



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Centro de Ciências Biológicas

Programa de Pós-Graduação em Ecologia

Géssica de Lara Minski

Caracterização dos ecótonos entre os biomas brasileiros Amazônia e Cerrado

Florianópolis - SC

Junho de 2021

Géssica de Lara Minski

Caracterização dos Ecótonos entre os biomas brasileiros Amazônia e Cerrado

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Ecologia da Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do título de Mestre em Ecologia.
Orientadora: Profa. Dra. Marina Hirota.

Florianópolis - SC

Junho de 2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lara Minski, Gessica
Caracterização dos ecótonos entre os biomas brasileiros
Amazônia e Cerrado / Gessica Lara Minski ; orientador,
Marina Hirota, 2021.
68 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Biológicas, Programa de Pós
Graduação em Ecologia, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Ecologia. 2. Ecologia. 3. Ecótono. 4. Zona de tensão
ecológica. 5. Regime de precipitação. I. Hirota, Marina. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Ecologia. III. Título.

Géssica de Lara Minski

Título: Caracterização dos ecótonos entre os biomas brasileiros Amazônia e Cerrado.

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Marina Hirota, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Michele de Sá Dechoum, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Leandro Maracahipes dos Santos, Dr.

Universidade Estadual de Campinas

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Ecologia.

Prof.(a) Nei Kavaguichi Leite, Dr.(a)

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Profa., Marina Hirota, Dra.

Orientadora

Florianópolis, 2021.

Este trabalho é dedicado a minha mãe Paulina, a minha orientadora e a todos os meus amigos/família que fizeram parte dessa jornada até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que me deu força e a esperança necessária para continuar. Nas dificuldades me ensinou e me tornou mais forte. E a minha mãe que possibilitou que eu chegasse até aqui, mesmo não estando mais presente neste meio fisicamente.

Agradeço à minha família, em especial minha prima (Juliana) e minha tia (Noeli) que sempre me incentivaram a estudar. Foram meu porto seguro nos momentos mais difíceis, me acolheram e proveram o suporte necessário, principalmente na situação atual (pandemia mundial). Também gostaria de agradecer ao meu gatinho, que eu tive a oportunidade de conhecer mesmo que por um breve momento. Mas alegrou meus dias em quanto esteve aqui e me fez resgatar coisas boas que eu havia esquecido sobre mim (apesar de sofrer muito com sua partida, que foi recente).

É um agradecimento especial a minha orientadora Marina que vai muito além de professora e mestra. Foi/é uma amiga, uma mãe e sempre esteve ao meu lado me dando sábios conselhos sobre a vida acadêmica e pessoal, que levarei comigo sempre. Não teria conseguido chegar até aqui sem toda a sua paciência, dedicação e ajuda. Vejo muitos colegas reclamando dos seus orientadores e me sinto privilegiada por ter uma das melhores orientadoras que alguém poderia ter.

Um agradecimento cheio de gratidão a todos os meus amigos que sempre me apoiaram, com muito incentivo, positividade e ajuda em momentos de crises, não sei o que faria sem vocês. Em especial ao Ali que acompanhou toda minha trajetória e ouviu sempre minhas reclamações e sempre me fez acreditar que eu conseguiria. A minha psicóloga Liediane, que me acolheu e vem me ajudando a superar problemas passados e atuais e foi de grande importância na finalização da minha dissertação. E não poderia esquecer do Matheus por toda a paciência em me ajudar com o R, sempre me salvado. Além de alegrar meus dias com todo seu bom humor e parceria no RU. E ao Bernardo e o Marcio, por me proporcionarem uma das melhores experiências de campo e minha primeira viagem de avião. Conheci o Cerrado, lugar incrível e maravilhoso, além de muitos outros profissionais e adquirir novos conhecimentos. E agora na finaleira a minha amiga Alana que tem me dado uma força com a parte textual, muito obrigada.

Agradeço também aos membros da banca, que se disponibilizaram a ler e contribuir com o trabalho. E principalmente pela compreensão e paciência. Ao Instituto Serapilheira pelo estágio e bolsa concedidos em um momento crucial da minha vida acadêmica, em que precisava estudar e trabalhar. E posteriormente a bolsa concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento

de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que me proporcionou concluir meus estudos em tempo integral. A todos meus colegas do IPES e a disponibilidade de equipamentos e espaço. Agradecer ao Programa da Pós-Graduação em Ecologia (PPGECO), todos os professores, colegas, novos amigos, conhecimentos e experiências, proporcionados pelo programa.

O mestrado foi muito além de um processo acadêmico, foi meu incentivo de continuar. Foi a realização de um objetivo (Mestrado em ecologia em que eu trabalhasse com tecnologia) o qual eu lutei muito para ingressar (abri mão de muitas coisas) e lutei mais ainda comigo mesma para finalizar. Passei por muitas dificuldades e desafios pessoais antes e durante todo o processo. Primeiramente eu não queria escrever os agradecimentos, pois teria que reviver muitas dores, lembrar dos vários momentos que pensei em desistir de tudo, achei que nunca conseguiria finalizar (foi com muita força de vontade e teimosia que continuei). Agora chegando ao final comecei a lembrar de toda a minha trajetória até aqui. E vejo quão rico foi o processo (apesar de sofrido), minha evolução acadêmica e pessoal. Agradeço de coração a todas as minhas novas experiências e principalmente ao maior presente de todos: os novos amigos/família que vou levar comigo para todo sempre. Foram vocês que me deram forças para chegar até aqui. Mais uma vez meu muito obrigada à todos.

Comecei a escrever meus agradecimentos chorando, mas desta vez é de alegria. E acabou sendo mais extenso do que eu imaginava, mas queria deixar aqui registrado um dos momentos mais importantes da minha vida. Hoje é a realização de um objetivo de anos, que se iniciou em 2013 quando me formei e continuou em Floripa em 2015 quando vim morar aqui. Hoje é a final de uma trajetória, de um ciclo, um processo de muitas buscas, lutas e evolução, principalmente pessoal em que finalmente me encontrei. Enfim, sinto aqui o início de um ciclo repleto de novas conquistas, mais um capítulo do livro se encerrando e um novo começando a ser escrito.

Também quero deixar aqui meus mais sinceros agradecimentos a todos os pesquisadores do mundo inteiro. Que lutam diariamente pela ciência, inovação e tecnologia. À todos os profissionais que estão na linha de frente durante a pandemia. E meus sinceros sentimentos a todos que perderam seus entes queridos para a covid-19. Espero que esse período acabe logo e que possamos voltar ao nosso novo “normal”.

As espécies que sobrevivem não são as mais fortes, nem as mais inteligentes, mas sim aquelas que se adaptam melhor às mudanças (MEGGINSON, 1963).¹

¹ Frase proferida por Leon C. Megginson, professor da Louisiana State University, em um discurso em 1963, onde apresenta a sua interpretação da ideia central de "A Origem das Espécies" de Charles Darwin.

RESUMO

Segundo o IBGE, os biomas tropicais brasileiros são determinados por fronteiras adjacentes abruptas, sem nenhuma região de transição entre eles. Por outro lado, o IBGE também sugere que existem Zonas de Tensão Ecológica (ZTE) espalhadas, esparsamente, tanto ao longo da fronteira abrupta entre biomas (escala continental) quanto dentro de um mesmo bioma (escala da paisagem). Embora de extrema importância, no contexto de mudanças, na configuração da distribuição da cobertura vegetal, na forma como tais ZTEs são apresentadas, atualmente, não há uma boa definição de suas estruturas, composição e funcionalidade. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivos principais: I) verificar se as ZTEs sugeridas pelo IBGE representam áreas de ecótonos, quantificando suas características estruturais básicas; II) relacionar a heterogeneidade dos ecótonos com o regime de chuva predominante em cada um deles. Para abordar a primeira questão, selecionaram-se 46 ZTEs, a partir da distância da fronteira geográfica entre os biomas Cerrado e Amazônia. Essas ZTEs estão classificadas em 3 tipos, pelo IBGE: savana/floresta estacional (S-Fe); savana/floresta ombrófila (S-Fo) e floresta estacional/floresta ombrófila (Fe-Fo). Para cada uma das ZTEs, utilizaram-se duas abordagens: i) a quantificação das áreas naturais, classificadas como savanas (%S) e florestas (%F), de acordo com o Mapbiomas; ii) um teste de multimodalidade aplicado a dados de porcentagem de cobertura arbórea (%CA). Para a segunda questão, as relações entre a heterogeneidade e os gradientes de chuva foram utilizadas as seguintes métricas: i) três variáveis que caracterizam o regime de chuvas – média de precipitação anual (MAP), sazonalidade e variabilidade interanual (CV), para cada ZTE; ii) três métricas de heterogeneidade da cobertura da vegetação – duas a partir de métricas estatísticas de dispersão, i.e., o desvio padrão (SD) e o intervalo interquartil (IQR) da %CA dentro de cada ZTE; e outra proposta como um índice de heterogeneidade combinado as %F e %S obtidas do Mapbiomas. Com relação ao objetivo I, os resultados mostram que 87% das ZTEs apresentam características de ecótonos, do ponto de vista da estrutura do dossel; ou seja, possuem mais de um tipo de vegetação natural, o que pode representar o complexo mosaico de fitofisionomias savânicas e florestais, descritos na literatura. Com relação ao objetivo II, a heterogeneidade, aparentemente, não pode ser explicada pela sazonalidade, mas sim pelos valores de MAP e CV, com os quais teve uma maior correlação e consistência entre os índices de heterogeneidade utilizados. Considerando que quaisquer tipos de heterogeneidades existentes (e.g., diversidade, diversidade de condições abióticas) adicionem resiliência a um determinado sistema, cujos resultados corroboram e

fomentam um mecanismo compensador de resiliência, para regiões com regimes de chuva, caracterizados por menores totais médios e por maior variabilidade, particularmente, nas regiões ecotonais, objeto do presente estudo.

Palavras-chave: zona de transição ecológica, floresta-savana, ecótonos, heterogeneidade, precipitação.

ABSTRACT

According to Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), Brazilian tropical biomes are determined by abrupt adjacent borders, without transition region between them. On the other hand, IBGE also suggests that there are Ecological Tension Zones (ETZ) sparsely spread, both along the abrupt border between biomes (continental scale) and within the same biome (landscape scale). Although extremely important in the context of changes in the configuration of vegetation cover distribution, in the way such ETZs, are currently presented, there is no good definition of their structure, composition and functionality. In the context previously submitted, the present academic paper has as main purposes: I) to verify if the ETZs suggested by IBGE represent areas of ecotones, quantifying their basic structural characteristics; II) relate the heterogeneity of ecotones with the predominant rainfall regime in each of them. In order to overcome the first issue, 46 ETZs were selected based on the distance of the geographic boundary between the Cerrado and the Amazon biomes. Those ETZs are classified into 3 types by IBGE: savanna/seasonal forest (S-Fe); savanna/ombrophilous forest (S-Fo) and seasonal forest/ombrophilous forest (Fe-Fo). For each of the ETZs, two approaches were used: i) the quantification of natural areas classified as savannas (%S) and forests (%F), according to Mapbiomas; ii) a multimodality test applied to tree cover percentage data (%CA). For the second question, the relationships between heterogeneity and rainfall gradients have been used the following metrics: i) three variables that characterize the rainfall regime – mean annual precipitation (MAP), seasonality and interannual variability (CV) for each ETZ; ii) three vegetation cover heterogeneity metrics – two from statistical dispersion metrics, i.e., the standard deviation (SD) and the interquartile range (IQR) of the %CA within each ETZ; and another proposal as a heterogeneity index combined with the %F and %S obtained from Mapbiomas. Regarding target I, the results show that 87% of the ETZs have characteristics of ecotones, from the point of view of the canopy structure; that is, they have more than one type of natural vegetation, which may represent the complex mosaic of savanna and forest phytophysiologicals, described in the literature. Concerning goal II, the heterogeneity apparently cannot be explained by seasonality, but by the MAP and CV values, with which there was a greater correlation and consistency by the heterogeneity indices used. Considering that any types of existing heterogeneities (eg, diversity, diversity of abiotic conditions) add resilience to a given system, whose findings corroborate and foster a resilience compensating

mechanism for regions with rainfall regimes characterized by lower average totals and greater variability, especially in the ecotonal areas, object of the present research.

