUYTS, B.; CHAMPNEYS, A. R.; HOUSE, J. I. Amazonian forest-savanna bistability and human impact. **Nature Communications**, v. 8, n. May, p. 1–11, 2017.