Keywords: ecological transition zone, forest-savanna, ecotones, heterogeneity, precipitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa temático da distribuição dos biomas e as zonas de transição no Brasil segundo o shapefile da vegetação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000). Em que a área de estudo foi aproximadamente delimitada por linhas pontilhadas, incluindo as ZTEs que abrangem a transição em macroescala entre Amazônia a Cerrado no sentido Nordeste (NE)-Sudoeste (SO). Destacando-as em cores diferentes (amarelo escuro, verde claro e escuro), para ressaltar o tipo de vegetação que as compõe..... 22

Figura 2: Exemplo das imagens de cobertura arbórea e uso da terra da ZTE localizada estado no Maranhão(contem transição S/Fe) do ano 2000: A) distribuição espacial da cobertura arbórea (Hansen *et al.*, 2013), em que floresta e savana estão representadas nas cores verde e amarelo e em branco e rosa indicam regiões com atividades antrópicas; B) distribuição espacial da cobertura e uso da terra do MapBiomas, em que floresta e savana estão representadas nas cores branca e rosa, o verde e o amarelo indicam regiões influenciadas por atividades humanas. 24

Figura 3: Exemplo do teste *flexmix* de duas ZTEs diferentes, mostrando a quantidade de agrupamentos (destacado no círculo vermelho) e o gráfico da densidade da cobertura vegetal. A) O teste mostra que essa ZTE possui dois agrupamentos e o gráfico que há dois tipos de vegetação, um de maior densidade e outro de menor densidade; B) o teste mostra que a ZTE possui apenas um agrupamento e o gráfico que há apenas um tipo de vegetação de cobertura média de dossel..... 29

Figura 4: Quantidades relativas das porcentagens de cobertura vegetal de floresta e savana a partir da classificação do MapBiomas para cada ZTE. Os valores em cima de cada barra correspondem ao IH da respectiva ZTE. Os gráficos estão divididos por tipos de transições das ZTEs de acordo com a classificação do IBGE. As florestas (%F) estão representadas pela cor verde e savanas (%S) em amarelo. No eixo *x* apresentam-se o estado brasileiro no qual as ZTEs localizam-se. 34

Figura 5: Exemplos do teste *flexmix* em quatro ZTEs com suas respectivas classificações conforme o IBGE:estado brasileiro (Est) em que se localiza e composição da transição (Comp). Índice de Heterogeneidade (IH), quantidade de agrupamentos do teste *flexmix* e alterações nos usos naturais do solo (%A), a partir dos dados do MapBiomas e Hansen. Nos painéis à esquerda, estão as imagens da %CA (seção 2.1.2), com tons verdes representando maior cobertura vegetal (e.g., floresta), amarelos menor cobertura vegetal (e.g., savana), e as

cores rosa e branco representando alterações nos usos naturais da terra (e.g., água, solo exposto). Os painéis à direita apresentam os histogramas e as distribuições de acordo com o melhor modelo obtido do teste *flexmix*. A) ZTE formada por S/Fo, localizada no TO e as variáveis IH e F são correspondentes; B) ZTE formada por S/Fo, localizada no MT e as variáveis IH e F são correspondentes; C) ZTE formada por S/Fo, localizada no PA e as variáveis IH e F não correspondem; D) ZTE formada por S/Fe, localizada no TO e as variáveis IH e F não correspondem;..... 36

Figura 6: Mapa visual-espacial, mostrando a disposição dos tipos de transições das Zonas de Tensão Ecológicas (ZTEs) em que S/Fe está em laranja, S/Fo em verde claro e Fo/Fe em verde escuro. E as variações de cada uma das variáveis que definem o regime de chuvas (MAP, MSI e CV) nas respectivas áreas em destaque. Assim o mapa do MAP está representado por tons de azul, em que as cores mais claras representam menor MAP conforme ficam mais escuras maior é o MAP. O mapa do MSI está representado por cores quentes em que o amarelo são ZTEs de menor sazonalidade, laranja intermediário e vermelho maior sazonalidade. O mapa do CV está representado por tons de verde claro para menor CV e conforme vai aumentando passa para tons de amarelo até os valores mais altos que estão em laranja..... 38

Figura 7: Mapa visual-espacial mostrando como estão dispostos as métricas de caracterização heterogeneidade (IH (%cobertura e uso do solo), SD e IQR (%CA)) nas Zonas de Tensão Ecológicas (ZTEs). O mapa de IH está representado por tons de verde em que as cores mais claras representam regiões de baixíssima heterogeneidade conforme ficam mais escuras são mais heterogêneas. No mapa de SD os tons mais claros de roxo representam os menores de valores de SD (regiões com menor heterogeneidade) e as cores mais escuras os valores mais altos (maior heterogeneidade). O mapa do IQR segue a mesma lógica, cores mais claras menores valores e cores mais escuras os valores mais altos. Neste mapa do IQR tem alguns valores em branco por que nenhuma ZTE teve esse valor. 39

Figura 8: Regressões linear e polinomial dos regimes de precipitação com Índice de Heterogeneidade; Cada ZTE é representada por um ponto, cujos tamanho e cor referem-se respectivamente à área e aos tipos de transições. No eixo y o índice de heterogeneidade (IH) varia de 0,0 (regiões mais homogêneas) a 1,0 (regiões mais heterogêneas); A) regressão polinomial da heterogeneidade em relação ao MAP; B) regressão linear da heterogeneidade em relação ao MSI; C) regressão polinomial da heterogeneidade em relação ao CV. 42

Figura 9: Regressões linear e polinomial dos regimes de precipitação com as métricas SD e IQR; em que as ZTEs estão representadas pelos pontos, cujos tamanho e cor referem-se respectivamente à área e aos tipos de transições; A) Regressão polinomial da MAP em relação

ao SD; B) Regressão linear das transições S/Fe e S/Fo e polinomial da Fo/Fe, da MAP em relação ao SD; C) Regressão polinomial da MAP em relação ao IQR; D) Regressão linear das transições S/Fe, S/Fo e Fo/Fe da MAP em relação ao IQR.....44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Informações das ZTEs selecionadas, a partir do dados do IBGE: estado brasileiro (Est), bioma em que está inserido – Amazônia (A), Cerrado (C) ou em ambos (A/C), composição (Comp) savana/floresta estacional (S-Fe, amarelo); savana/floresta ombrófila (S-F, verde-claro) e floresta estacional/floresta ombrófila (Fe-Fo, verde) e o tamanho (área em km²).....23

Tabela 2: Informações das ZTEs; estado brasileiro (Est), composição (Comp), porcentagens de cobertura vegetal natural floresta (%F) e savana (%S). Métricas de heterogeneidade: Índice de Heterogeneidade (IH), dispersão como desvio padrão (SD) e intervalo interquartil (IQR). Análise estatística observando a quantidade de agrupamentos do teste *flexmix* (F), em rosa as áreas em que o teste F corresponde com IH. 34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
BDIA- Banco de Dados e Informações Ambientais
ZTE - Zona de Transição/Tensão Ecológica
%S – Porcentagem de Savana
%F – Porcentagem de Floresta
%A – Porcentagem de formações não naturais
%CA - Cobertura Arbórea
MAP - Média de Precipitação Anual
MSI- Índice de Sazonalidade de Markham
CV- Coeficiente de variação
IQR- Intervalo Interquartil
SD - Desvio Padrão
IH - Índice de Heterogeneidade
S/Fo - Transição de Savana com Floresta Ombrófila
S/Fe - Transição de Savana com Floresta Estacional
Fo/Fe - Transição de Floresta Ombrófila com Floresta estacional
NE - SO Nordeste-Sudoeste
MA- Maranhão
TO- Tocantins
PA-Pará
MT-Mato Grosso
RO- Rondônia
A- Amazônia
C- Cerrado
Est-Estado
Comp- Composição
NDVI-Índice de Vegetação com Diferença Normalizada
SIG- Sistemas de Informação Geográficas
GV- Vegetação Verde
NPV- Vegetação Não Fotossintética
GVS- Solo, Nuvem, Sombra da Vegetação Verde

NDFI- Índice de Fração de Diferença Normalizada

RFA- Random Forest Algorithm

CHIRPS- *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*

WMO - *World Meteorological Organization*

Flexmix- Modelagem de Mistura Flexível

EM - Expectativa de Maximização

AIC- Informação de Akaike

BIC - Informação Bayesiana

ICL- Probabilidade de conclusão integrada

SD- Desvio Padrão

F-flexmix

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	Metodologia	20
2.1	CONJUNTOS DE DADOS UTILIZADOS	20
2.1.1	Definição dos limites geográficos de biomas e zonas de transição fornecidos pelo IBGE	20
1.1.1	Cobertura arbórea (% <i>tree cover</i>) para o ano 2000.....	23
1.1.2	Cobertura e usos da terra para o ano 2000 (MapBiomias).....	25
1.1.3	Dados de precipitação do <i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data</i> (CHIRPS) (0,05°, 1981 – 2017)	26
2.2	Caracterização da cobertura Arbórea.....	27
2.2.1	Teste estatístico: modelagem de mistura flexível (<i>flexmix</i>).....	27
2.2.2	Métricas estatísticas que caracterizam a heterogeneidade dos ecótonos.....	30
2.2.2.1	<i>Inferindo heterogeneidade a partir da cobertura e uso da terra</i>	30
2.3	Relação da cobertura vegetal com os regimes de chuva (MAP, MSI e CV).....	30
2.3.1.1	<i>Métricas para quantificar heterogeneidade a partir da cobertura vegetal</i>	30
2.3.2	Testes estatísticos: regressões	31
2.3.2.1	<i>Regressão Polinomial</i>	31
3	Resultados.....	32
3.1	Caracterização Dos ecótonos	32
3.1.1	Caracterização das ZTEs a partir da classificação do MapBiomias	32
3.1.2	Modelagem de mistura flexível (<i>flexmix</i>) e métricas de heterogeneidade	35
3.2	Relação ENTRE Heterogeinidade da cobertura vegetal com os regimes de chuva (MAP, MSI e CV)	38
3.2.1	Relações estatísticas da precipitação x heterogeneidade.....	41
3.2.1.1	<i>Heterogeneidade a partir da classificação do MapBiomias e regressões linear e polinomial</i>	41

3.2.1.2	<i>Heterogeneidade a partir da cobertura vegetal e regressões linear e polinomial</i>	43
4	Discussão	45
5	CONCLUSÃO	48
6	REFERÊNCIAS	49
ANEXO A- Códigos da legenda para os valores de pixel na coleção 3 do MapBiomias...		68

1 INTRODUÇÃO

Ecosistemas terrestres de todo o planeta têm experimentado intensas pressões ambientais e antrópicas no decorrer das últimas décadas (ALLEN *et al.*, 2010). No geral, essas mudanças na vegetação impactam a resiliência dos ecossistemas ou através da mudança em sua estrutura (e.g., HIROTA *et al.*, 2011 e FLORES *et al.*, 2020) ou da perda de biodiversidade (IPBES, 2018). Previsões indicam que o planeta deverá contar com riscos alarmantes de extinção (THOMAS *et al.*, 2004) e migração de espécies (IRL *et al.*, 2016, WALTHER, 2010, ALLEN; ORT, 2001). Um cenário como este certamente prejudicará a ordem ecológica existente e provavelmente resultará em diferentes configurações das paisagens e dos ecossistemas em todo o planeta (STEFFEN *et al.*, 2018).

Muitos trabalhos já exploraram os impactos de diferentes cenários de mudanças climáticas e usos da terra nos ecossistemas a partir de modelos complexos do sistema terrestre (IPCC, 2019). No entanto, devido especialmente à imensa incerteza associada a tais previsões, estes impactos são calculados a partir de médias temporais de longo prazo (e.g., nos 30 anos entre 2020 e 2050, ou 2070 a 2100), ou seja, as trajetórias e os mecanismos que levam a alteração dificilmente são descritos e investigados. Neste contexto, regiões ecotonais, em que há fortes gradientes abióticos (e.g., chuvas, nutrientes no solo, etc) (e.g., TORELLO-RAVENTOS *et al.*, 2013) e alta heterogeneidade na composição de espécies (e.g., KARK *et al.*, 2007; RISSER, 1995), apresentam-se como laboratórios naturais para o estudo mecanicista da dinâmica das alterações de ecossistemas (MARIMON *et al.*, 2014; AB'SABER, 2002).

A palavra ecótono possui origem grega, em que *eco* vem de *oikos* que significa casa, e indica área ou zona, e *tono* de *tônus* que é tensão, ou seja, zona de tensão. Este termo foi utilizado pela primeira vez em estudos da vegetação terrestre e evidenciado por Clements (1905) para definir uma zona de tensão entre dois ecossistemas diferentes, o que é confirmado pela etimologia da palavra. Pela definição original, há necessidade de que pelo menos duas condições sejam atendidas para que determinada área seja considerada um ecótono: transição e tensão entre os diferentes ecossistemas (MILAN; MORO, 2016). Uma transição é ato ou efeito de passar de um lugar, de um estado para outro. É uma passagem que comporta uma transformação progressiva, ou seja, uma evolução (INFOPEDIA, 2003). O resultado de uma transição entre diferentes ecossistemas pode ocorrer de maneira abrupta ou gradual. Quando é abrupto, ocorre um contato brusco e repentino, sem interpenetração dos organismos na zona de

delimitação (IBGE, 2012). Neste caso, as espécies de cada uma dessas comunidades atingem seus limites de distribuição na região de transição, pois geralmente não são adaptadas para sobreviver no ecossistema que se segue (e.g., espécies mais especializadas). Quando é de forma gradual, ocorre interpenetração e uma transformação progressiva de um limite a outro. No segundo caso, ocorre uma distribuição de espécies que possuem maior tolerância ambiental e que se adaptam mais facilmente, podendo se estender através da região de transição e ainda incluir o ecossistema vizinho (e.g., espécies menos especializadas) (MARACAHIPES-SANTOS *et al.*, 2018; AMETSITSI *et al.*, 2020). Como consequência dessa convivência mútua dos organismos, ocorrerá uma modificação estrutural e funcional (e.g., competição direta, com diferentes taxas de reprodução e crescimento, tolerância e taxa de recuperação aos distúrbios) que intervém para configurar a preponderância de um ou outro ecossistema (NEIFF, 2003). Já a tensão é uma situação conflitante que está constantemente ameaçada de romper-se diante das forças que agem sobre um objeto/organismo, sendo capaz de o comprimir (INFOPEIDIA, 2003). Neste contexto, podemos citar como exemplo de condição conflitante é o encontro de diferentes domínios morfoclimáticos em transições de diferentes biomas (TORELLO-RAVENTOS *et al.*, 2013). Em que locais de transição estão embebidas em intenso gradiente de condições que produz uma condição de conflito, ou seja, a tensão.

Esses conceitos englobam tanto zona de transição e tensão como ecótonos. A principal diferença entre eles é que ecótono refere-se exclusivamente a uma zona de transição gradual. Possui como principal característica a justaposição de diferentes habitats ou tipos de ecossistemas, que estão sob tensão, ou seja, embebidos em um gradiente de condições conflitantes (ODUM; BARRETT, 2008). Enquanto, o conceito zonas de transição e zonas de tensão englobam transições tanto graduais como abruptas. Assim podem ser limitadas a ser somente uma simples linha em um mapa, em que ocorre apenas o contato entre tipos de vegetação sem interações de ambos (MILAN; MORO, 2016). Atualmente, uma das definições mais aceitas pela comunidade científica para delimitar um ecótono segue o conceito descrito acima: um ecótono é uma zona de transição entre sistemas ecológicos, que possuem um conjunto de características bem definidas pela intensidade das interações que ocorrem no espaço e em diferentes escalas de tempo².

² Esta definição foi resultado das discussões realizadas no simpósio MAB/SCOPE-UNESCO realizado em Paris, em 1987.

Porém ainda existe conflito sobre a sua definição. Seguindo uma visão geral cronológica das diferentes terminologias e definições usadas ao longo dos anos na pesquisa de ecótonos, diversos autores criaram uma gama de definições e termos associados a sua dimensionalidade (HUFKENS *et al.*, 2009). De acordo com Milan e Moro (2016), como o termo já foi utilizado de diferentes formas desde sua criação, há um conflito acerca de sua definição que ainda gera muitas dúvidas quanto ao seu significado. Isso possibilita que diferentes interpretações sejam tratadas igualmente a respeito de ecótonos, sendo o termo utilizado algumas vezes como sinônimo de regiões de borda, regiões fronteiriças, zonas de transição, zonas de tensão, zonas de mistura, entre outras (HUFKENS *et al.*, 2009; HENNENBERG *et al.*, 2005; KENT *et al.*, 1997). E por isso historicamente, os ecótonos foram muitas vezes ignorados e frequentemente reduzidos a linhas em um mapa (FORTIN *et al.*, 2000).

Zonas de transição, tensão, bordas, fronteiras entre outros não são, portanto, sinônimos de ecótonos, e sim aspectos diversos da representação da realidade. Diferente de borda/fronteira, o conceito de ecótono pressupõe a existência de interação ativa entre dois ou mais ecossistemas, que resulta no surgimento de propriedades inexistentes nessa transição provinda de ambos os ecossistemas adjacentes (NAIMAN; DÉCAMPS, 1990). Desta forma, todo ecótono é uma zona de tensão/transição, porém nem toda zona de tensão/transição é um ecótono. Por isso, não é adequado limitar ecótono à apenas zona de tensão/transição, pois não ressalta todas as suas características e importância. Assim, neste trabalho, utilizam-se as seguintes terminologias: primeiro, ecótono definido como um conceito funcional ecológico; segundo, zona de transição definida a partir de um conceito espacial geográfico; conforme Milan e Moro (2016).

A partir desta definição, pode ocorrer uma distribuição de espécies que possuem maior tolerância ambiental e as menos especializadas tendem a sobreviver mais facilmente em regiões ecotonais. Por outro lado, aquelas que são especializadas a um dos ecossistemas adjacentes tendem a não serem encontradas em ecótonos, devido à variação das variáveis ambientais (MARIMON *et al.*, 2014). Ainda, os organismos que os habitam sofrem uma seleção genética muito intensa e espécies menos especializadas, que tendem a sobreviver mais facilmente, podem se modificar sob efeito dessas novas condições. Com o passar do tempo, elas podem formar novas espécies, ocorrendo o processo de especiação. Neste sentido, há uma intensa pressão evolutiva nestas regiões, visto que uma mesma espécie encontrada em dois ecótonos diferentes provavelmente apresentará características morfológicas diferentes, como, por exemplo, novos alelos e comportamentos (KARK; VAN RENSBURG, 2006; SMITH *et al.*,

1997). Por isso, os ecótonos são locais onde se podem encontrar organismos que possuem uma maior capacidade de resistir a diferentes condições ambientais, e de alta capacidade de adaptação às mudanças do ambiente, i.e., características muito relevantes a serem compreendidas diante das intensas mudanças ambientais atuais (BURKE *et al.*, 2016, ALISSON, 2010; FISICHELLI *et al.*, 2013; GRAVES *et al.*, 2010, GOLDBLUM; RIGG, 2005; PARMESAN *et al.*, 2005, ALLEN; BRESHEARS, 1998).

Pesquisas no mundo todo indicam correlações na distribuição de espécies nos mais variados ecótonos a partir de alterações de regimes de precipitação e temperatura no passado (DZUREC *et al.*, 1985, SCHWARTZ *et al.*, 1986, PITELKA *et al.*, 1997; HEWITT, 1999), e mais recentemente (BARROS *et al.*, 2018; IRL *et al.*, 2016; FISICHELLI *et al.*, 2013; MALHI *et al.*, 2008; PARMESAN *et al.*, 2005). Em zonas ecotonais de floresta temperada com boreal, por exemplo, espécies de árvores boreais são substituídas por espécies temperadas mais adaptadas as variações das condições ambientais (REICH *et al.*, 2015). Em transições de florestas - pastagens alpinas também vêm ocorrendo a perda de hábitat favorecendo a colonização das pastagens, bem como mudanças na diversidade taxonômica e funcional nas espécies arbóreas (TASSER *et al.*, 2017; ALATALO *et al.*, 2016; LAVOREL *et al.*, 2011). Nos Alpes, já vêm ocorrendo processos de migração das plantas e perdas drásticas de área ou até extinção de plantas criófitas e o movimento ascendente de plantas vasculares dentro da zona de alta montanha, impactando na estabilidade desses ecossistemas (GRABHERR *et al.*, 2001; PAULI *et al.*, 1999; GOTTFRIED *et al.*, 1998).

Em particular, na América do sul tropical, a dinâmica espacial do ecótono formado entre Amazônia e o Cerrado, em grande escala, foi intensa nos últimos milhares de anos, com momentos de expansão e retração em diferentes regiões (FREITAS *et al.*, 2001, PESSENDA *et al.*, 1998, GOUVEIA *et al.*, 1997, DESJARDINS *et al.*, 1996; VIDOTTO *et al.*, 2007). Mais recentemente, desde a década de 50, um dos primeiros a relatar os meandros e a complexidade florística do ecótono Amazônia-Cerrado foi Soares (1953), afirmando que seu limite é bastante irregular e impreciso. E, em sua expedição, Xavantina-Cachimbo, Ratter *et al.* (1973) relatam a presença de diferentes tipos de vegetação que se interpenetram, como se se mantivessem em um estágio sucessional constante de acordo com as condições ambientais circundantes. Marimon *et al.* (2014, 2006) verificaram em campo, a partir de estudos botânicos e relatos fitofisionômicos, a expansão da floresta sobre a savana em apenas 35 anos. Ab'Saber (2002) também sugere que há uma dinâmica de expansão e retração das florestas e das savanas ao longo do tempo. No entanto, há evidências da possibilidade de que as mudanças no clima no

século XXI possam causar um “recoo” da floresta (e.g., OLIVERAS; MALHI, 2016; ANDERSON *et al.*, 2018), uma região que provavelmente seria substituída por uma vegetação de menor porte e dossel mais aberto, devido aos impactos no ciclo hidrológico (e.g., STAAL *et al.*, 2018; NOBRE *et al.*, 1991; GLOOR *et al.*, 2013; MARENGO *et al.*, 2013). O processo de retração das bordas da floresta pode ser intensificado pela pressão associada às atividades humanas ao longo do arco do desmatamento (e.g. ALENCAR *et al.*, 2015, SILVERIO *et al.*, 2013), que coincide com as áreas de ecótonos, especialmente em anos de seca extrema (ARAGÃO *et al.*, 2007).

Embora extremamente relevantes para compreender os mecanismos que levam a alterações persistentes na configuração dos ecossistemas terrestres frente às mudanças ambientais globais, a delimitação atual dos ecótonos entre Amazônia e Cerrado ainda falha em compreender reentrâncias entre diferentes tipos de vegetação e a dinâmica de variação de acordo com condições ambientais e atividades antrópicas (MARQUES *et al.*, 2019; SILVA JR. *et al.*, 2019). Identificar os principais problemas nesta delimitação é, portanto, fundamental para ao menos apontar regiões potenciais que, se protegidas e conservadas, poderiam servir como laboratórios naturais para melhor compreensão de como os ecossistemas da Amazônia e do Cerrado brasileiros vão responder às mudanças sem precedentes que estamos vivenciando atualmente.

Objetivos

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo geral caracterizar zonas de transição atualmente definidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), ao longo da fronteira geográfica entre os biomas Amazônia e Cerrado brasileiros. Esta caracterização fornecerá informações para o planejamento de futuros estudos de campo que objetivem a compreensão e quantificação de processos e mecanismos envolvidos na dinâmica de transição entre florestas tropicais e outras configurações estruturais e funcionais. Desta forma os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Avaliar se as zonas de transição registradas pelo IBGE representam áreas de ecótonos (zonas heterogêneas) a partir da quantificação de suas características estruturais básicas (e.g., fechamento do dossel), e utilizar métricas estatísticas que caracterizem a heterogeneidade dos ecótonos.

Hipótese: nem todas as zonas de transição representam adequadamente um ecótono do ponto de vista estrutural, indicando a presença de uma vegetação homogênea. Assim utilizando as porcentagens de floresta e savana calculadas na seção 2.1.2, espera-se que nas ZTEs em que há uma maior similaridade de %F e %S, i.e., florestas e savanas e proporções semelhantes, há maior heterogeneidade de tipos de vegetação. Já em locais em que há valores muito diferentes, haverá uma quantidade muito maior ou somente um tipo de vegetação, ou seja, a heterogeneidade será menor.

2. Avaliar como a heterogeneidade da cobertura vegetal desses ecótonos distribui-se ao longo do gradiente de regimes de precipitação existente.

Hipótese: a heterogeneidade de cobertura vegetal dos ecótonos é correlacionada à variabilidade das chuvas, assim espera-se que:

- 1) exista uma correlação negativa com os totais acumulados anuais mais altos: maior MAP, menor heterogeneidade (e.g., somente floresta). Porém, conforme MAP diminui, espera-se que haja uma correlação positiva, pois, menores valores de MAP implicariam menos heterogeneidade na estrutura da vegetação (e.g., somente savana). Desta forma maior heterogeneidade de estruturas (e.g., presença de floresta e savana) ocorre em um intervalo de MAP intermediário;

- 2) exista uma correlação positiva com a sazonalidade: quanto maior o MSI (mais sazonal), maior a heterogeneidade;

- 3) exista uma correlação positiva com a variabilidade interanual: quanto maior o CV (maior variabilidade), maior a heterogeneidade.

2 METODOLOGIA

2.1 CONJUNTOS DE DADOS UTILIZADOS

2.1.1 Definição dos limites geográficos de biomas e zonas de transição fornecidos pelo IBGE

A zona de transição Amazônia – Cerrado é a maior transição entre biomas do mundo, e ocorre entre os maiores e mais biodiversos biomas brasileiros, a Amazônia e o Cerrado (Coutinho, 2016). A delimitação destes biomas foi realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, <https://www.ibge.gov.br>) e se apresenta como uma fronteira abrupta. No entanto, há adicionalmente a definição de áreas em que ocorrem sistemas de

transição: as chamadas “zonas de tensão ecológica” (ZTEs) pelo IBGE (Veloso *et al.*, 1991). Os autores afirmam que há ZTE entre duas ou mais regiões fitoecológicas ou tipos de vegetações existem sempre, ou pelo menos na maioria das vezes, em comunidades indiferenciadas, nas quais as floras se interpenetram, constituindo as transições florísticas ou contatos edáficos. Em seguida, eles dividem o sistema de transição em ecótono ou enclave: o primeiro caso refere-se ao “mosaico específico” ou ao próprio ecótono de Clements (1949); o segundo caso, por sua vez, refere-se ao “mosaico de áreas edáficas”, no qual cada enclave guarda sua identidade ecológica sem se misturar (IBGE, 2012). Consideram, portanto, ecótono como a mistura florística entre tipos de vegetação formando conjuntos geralmente heterogêneos e diferenciam o enclave como áreas disjuntas que se contatam, mas não se interpenetram, formando conjuntos geralmente homogêneos. Porém eles tratam ambas como uma única coisa, ou uma ZTE, e não diferenciam corretamente na prática um ecótono de um enclave, não caracterizando um ecótono necessariamente de forma adequada.

Esta delimitação utilizou arquivos gerados por um vasto trabalho de campo do projeto RADAMBRASIL, conduzido entre 1970 e 1985, para definir as fronteiras de todos os biomas brasileiros. Estas definições são utilizadas até hoje para a realização de análises, diagnósticos e zoneamentos, entre outros estudos que envolvem a compreensão do meio natural (IBGE, 2012). Os dados utilizados foram gerados a partir do Banco de Dados e Informações Ambientais (BDIA) (mantido pelo próprio IBGE), que reúne desde as informações levantadas pelo Projeto RADAMBRASIL, nas décadas de 1970 e 1980, como fotografias aéreas que foram utilizadas para o inventário florestal, até dados mais recentes, como imagens de satélite e de radar. Ao longo dos anos, as várias tentativas de classificação da vegetação brasileira sofreram alterações culminando na adaptação da classificação da vegetação brasileira a um sistema universal por Veloso e Lima (2012)³.

A partir dessa classificação a classe floresta é dividida em subclasse e formações: **1) ombrófila** que foi subdividida nas formações *floresta ombrófila densa*, *floresta ombrófila aberta*, *floresta ombrófila mista*; e **2) estacional** subdividida em *floresta estacional sempre verde*, *floresta estacional semidecidual* e *floresta estacional decidual*. A **savana**, como um subgrupo da classe campestre, possui as seguintes formações: *florestada (cerradão)*, *arborizada (cerrado típico)*, *parque (campo-sujo)* e *gramíneo-lenhosa (campo-limpo-de-cerrado)*. Mesmo o IBGE sugerindo a existência de ecótonos localizados entre biomas (escala continental) e dentro de um

³ Descrito na versão mais atualizada do Técnico de Vegetação (2ª edição), produzido pelo IBGE

mesmo bioma (escala da paisagem) (Veloso *et al.*, 1991), as fronteiras dos biomas tropicais são geográficas, com mudança abrupta de um bioma para outro (Figura 1).

Para este trabalho, as ZTEs foram selecionadas ao longo da fronteira geográfica entre os biomas Amazônia e Cerrado, na direção Nordeste (NE)- Sudoeste (SO). No total, foram selecionadas 46 ZTEs ao longo das linhas pontilhadas (Figura 1), as quais foram inspiradas a partir de uma zona de tamponamento entre os biomas (Marques *et al.*, 2019).

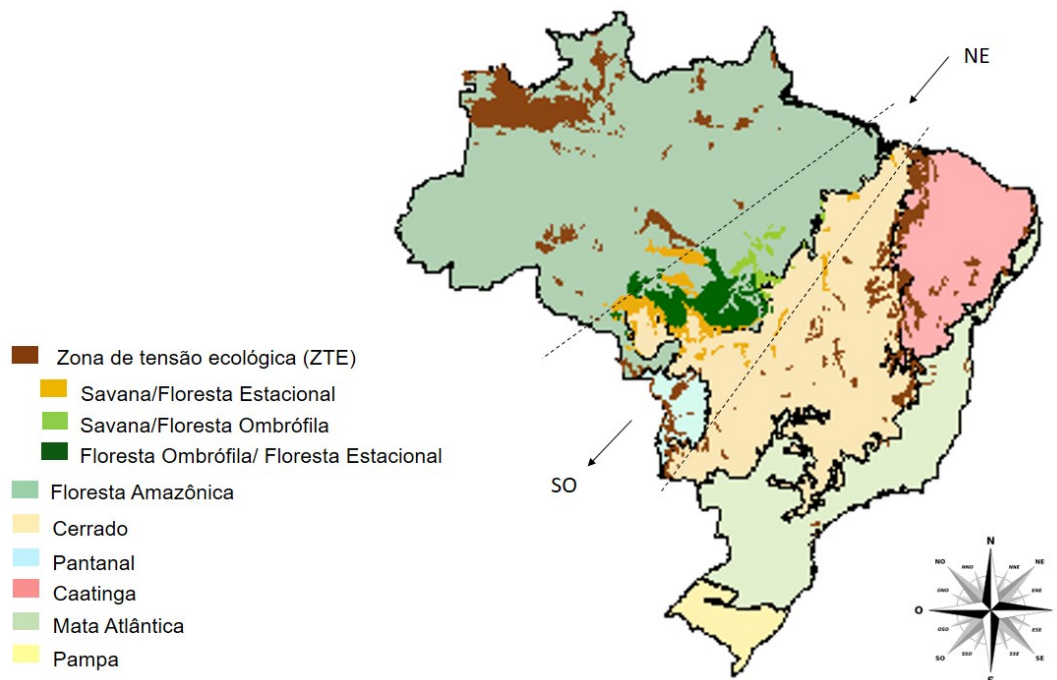


Figura 1: Mapa temático da distribuição dos biomas e as zonas de transição no Brasil segundo o shapefile da vegetação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000). Em que a área de estudo foi aproximadamente delimitada por linhas pontilhadas, incluindo as ZTEs que abrangem a transição em macroescala entre Amazônia a Cerrado no sentido Nordeste (NE)-Sudoeste (SO). Destacando-as em cores diferentes (amarelo escuro, verde claro e escuro), para ressaltar o tipo de vegetação que as compõe.

Na área de estudo entre os biomas Amazônia e Cerrado, que estão nas linhas pontilhadas (por ser linha reta é um pouco mais abrangente que a área em específico, por tanto desconsiderar o bioma Pantanal), as 46 ZTEs selecionadas são classificadas pelo IBGE em 3 tipos: savana/floresta estacional (S-Fe); savana/floresta ombrófila (S-Fo) e floresta estacional/floresta ombrófila (Fe-Fo). O número de ZTEs para cada uma destas subclassificações é: 25 S-Fe, 13

S-Fo e 8 Fe-Fo. Estas áreas abrangem os estados do Maranhão (MA), Tocantins (TO), Pará (PA), Mato Grosso (MT) e Rondônia (RO). Notadamente, as ZTEs selecionadas estão localizadas tanto dentro dos biomas Amazônia (A) e Cerrado (C), quanto ao longo da fronteira geográfica (A/C). E possuem diferentes áreas totais pois a maioria tem classes de diferentes coberturas e usos da terra (Figura 1, Tabela 1).

Tabela 1: Informações das ZTEs selecionadas, a partir do dados do IBGE: estado brasileiro (Est), bioma em que está inserido – Amazônia (A), Cerrado (C) ou em ambos (A/C), composição (Comp) savana/floresta estacional (S-Fe, amarelo); savana/floresta ombrófila (S-F, verde-claro) e floresta estacional/floresta ombrófila (Fe-Fo, verde) e o tamanho (área em km²).

Est	Bioma	Comp	Área (km ²)	Est	Bioma	Comp	Área (km ²)
TO	C	S-Fo	0,0202714252	MT	A/C	S-Fe	0,17633179977
TO	C	S-Fo	0,02649226942	MT	C	S-Fe	0,18504446517
TO	A/C	S-Fo	0,05105941508	MT	A	S-Fe	0,24242092477
TO	A/C	S-Fo	0,18185622583	MT	C	S-Fe	0,06437505771
TO	C	S-Fo	0,12005908853	MT	C	S-Fe	0,33609437544
PA	A	S-Fo	0,0705250264	MT	A/C	S-Fe	0,19148744269
PA	A	S-Fo	0,28488457766	MT	C	S-Fe	0,1013405422
PA	A	S-Fo	0,16419968175	MT	C	S-Fe	0,19397380848
PA	A	S-Fo	0,55464857862	MT	A	S-Fe	2,12171034348
MT	A	S-Fo	0,02090362645	MT	C	S-Fe	0,16423742943
MT	A	S-Fo	0,09258482291	MT	A/C	S-Fe	1,83777122878
MT	A/C	S-Fo	0,16345434795	MT	A/C	S-Fe	3,21106814829
MT	A/C	S-Fo	2,14829550843	RO	A	S-Fe	0,04067653998
MA	C	S-Fe	0,32324805808	RO	A/C	S-Fe	0,04555990226
MA	C	S-Fe	0,12417257836	RO	A	S-Fe	0,03374970668
TO	C	S-Fe	0,33666796555	MT	A	Fo-Fe	0,04724848628
TO	C	S-Fe	0,10089293328	MT	A/C	Fo-Fe	0,05684116351
TO	C	S-Fe	0,69235095228	MT	A	Fo-Fe	0,08350489042
MT	C	S-Fe	0,17633179977	MT	A	Fo-Fe	0,05315747484
MT	A	S-Fe	0,09548316143	MT	A	Fo-Fe	0,05684116351
MT	C	S-Fe	0,22948431442	MT	A	Fo-Fe	0,06437505771
MT	A	S-Fe	1,83777122878	MT	A/C	Fo-Fe	14,1340261021
MT	A/C	S-Fe	0,8512213122	RO	A	Fo-Fe	0,18470417574

1.1.1 Cobertura arbórea (% tree cover) para o ano 2000

O conjunto de dados *Global Forest Change* disponibilizado a partir do *Earth Engine* (<https://earthenginepartners.appspot.com>) fornece informações em escala global sobre

mudanças na cobertura arbórea, entre 2000 e 2019, com resolução de 30 metros, a partir de observações remotas do satélite *Landsat* (HANSEN *et al.*, 2013). Os dados mostram a porcentagem de cobertura arbórea, que caracteriza o fechamento do dossel, considerando árvores com altura superior a 5 m. Seus dados são baseados em 2 correlações: 1) correlação negativa da refletância vermelha anual mínima com a cobertura de árvores, pois os efeitos combinados da absorção de clorofila e do sombreamento do dossel resultam em tons mais escuros como representação da cobertura arbórea mais densa; 2) correlação positiva do índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) anual máximo com a cobertura de árvores, visto que o aumento da área foliar das copas faz com que as florestas pareçam mais verdes (HANSEN *et al.*, 2013). O objetivo dos dados é capturar as recentes mudanças de usos da terra, disparadas principalmente pela ação humana. O primeiro ano da série (2000) foi usado como referência, para computar a estrutura do dossel a partir da cobertura arbórea. (HANSEN; DEFRIES, 2004).

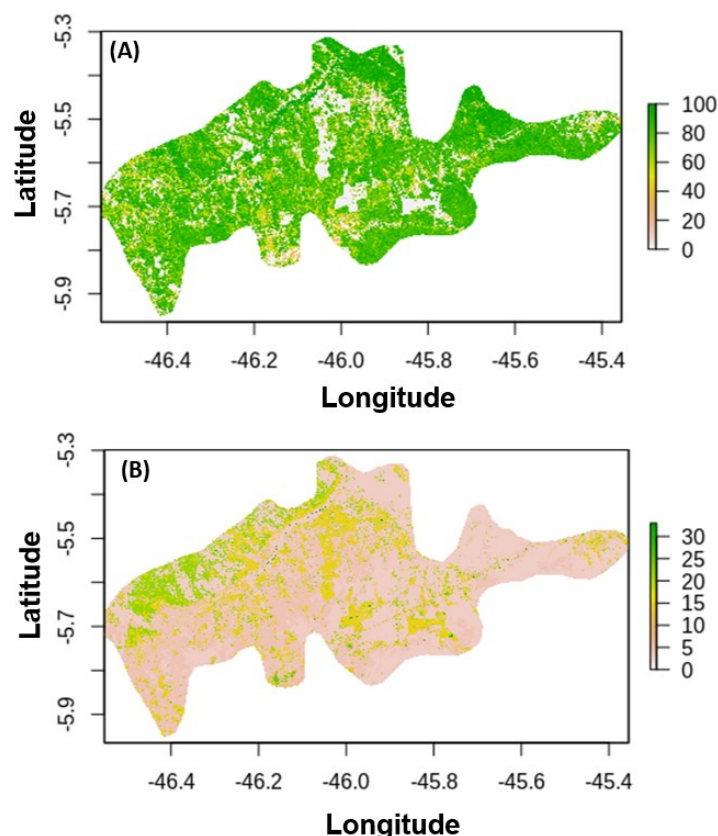


Figura 2: Exemplo das imagens de cobertura arbórea e uso da terra da ZTE localizada estado no Maranhão (contem transição S/Fe) do ano 2000: A) distribuição espacial da cobertura arbórea (Hansen *et al.*, 2013), em que floresta e savana estão representadas nas cores verde e amarelo e em branco e rosa indicam regiões com atividades antrópicas; B) distribuição espacial da

cobertura e uso da terra do MapBiomias, em que floresta e savana estão representadas nas cores branca e rosa, o verde e o amarelo indicam regiões influenciadas por atividades humanas.

Os dados de cobertura arbórea foram utilizados para caracterizar a estrutura do dossel para cada *pixel* de 30 m x 30 m, em procedimento para testar as hipóteses associadas aos objetivos específicos 1 (seção 2.2.2) e 2 (seção 2.3.1).

1.1.2 Cobertura e usos da terra para o ano 2000 (MapBiomias)

O Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomias – <http://mapbiomas.org>) é uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa com especialistas em biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, sistemas de informação geográficas (SIG), e ciências da computação. A metodologia empregada utiliza processamento em nuvem e classificadores automatizados desenvolvidos e operados a partir da plataforma *Google Earth Engine* para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil. Os mosaicos de imagens de satélite disponíveis têm uma resolução espacial máxima de 30 m. Neste trabalho, utilizaram-se os dados da coleção 3 do projeto que cobre o período entre 1985 e 2017 (publicada em agosto de 2018) (Anexo A). Estes dados foram utilizados para a extração da classificação dos usos da terra, segundo o mapa do ano 2000 (ano base utilizado do *Global Forest Change*).

A floresta foi classificada a partir de oito variáveis, incluindo Vegetação Verde (GV), Vegetação Não Fotossintética (NPV), Solo, Nuvem, Sombra da Vegetação Verde (GVS), Índice de Fração de Diferença Normalizada (NDFI), Sombra e Fração de Sombra do dossel (CSFI). Esses recursos foram selecionados usando o algoritmo de importância do recurso disponível na implementação do Random Forest Algorithm (RFA) da linguagem R e não foi subdividida em outros tipos de florestais. A savana também foi classificada a partir dos mesmos tipos de variáveis da floresta, e foi dividida em três tipos de floresta nativa (a partir da biomassa e estrutura da vegetação do inventário de campo de Roitman *et al.*, 2018), em campo (campo limpo e campo sujo), arbóreo-arbustivo e florestas (savanas florestadas, também conhecidas como cerradão, e matas ciliares). A aplicação da árvore de decisão estatística para mapear esses tipos de vegetação foi baseada em uma abordagem de aprendizado de máquina com duas etapas de treinamento de amostras (pixels) selecionando aleatoriamente as áreas mapeadas com maior frequência / consistência para cada um dos três principais tipos (ALENCAR *et al.*, 2020).

Neste trabalho, as análises foram realizadas apenas para a cobertura natural, em que foram mantidas somente formações naturais e as áreas convertidas excluídas (ver exemplo na Figura 1B). Desta forma, utilizou-se a classificação do MapBiomas para filtrar os locais em que há apenas cobertura natural. Neste caso, escolheram-se a formação de floresta (código 3) e a formação savânica (código 4) de cada ZTE (Anexo A). Calcularam-se, para cada ZTE, as porcentagens de *pixels* classificados como floresta e savana, considerando o total de *pixels* com cobertura natural como a soma dos *pixels* classificados como floresta e como savana:

$$\begin{cases} \%F = \frac{\#pixels\ floresta}{(\#pixels\ floresta + \#pixels\ savana)}, \\ \%S = \frac{\#pixels\ savana}{(\#pixels\ floresta + \#pixels\ savana)}. \end{cases}$$

Assim, além de filtrar os locais em que apenas cobertura natural ocorre, as $\%F$ e $\%S$ foram utilizadas para caracterizar os ecótonos (seção 2.2.1, objetivo específico 1), e para investigar o objetivo específico 2 (seção 2.3.1) na proposta de um índice de heterogeneidade. Além disso, computou-se a proporção de *pixels* que correspondem a outras classes de cobertura não naturais ($\%A$) em relação ao total de *pixels*, a fim de ilustrar as correntes mudanças de uso da terra nas ZTEs.

1.1.3 Dados de precipitação do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) (0,05°, 1981 – 2017)

O conjunto de dados de chuva utilizado é o do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) em sua versão 2.0 (Funk *et al.*, 2015). O conjunto de dados do CHIRPS tem base mensal e a série temporal compreende o período de janeiro de 1981 até 2018. O conjunto tem resolução espacial de 0,05°, o que indica, aproximadamente 5,5 quilômetros de comprimento da lateral do pixel (30,25 km² de área) (Tapiador *et al.*, 2012).

Considerando que a definição de climatologia de um dado local é definida pela *World Meteorological Organization* (WMO) a partir de uma série temporal com pelo menos 30 anos de dados (Jagannathan *et al.*, 1967; NOAA, 2015), calculou-se o regime de chuvas para todo o período disponível (1981 – 2017), i.e., 37 anos. Como cada ZTE compreende uma área, ou seja, contém mais de um *pixel*, as métricas associadas ao regime de precipitação de cada ZTE foram calculadas a partir do centróide⁴ da área total da ZTE.

⁴ Coordenadas são as médias das coordenadas dos pontos que formam o centro geométrico de cada ZTE.

A partir deste conjunto de dados, caracterizou-se o regime de chuvas para cada uma das ZTEs, a partir de três métricas usualmente utilizadas para definir o regime de chuvas de uma dada região:

- i. média dos totais anuais de precipitação (MAP, sigla em inglês): calculada pela média dos acumulados anuais;
- ii. variabilidade intra-anual (sazonalidade): calculada pelo índice de sazonalidade de Markham (MSI). Indica valor relativo entre 0 e 1 – quanto mais próximos de 1, maior a sazonalidade. Valores de índice de 1 (100%) indicam que toda a precipitação anual é dada em um único mês, ou seja, sazonalidade máxima. Já o valor 0 (0%) indica que todos os meses têm a mesma medida de precipitação, indicando que o local não possui sazonalidade. (Markham, 1970);
- iii. variabilidade interanual: calculada a partir do coeficiente de variação (CV) dos acumulados anuais dos 37 anos, definido como a razão entre o desvio padrão dos valores e a média (MAP). É uma medida padronizada de dispersão de uma distribuição de probabilidade ou de uma distribuição de frequências de média anual entre os anos. Assim, quanto menor o CV, mais homogênea é a distribuição dos dados, e quanto maior, mais heterogênea em relação à média (Everitt, 1998).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA COBERTURA ARBÓREA

2.2.1 Teste estatístico: modelagem de mistura flexível (*flexmix*)

A primeira hipótese postula que nem todas as ZTEs comportam-se como ecótonos do ponto de vista de fechamento do dossel. Para testá-la, a primeira abordagem utilizada foi o teste de Modelagem de Mistura Flexível (*flexmix*) no R (GRÜN *et al.*, 2019), uma vez que foi utilizado para categorizar florestas e savanas em escala global, para região tropical (HIROTA *et al.*, 2011). Considerando que este trabalho foca em análises em escalas mais finas, os resultados do *flexmix* serão comparados aos fornecidos pelas proporções de florestas e savanas fornecidas pela classificação do MapBiomas (seção 2.1.3), para avaliar a eficiência desta metodologia considerando com conjunto de dados menor e em escala mais fina.

O *flexmix* é um modelo de mistura gaussiana, que modela heterogeneidade não observada ou para aproximar funções de distribuição geral e agrupamento de classes, ou para testar multimodalidade (GRÜN; LEISCH, 2012). A vantagem de usar este teste é que representa uma ferramenta que pode ser aplicada a observações que se originam de vários grupos e as afiliações não são conhecidas, fornecendo aproximações para distribuições multimodais (MCLACHLAN; PEEL, 2000).

Esse modelo executa uma classificação suave, nos dizendo quais são as probabilidades de que um determinado ponto pertença a cada um dos possíveis agrupamentos (*K número de agrupamentos*) dentro de cada classe. Em aplicações reais, o número de componentes é desconhecido e não se sabe quais pontos estão associados a qual distribuição, portanto estima-se um número máximo de *X* grupos (neste caso, $K = 1:X$), que retornam a probabilidade de que um ponto de dados pertença a cada um dos *K* agrupamentos.

O programa implementa os modelos de misturas finitas de regressão pelo algoritmo de Expectativa de Maximização (EM), um método para encontrar uma estimativa de máxima verossimilhança para um parâmetro de uma distribuição, usada para ajustar os modelos repetidamente. Este retorna uma lista com a melhor solução encontrada para cada número de componentes (ENDERS, 2010, GRÜN; LEISCH, 2007, LEISCH, 2004), a partir dos critérios de informação de Akaike (AIC), informação Bayesiana (BIC), e probabilidade de conclusão integrada (ICL). Tais critérios avaliam a parsimônia (ou *tradeoff*) entre a qualidade do ajuste e a complexidade do modelo com diferentes parametrizações. O menor valor dos critérios indica o modelo de melhor ajuste. Durante os testes de multimodalidade, os três critérios se comportaram de forma semelhante e optamos pelo BIC já que este foi provado ser consistente sob algumas condições e eficiente do ponto de vista prático (FRALEY *et al.*, 1999). Assim selecionou-se o modelo com o menor BIC, que fornece os parâmetro e gráfico dos componentes selecionados.

Aplicou-se função *flexmix* nos dados de %CA. Se o critério BIC apontasse mais de um agrupamento, implicando multimodalidade, haveria evidência de mais de um tipo de formação vegetal, ou seja, estrutura ecotonal. Por outro lado, se apontasse apenas um agrupamento, significando unimodalidade, haveria apenas um tipo de estrutura vegetal (não ecotonal). Dois exemplos do procedimento realizado são mostrados na Figura 3. O primeiro caso mostra que para um histograma indicando multimodalidade com três modos, o critério BIC calculado a partir de um modelo com dois modos é o mais parcimonioso (Figura 3A); para este exemplo, independentemente do número de modos, há multimodalidade e a estrutura da vegetação é

ecotonal. Por outro lado, na Figura 3B, mesmo com um histograma que visualmente também mostra três modos, o procedimento *flexmix* aponta apenas um modo para manter a parcimônia, o que sugeriria, em teoria, uma estrutura não ecotonal. A comparação com os resultados a partir dos dados do MapBiomias vai fornecer uma visão mais detalhada das limitações deste modelo no cômputo dos modos de %CA.



Figura 3: Exemplo do teste *flexmix* de duas ZTEs diferentes, mostrando a quantidade de agrupamentos (destacado no círculo vermelho) e o gráfico da densidade da cobertura vegetal. A) O teste mostra que essa ZTE possui dois agrupamentos e o gráfico que há dois tipos de vegetação, um de maior densidade e outro de menor densidade; B) o teste mostra que a ZTE

possui apenas um agrupamento e o gráfico que há apenas um tipo de vegetação de cobertura média de dossel.

2.2.2 Métricas estatísticas que caracterizam a heterogeneidade dos ecótonos

2.2.2.1 Inferindo heterogeneidade a partir da cobertura e uso da terra

Para obter um índice de heterogeneidade (IH), %F e %S foram combinadas da seguinte forma:

$$IH = 1 - \frac{|\%F - \%S|}{100},$$

ou seja, quanto mais o IH é próximo de 0, menos heterogêneo; quanto mais próximo de 1, mais heterogêneo. Com este índice, comparou-se os resultados de IH aos resultados do teste *flexmix*, hipotetizando que quanto menor IH, maior a chance de unimodalidade.

2.3 RELAÇÃO DA COBERTURA VEGETAL COM OS REGIMES DE CHUVA (MAP, MSI E CV)

2.3.1.1 Métricas para quantificar heterogeneidade a partir da cobertura vegetal

Para quantificar a heterogeneidade espacial da vegetação de cada ZTE a partir da %CA, utilizaram-se duas métricas estatísticas detectar a variabilidade de um conjunto de dados para melhor entender seu comportamento:

- i. Desvio Padrão (sd): é uma medida de dispersão e o seu valor reflete a variabilidade das observações em relação à média. Um desvio padrão grande significa que os valores amostrais têm ampla variação ao redor da média, enquanto um desvio padrão pequeno indica que eles estão condensados próximos da média. Assim quanto menor o desvio padrão, mais homogênea é a amostra (Bland *et al.*, 1996). É dada pela equação abaixo:

$$sd = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

com N = número de *pixels* de cada ZTE; \bar{x} = valor médio de %CA de todos os *pixels* de uma dada ZTE; x_i representando cada um dos N *pixels*.

- ii. Intervalo interquartil (IQR): é a distância (ou diferença de valores) entre o quartil 25% (quartil inferior) e o quartil 75% (quartil superior). Foi desenvolvido a fim de avaliar o grau de dispersão dos dados em torno da medida central (mediana). O cálculo do quartil dá-se após os dados organizados na forma crescente. Com isso, calcula-se a mediana (medida central), a seguir separa-se os valores inferiores e os superiores à mediana. Caracterizando o quartil 1 (25%) como sendo o cálculo da mediana dos inferiores. E o quartil 3 (75%), é o cálculo da mediana dos valores superiores. Assim quem tem um maior IQR tem maior grau de dispersão dos dados em torno da medida de centralidade, ou seja, é mais heterogêneo (Bussab; Morettin, 2004).

2.3.2 Testes estatísticos: regressões

Parar testar a segunda hipótese de que as heterogeneidades das ZTEs são correlacionadas a um regime de chuva mais variável (e.g., menor total acumulado anual e maiores variabilidades), utilizaram-se os modelos de regressão linear e polinomial.

As variáveis dependentes testadas foram as métricas de heterogeneidade (seção 2.3.1): IH, SD e IQR. Já as variáveis explicativas utilizadas foram MAP, MSI e CV.

2.3.2.1 Regressão Polinomial

Considerando a hipótese de correlação entre a heterogeneidade e MAP, utilizou-se a regressão polinomial com opção para verificar se o modelo não linear fornece resultados melhores com respeito ao ajuste dos dados. Teoricamente, podemos aproximar qualquer função com um polinômio. A regressão polinomial é uma extensão da regressão linear, em que adicionam-se termos quadráticos, cúbicos, etc, até o décimo grau. A variável independente x é expandida num polinômio com os termos $x^2 = x.x$, $x^3 = x.x.x$, etc (BATTISTI, 2001). A equação é dada por:

$$\hat{y}_i = \alpha + \beta x_i + \gamma x_i^2 + \dots$$

Uma limitação deste modelo é que ele não funciona bem quando temos muitas variáveis e o grau do polinômio é muito alto. Isso porque o número de variáveis cresce exponencialmente com o grau do polinômio ajustado, tornando o aprendizado impraticável rapidamente. Assim, é recomendável utilizar regressão polinomial apenas em casos de não linearidades mais simples, como neste caso (ZEVIANI *et al.*, 2013).

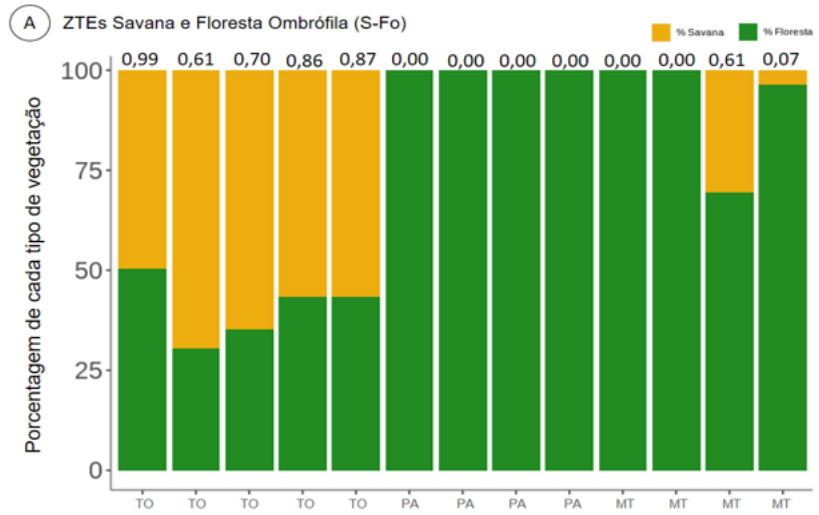
Para todas as análises, utilizou-se o ambiente (R Core Team, 2018), e as bibliotecas *raster* (Hijmans *et al.*, 2020), *rgeos* (Bivand *et al.*, 2019), *maptools* (Bivand *et al.*, 2020), *rgdal* (Bivand *et al.*, 2019), *Ncdf4* (Pierce, 2019), *dplr* (Wickham *et al.*, 2020), *sp* (Pebesma *et al.*, 2021) e *ggplot2* (Wickham, 2020).

3 RESULTADOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ECÓTONOS

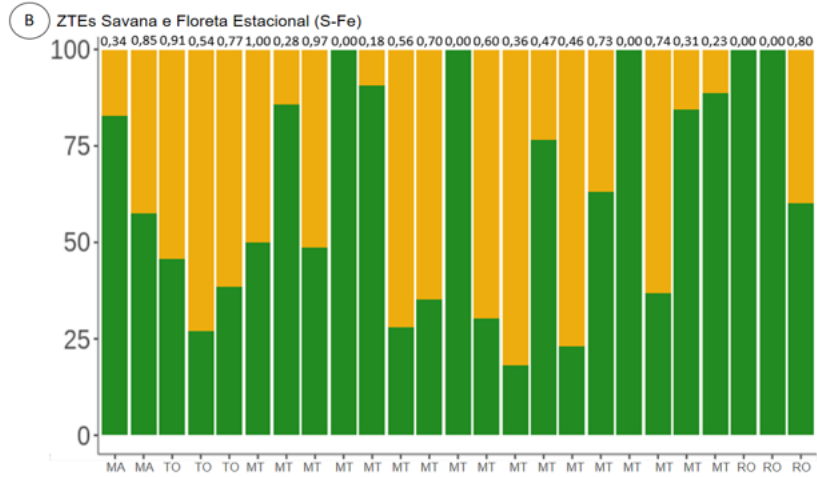
3.1.1 Caracterização das ZTEs a partir da classificação do MapBiomias

A partir dos valores de %F e %S, as 46 ZTEs escolhidas foram caracterizadas conforme mostrado na Figura 4. De acordo com a Tabela 1, os tipos de vegetação associados são S-Fo (Figura 4A), S-Fe (Figura 4B) e Fo-Fe (Figura 4C). Das 13 ZTEs S-Fo, dez apresentam na sua composição florestas e savanas, sugerindo que, em relação à estrutura, há existência de um ecótono. As demais apresentam somente floresta, ou seja, apenas um tipo de vegetação e não são consideradas ecótonos (Figura 4A, Tabela 2). Das 25 S-Fe, 21 apresentam savanas e florestas, enquanto as demais contêm somente florestas (Figura 4B, Tabela 2).



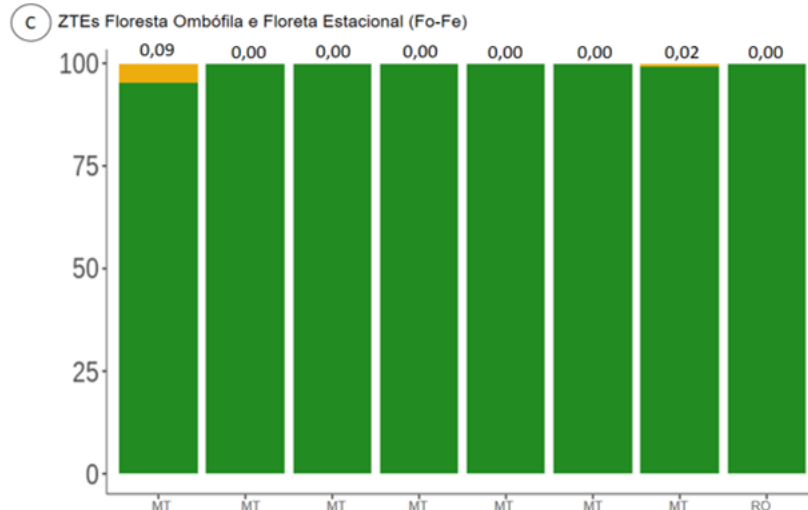
Estados brasileiros onde estão localizadas Cada ZTE

TO- Tocantins PA- Pará MT- Mato Grosso



Estados brasileiros onde estão localizadas Cada ZTE

MA- Maranhão TO- Tocantins MT- Mato Grosso RO- Rondônia



Estados brasileiros onde estão localizadas Cada ZTE

MT- Mato Grosso RO- Rondônia

Figura 4: Quantidades relativas das porcentagens de cobertura vegetal de floresta e savana a partir da classificação do MapBiomas para cada ZTE. Os valores em cima de cada barra correspondem ao IH da respectiva ZTE. Os gráficos estão divididos por tipos de transições das ZTEs de acordo com a classificação do IBGE. As florestas (%F) estão representadas pela cor verde e savanas (%S) em amarelo. No eixo x apresentam-se o estado brasileiro no qual as ZTEs localizam-se.

Finalmente, das oito Fo-Fe, seis apresentam apenas florestas o que é esperado de uma transição que foi classificada a partir de dois tipos de florestas (ombrófilas e estacionais), seja ela ecótono ou não. Como aspectos de composição florística e funcionalidade não foram avaliados neste estudo, não é possível avaliar se estas ZTEs são efetivamente ecótonos (Figura 4C, Tabela 2). Porém, observa-se ainda que em duas ZTEs há presença de savana, o que caracteriza um ecótono estrutural e diverge da classificação do IBGE.

Assim, do ponto de vista da estrutura do dossel (i.e., considerando 40 das 46 ZTEs – excluindo as seis Fo-Fe que não se pode efetivamente inferir), ~87 das ZTEs apresentam características ecotonais, enquanto 13% apresentam apenas estrutura florestal (Figura 4, Tabela 2).

Tabela 2: Informações das ZTEs; estado brasileiro (Est), composição (Comp), porcentagens de cobertura vegetal natural floresta (%F) e savana (%S). Métricas de heterogeneidade: Índice de Heterogeneidade (IH), dispersão como desvio padrão (SD) e intervalo interquartil (IQR). Análise estatística observando a quantidade de agrupamentos do teste *flexmix* (F), em rosa as áreas em que o teste F corresponde com IH.

Est	Comp	%F	%S	%A	IH	F	SD	IQR
TO	S-Fo	0,50	0,49	28,00	0,99	2	38,26	72
TO	S-Fo	0,31	0,69	39,37	0,61	1	37,06	86
TO	S-Fo	0,35	0,65	49,22	0,7	1	36,1	72
TO	S/Fo	0,43	0,57	32,89	0,86	1	40,18	82
TO	S-Fo	0,43	0,57	22,05	0,87	1	38,49	87
PA	S-Fo	1,00	0,00	0,33	0,00	3	2,02	3
PA	S-Fo	1,00	0,00	7,39	0,00	5	8,65	3
PA	S-Fo	1,00	0,00	15,13	0,00	5	11,75	10
PA	S-Fo	1,00	0,00	33,32	0,00	3	10,87	9
MT	S-Fo	1,00	0,00	38,85	0,00	3	8,81	9
MT	S-Fo	1,00	0,00	47,13	0	1	11,88	11
MT	S-Fo	0,70	0,30	35,64	0,61	3	26,17	42
MT	S-Fo	0,96	0,04	22,58	0,07	4	15,36	10
MA	S-Fe	0,57	0,43	5,44	0,34	3	21,4	15

MA	S-Fe	0,83	0,17	25,14	0,85	3	22,17	6
TO	S-Fe	0,46	0,54	38,51	0,91	1	33,55	54
TO	S-Fe	0,68	0,32	32,36	0,54	1	0,47	1
TO	S-Fe	0,39	0,61	14,40	0,77	1	31,2	35
MT	S-Fe	0,50	0,50	25,85	1,00	4	24,88	45
MT	S-Fe	0,86	0,14	36,72	0,28	4	28,98	22
MT	S-Fe	0,49	0,51	13,80	0,97	3	20,38	34
MT	S-Fe	1,00	0,00	21,89	0,00	3	10,68	3
MT	S-Fe	0,91	0,09	30,05	0,18	5	20,39	10
MT	S-Fe	0,28	0,72	29,99	0,56	1	37,09	79
MT	S-Fe	0,35	0,65	32,66	0,70	1	35,8	77
MT	S-Fe	1,00	0,00	23,89	0,00	5	12,48	3
MT	S-Fe	0,30	0,70	42,55	0,60	1	35,93	78
MT	S-Fe	0,18	0,82	47,60	0,36	3	29,5	45
MT	S-Fe	0,76	0,24	43,51	0,47	3	24,65	20
MT	S-Fe	0,23	0,77	46,66	0,46	5	29,99	39
MT	S-Fe	0,63	0,37	60,24	0,73	2	34,32	50
MT	S-Fe	1,00	0,00	6,022	0,00	4	6,31	1
MT	S-Fe	0,28	0,72	37,14	0,74	1	37,6	77
MT	S-Fe	0,84	0,16	37,41	0,31	4	24,92	17
MT	S-Fe	0,89	0,11	10,51	0,23	5	15,36	10
RO	S-Fe	1,00	0,00	27,56	0,00	4	15,1	10
RO	S-Fe	1,00	0,00	23,90	0,00	5	15,96	3
RO	S-Fe	0,60	0,40	99,63	0,80	2	8,36	11
MT	Fo-Fe	0,95	0,05	40,04	0,09	4	22,39	11
MT	Fo-Fe	1,00	0,00	10,40	0,00	3	8,05	1
MT	Fo-Fe	1,00	0,00	27,30	0,00	3	12,48	3
MT	Fo-Fe	1,00	0,00	26,38	0,00	3	12,11	3
MT	Fo-Fe	1,00	0,00	37,95	0,00	3	10,69	3
MT	Fo-Fe	1,00	0,00	45,97	0,00	3	9,55	3
MT	Fo-Fe	0,99	0,01	23,36	0,02	3	11,67	3
RO	Fo-Fe	1,00	0,00	15,56	0,00	4	13,82	10

3.1.2 Modelagem de mistura flexível (*flexmix*) e métricas de heterogeneidade

Complementarmente aos resultados da Figura 4, executou-se o teste *flexmix* para a cobertura arbórea a fim de avaliar estatisticamente se as ZTEs representam potencialmente ecótonos no ponto de vista estrutural. Obtiveram-se 34 ZTEs multimodais (e.g., Figura 5A), que apresentaram dois ou mais agrupamentos e correspondem a ecótonos estruturais, pois possuem no mínimo dois modos estruturais de fechamento do dossel. Para as outras 12 ZTEs o teste resultou como unimodal (e.g., Figura 5C); 10 dessas ZTEs são formadas apenas por vegetação com menor fechamento do dossel (%CA entre 51 e 86) (e.g., Figura 5E), e dois somente por cobertura com maior fechamento do dossel (%CA >53) (e.g., Figura 5D) (Tabela 2).

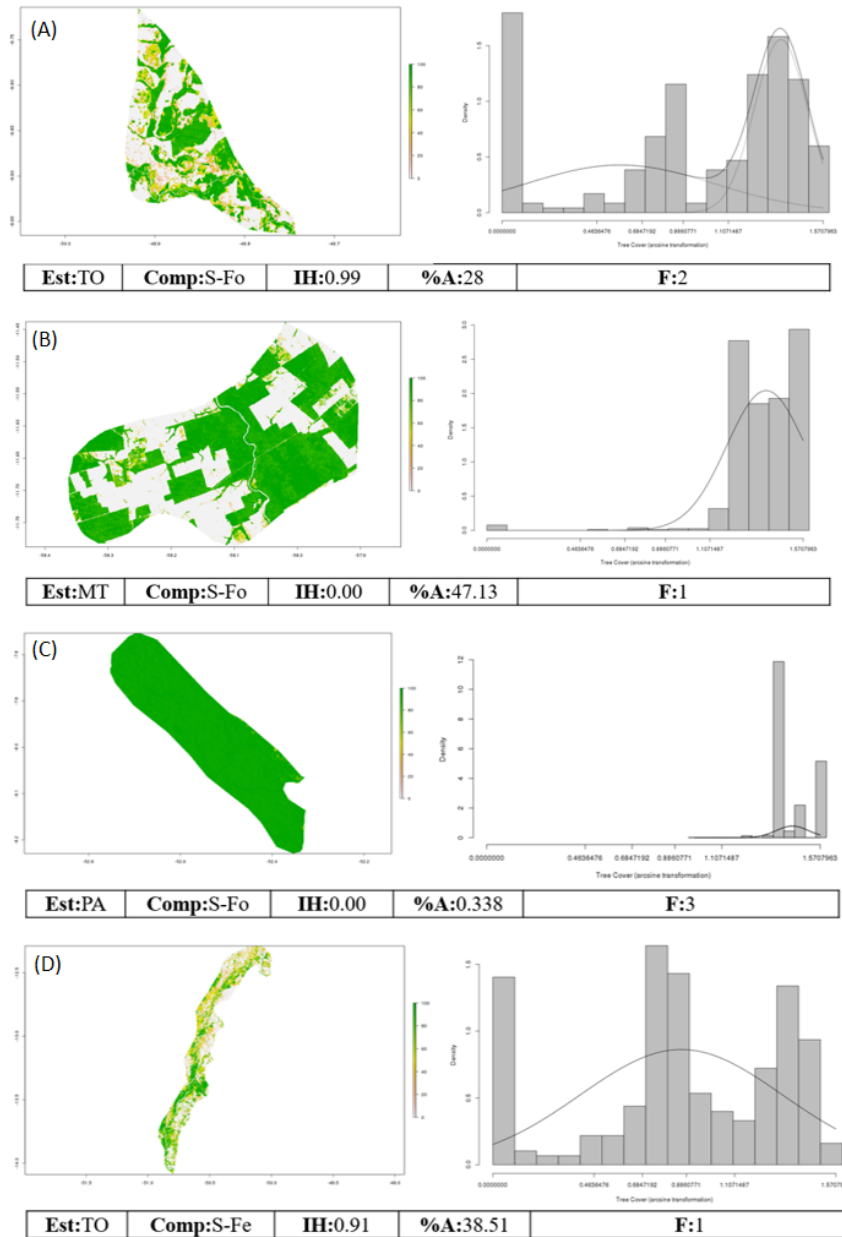


Figura 5: Exemplos do teste *flexmix* em quatro ZTEs com suas respectivas classificações conforme o IBGE:estado brasileiro (Est) em que se localiza e composição da transição (Comp). Índice de Heterogeneidade (IH), quantidade de agrupamentos do teste *flexmix* e alterações nos usos naturais do solo (%A), a partir dos dados do MapBiomass e Hansen. Nos painéis à esquerda, estão as imagens da %CA (seção 2.1.2), com tons verdes representando maior cobertura vegetal (e.g., floresta), amarelos menor cobertura vegetal (e.g., savana), e as cores rosa e branco representando alterações nos usos naturais da terra (e.g., água, solo exposto). Os painéis à direita apresentam os histogramas e as distribuições de acordo com o melhor modelo obtido do teste *flexmix*. A) ZTE formada por S/Fo, localizada no TO e as variáveis IH e F são correspondentes; B) ZTE formada por S/Fo, localizada no MT e as variáveis IH e F são

correspondentes; C) ZTE formada por S/Fo, localizada no PA e as variáveis IH e F não correspondem; D) ZTE formada por S/Fe, localizada no TO e as variáveis IH e F não correspondem;

O teste *flexmix* e o IH foram complementares em 19 ZTEs (em destaque na Tabela 2). Alguns exemplos estão ilustrados na Figura 5 em que para os 2 primeiros casos, os valores atribuídos a cada variável IH e F são correspondentes. Na figura 5A, ZTE apresenta IH de 0.99 indicando que é uma área bastante heterogênea. O teste *flexmix* apontou que contém dois agrupamentos e o gráfico de densidade mostrou a presença tanto de cobertura com maior fechamento do dossel e com menor fechamento. Na figura 5B IH de 0.00 indica que é uma área homogênea e o teste apontou apenas 1 agrupamento e o gráfico para a presença de cobertura arbórea de maior fechamento do dossel. As outras 27 ZTEs os resultados divergiram (Tabela 2), estão exemplificados nas figuras 5C, D e E. Áreas que o IH é igual a 0,00 e representa apenas um tipo de vegetação o teste apontou como possuindo mais de um agrupamento (e.g., Figura 5C). Enquanto outras ZTEs que apresentaram IH próximo de 1,00 o teste *flexmix* apontou como constando somente um agrupamento (e.g., Figura 5D).

Assim a partir da cobertura vegetal, em termos do fechamento do dossel, nem todas as ZTEs apresentaram as características ecotonais do ponto de vista do *flexmix*, em que 72% das ZTEs apresentaram características ecotonais. Do ponto de vista da cobertura do uso Da terra do MapBiomas 87% das ZTEs apresentaram características ecotonais. Em relação a esses dados houve 41% de coincidência do teste do *flexmix* com o IH.

Com relação às análises realizadas previamente para classificação de florestas e savanas na região tropical (HIROTA *et al.*, 2011), essas diferenças entre IH e *flexmix* podem ocorrer por que o *flexmix* parece ser muito sensível à maior variação dos dados, para resolução de 30 m, particularmente considerando o menor conjunto de dados. Isto significa que para análises de escalas mais finas, o *flexmix* pode não capturar diferentes modos estruturais a partir da cobertura arbórea de forma consistente. Vale ressaltar que a quantidade de cobertura não representada por florestas e savanas (e.g., outros tipos naturais, não naturais e em regeneração) (%A) é bastante alta em boa parte das ZTES. Isto pode influenciar a quantidade de *pixels* avaliados em cada ZTE e o desempenho do *flexmix*.

3.2 RELAÇÃO ENTRE HETEROGENEIDADE DA COBERTURA VEGETAL COM OS REGIMES DE CHUVA (MAP, MSI E CV)

Na Figura 6 e 7 estão dispostos sete painéis, com um recorte da ZTE em macro escala Amazônia-Cerrado (linha preta e cinza escuro) e as ZTEs em destaque dentro e entre os biomas. Estão dispostas espacialmente no sentido NE-SO no estado do Maranhão, Tocantins, Pará, Mato Grosso e Rondônia. No primeiro painel estão em destaque os tipos de transições S/Fe, S/Fo e Fo/Fe que compõe as ZTEs de acordo com o IBGE. No segundo, terceiro e quarto painel estão os fatores que estão presentes nesse gradiente: Média de precipitação anual, sazonalidade e coeficiente de variação. Mais abaixo estão as métricas de heterogeneidade IH, SD e IQR.

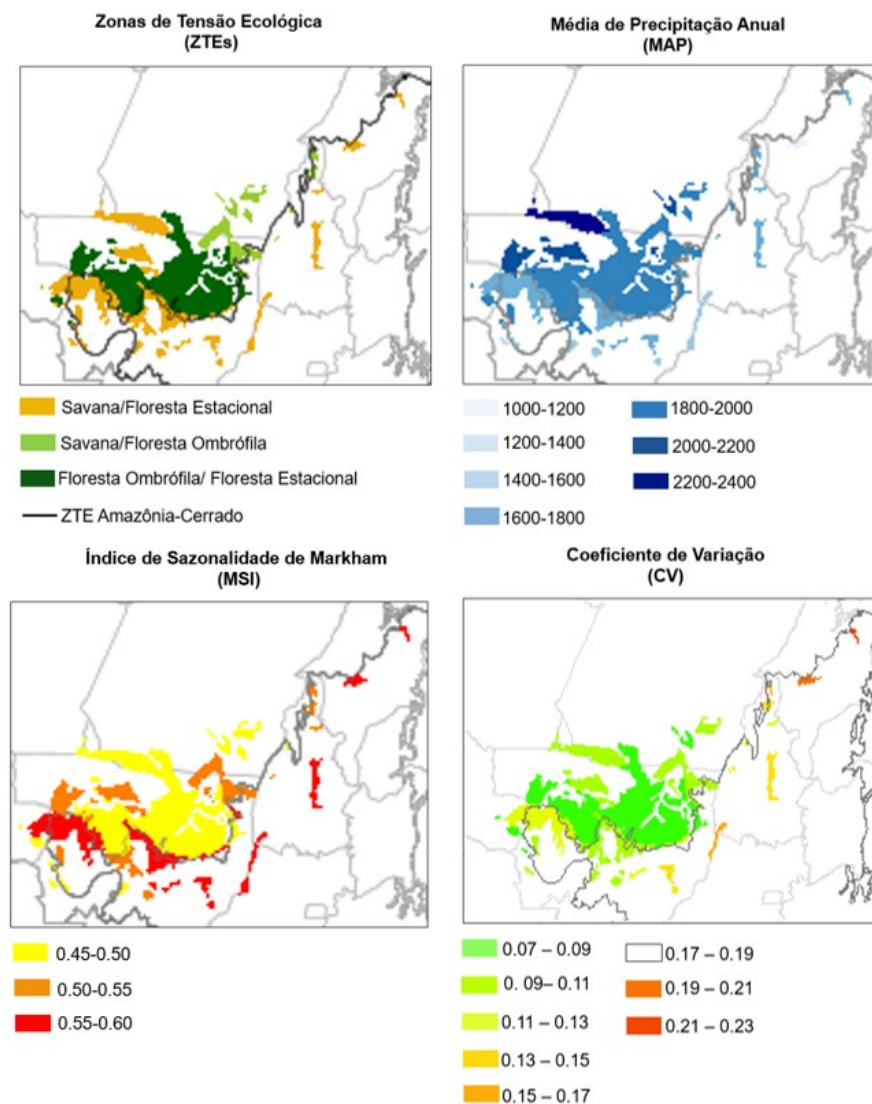


Figura 6: Mapa visual-espacial, mostrando a disposição dos tipos de transições das Zonas de Tensão Ecológicas (ZTEs) em que S/Fe está em laranja, S/Fo em verde claro e Fo/Fe em verde escuro. E as variações de cada uma das variáveis que definem o regime de chuvas (MAP, MSI

e CV) nas respectivas áreas em destaque. Assim o mapa do MAP está representado por tons de azul, em que as cores mais claras representam menor MAP conforme ficam mais escuras maior é o MAP. O mapa do MSI está representado por cores quentes em que o amarelo são ZTEs de menor sazonalidade, laranja intermediário e vermelho maior sazonalidade. O mapa do CV está representado por tons de verde claro para menor CV e conforme vai aumentando passa para tons de amarelo até os valores mais altos que estão em laranja.

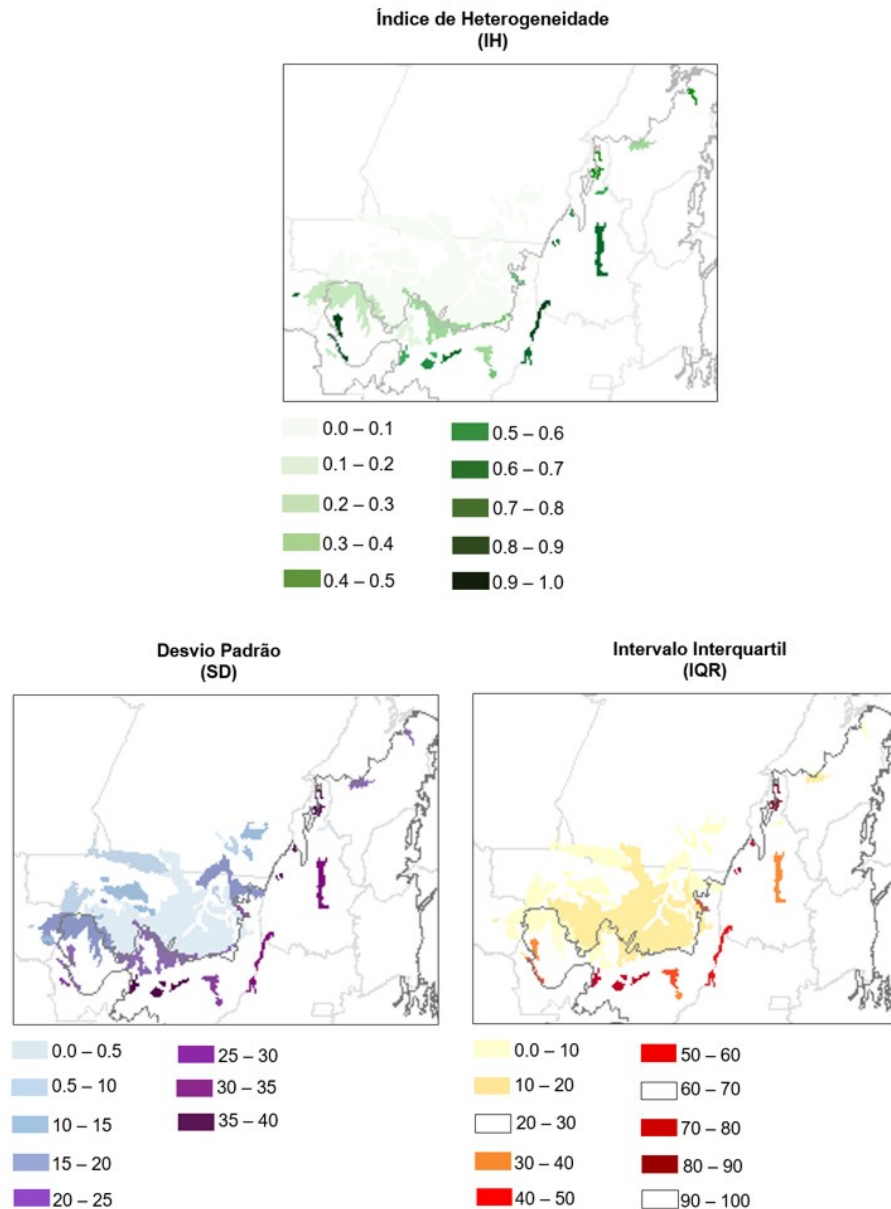


Figura 7: Mapa visual-espacial mostrando como estão dispostas as métricas de caracterização heterogeneidade (IH (%cobertura e uso do solo), SD e IQR (%CA)) nas Zonas de Tensão Ecológicas (ZTEs). O mapa de IH está representado por tons de verde em que as cores mais claras representam regiões de baixíssima heterogeneidade conforme ficam mais escuras são

mais heterogêneas. No mapa de SD os tons mais claros de roxo representam os menores de valores de SD (regiões com menor heterogeneidade) e as cores mais escuras os valores mais altos (maior heterogeneidade). O mapa do IQR segue a mesma lógica, cores mais claras menores valores e cores mais escuras os valores mais altos. Neste mapa do IQR tem alguns valores em branco por que nenhuma ZTE teve esse valor.

A figura 6 e 7 fornecem uma análise visual e espacial dos dados. Assim ao analisar visualmente a distribuição dos tipos de transições das ZTEs, observa-se que a maioria das transições S-Fe e algumas S-Fo encontram-se no bioma Cerrado, conforme vai subindo em direção a Amazônia encontram-se a totalidade das transições Fo-Fe, a maioria das S-Fo e algumas S-Fe. Comparando os tipos de transições, com a MAP, MSI e CV, observa-se um aumento da cobertura vegetal com aumento da MAP e diminuição da sazonalidade e variação interanual e vice-versa. Assim as áreas que estão no bioma Cerrado (S-Fe / S-Fo), possuem um MAP menor, e uma maior sazonalidade e maior variação interanual. Conforme aproxima-se da Amazônia (Fo-Fe / S-Fo/ S-Fe) a MAP vai aumentando e a sazonalidade diminuindo assim como a variação interanual (Figura 6).

Em relação ao o IH baseado na porcentagem da classificação do uso da cobertura do solo e o SD e IQR extraída da %CA os dados foram muitos semelhantes. De forma geral em locais de maior e menor heterogeneidade para IH correspondem aos valores de SD e IQR. Assim as zonas mais homogêneas (cores mais claras) estão localizadas em menores valores de MAP e menos sazonal e os maiores valores de MAP em maior sazonalidade. Em relação aos tipos de transições, locais mais homogêneos ocorrem a presença de algumas S/Fe e S/Fo e estão concentradas todas as transições Fo/Fe. As zonas mais heterogêneas (cores mais escuras) estão em um MAP intermediário e de maior sazonalidade e há ocorrência de maior concentração das transições S/Fe e a presença de algumas S/Fo. O coeficiente de variação (CV) segue o mesmo padrão do MAP e possui áreas mais heterogêneas em valores intermediários e de maior sazonalidade (Figura 7).

Algumas ZTEs se destacam por não entrar nessa configuração geral. Como as que são compostas por S/Fe, de grande área localizadas no estado do MT dentro do bioma Amazônia. Diferente da maioria das outras ZTEs S/Fe, estas têm maior MAP e possuem baixos valores de IH. Apesar de estarem próximas de transições Fo/Fe com menor sazonalidade essas possuem maior sazonalidade como as demais transições S/Fe que estão na savana. Já as transições S/Fe que estão localizadas na savana, na divisa com a Amazônia no MT e RO, possuem maior MAP e menor sazonalidade e IH variado. As ZTEs de S/Fo que também estão na savana na divisa

com Amazônia tem uma maior sazonalidade, as que estão no estado do TO tem menor MAP e maior IH e as que estão no MT tem um MAP maior e um IH um pouco menor, porém maior do que com as S/Fo localizadas no PA (Figura 6 e 7).

3.2.1 Relações estatísticas da precipitação x heterogeneidade

3.2.1.1 Heterogeneidade a partir da classificação do MapBiomias e regressões linear e polinomial

A Figura 8 mostra os melhores modelos de regressão que representam a relação entre IH e as variáveis associadas ao regime de chuvas. Nota-se uma forte relação polinomial entre a heterogeneidade (com florestas e savanas coexistindo) e total acumulado de chuvas MAP ($R^2 = 0,49$; $p < 0,05$) (Figura 8A), de acordo com a hipótese proposta na seção 2.3.1. Neste sentido, com valores de MAP menores que aproximadamente 1.500 mm/ano, há uma tendência de aumento de IH conforme MAP aumenta. Esta tendência é revertida (menores valores de IH para maiores MAP) para valores de MAP maiores que aproximadamente 1.800 mm/ano. Apenas nesta faixa intermediária entre 1.500 e 1.800 mm/ano, a heterogeneidade é mais alta. Isso justifica o formato côncavo da regressão (Figura 8A). Ainda, observa-se que as ZTEs Fo-Fe aparecem apenas a partir de aproximadamente 1.800 mm/ano e estão fora da zona intermediária, o que seria esperado considerando que apenas a estrutura de fechamento do dossel é avaliada neste trabalho. Por outro lado, as ZTEs S-Fe apresentam-se ao longo de todo o gradiente de MAP; curiosamente, as S-Fo ocorrem apenas a partir de aproximadamente 1.600 mm/ano quando homogêneas e no intervalo intermediário quando mais heterogêneas, de forma descontínua, sem valores intermediários de heterogeneidade. Estes resultados sugerem que a existência efetiva de ecótonos ocorre em intervalos de MAP entre 1.500 e 1.800 mm/ano, com IH maiores que 0,3, preferencialmente com savanas coexistindo com florestas estacionais em diferentes graus de IH; enquanto que a coexistência de savanas com florestas ombrófilas se dá apenas com heterogeneidade alta.

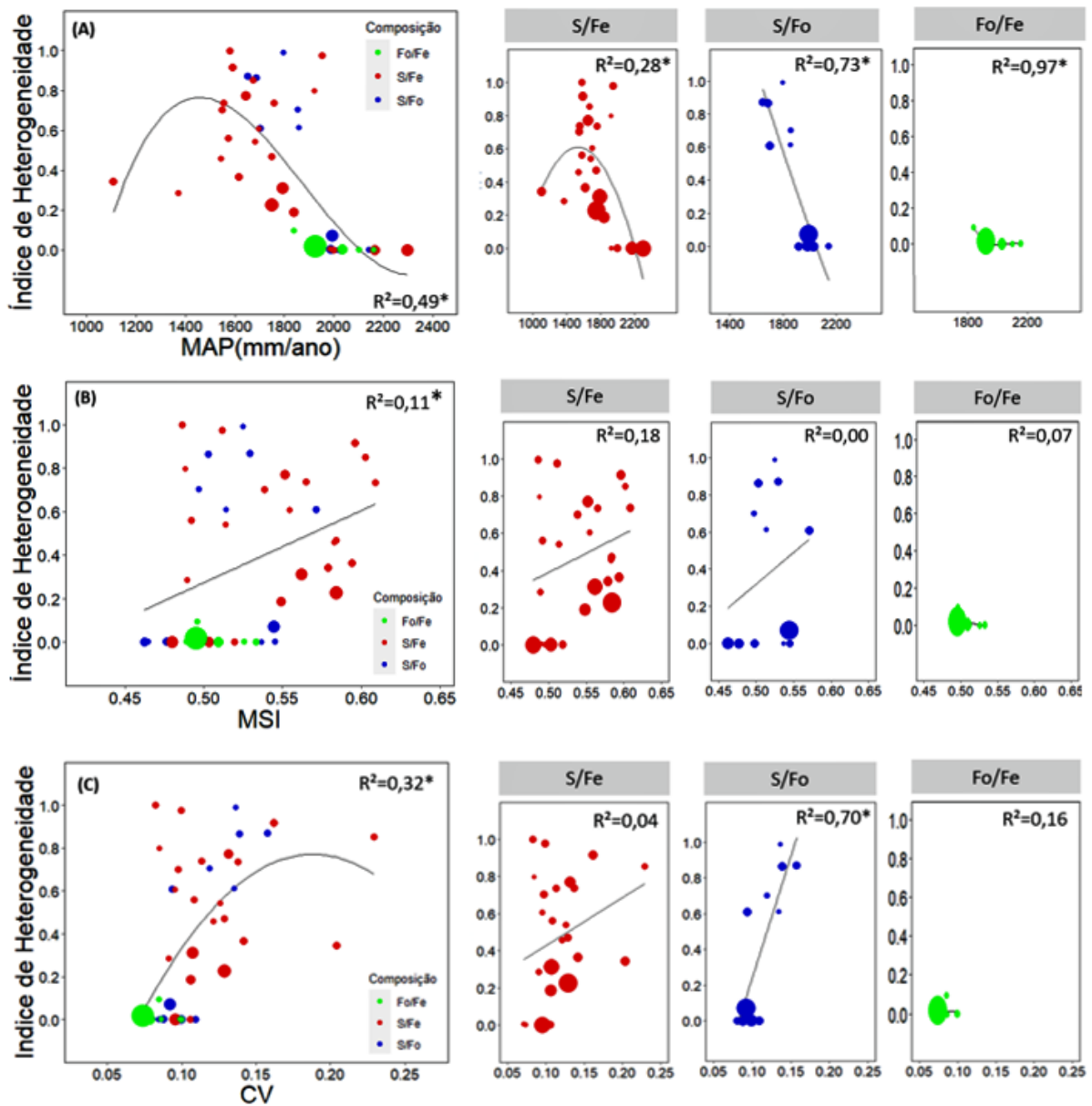


Figura 8: Regressões linear e polinomial dos regimes de precipitação com Índice de Heterogeneidade; Cada ZTE é representada por um ponto, cujos tamanho e cor referem-se respectivamente à área e aos tipos de transições. No eixo y o índice de heterogeneidade (IH) varia de 0,0 (regiões mais homogêneas) a 1,0 (regiões mais heterogêneas); A) regressão polinomial da heterogeneidade em relação ao MAP; B) regressão linear da heterogeneidade em relação ao MSI; C) regressão polinomial da heterogeneidade em relação ao CV.

A dependência do IH com a sazonalidade (MSI) é representada por uma relação linear positiva ($R^2 = 0,11$; $p < 0,05$) (Figura 8B). Conforme esperado, locais em que a sazonalidade é menor possuem menor heterogeneidade (IH \sim 0), incluindo todas as ZTEs Fo-Fe, e algumas S-Fe e S-Fo. A maioria das ZTEs S-Fe, no entanto, aparecem em locais com sazonalidade mais

alta, com IH que variam entre 0,25 e 1,00. Novamente, há uma descontinuidade na heterogeneidade em ZTEs S-Fo: IH bem baixos (~ 0 , indicando homogeneidade) concentram-se em baixa sazonalidade; entre valores de MSI entre 0,50 e 0,55, essas ZTEs podem ser tanto homogêneas quanto heterogêneas. Vale ressaltar que a variância explicada pelo modelo e a variação de MSI são relativamente baixas, o que sugere que a sazonalidade não é o fator determinante da heterogeneidade nas ZTEs.

Em comparação com a sazonalidade, a variabilidade interanual (CV) parece ser mais determinante na heterogeneidade, com uma relação mais bem descrita por um modelo polinomial de 2ª ordem (Figura 8C). A variabilidade interanual da chuva varia entre 0,07 a 0,23, com os menores valores atribuídos às ZTEs Fo-Fe, algumas S-Fo e poucas S-Fe, de forma semelhante ao observado à sazonalidade (Figuras 8B, C). A maior parte das ZTEs S-Fe estão embebedas em locais em que há maior CV e maior heterogeneidade. Mesmo com um padrão parecido ao descrito na sazonalidade (Figura 8B), a relação polinomial entre IH e CV sugere que conforme a variabilidade interanual aumenta, a heterogeneidade tende a diminuir (para $CV > 0,2$, ou seja, 20% de variabilidade em relação à média), o que faz sentido se pensarmos que uma variação interanual alta implicaria em uma cobertura predominantemente mais aberta que consiga prosperar em condições intermitentes de chuvas acumuladas anualmente. Este resultado estende a expectativa de um modelo linear simples para representar a relação entre a heterogeneidade e a variabilidade interanual, previamente sugerida (seção 2.3.1).

3.2.1.2 *Heterogeneidade a partir da cobertura vegetal e regressões linear e polinomial*

A Figura 9 mostra os melhores modelos de regressão que representam a relação entre SD e IQR e as variáveis associadas ao regime de chuvas. Assim como para o IH, nota-se uma forte relação polinomial entre a heterogeneidade SD ($R^2 = 0,53$; $p < 0,05$) e IQR ($R^2 = 0,34$; $p < 0,05$) e total acumulado de chuvas MAP (Figura 9A, 9B). A relação do SD com a sazonalidade (MSI) é representada por uma relação linear positiva ($R^2 = 0,15$; $p < 0,05$) (Figura 9C). Já o IQR não teve nenhuma relação estatisticamente significativa (Figura 9D). Quanto a variabilidade interanual tanto o SD ($R^2=0,30$; $p < 0,05$) como o IQR ($R^2=0,28$; $p < 0,05$) foram significativos. Porém em relação aos tipos de transições somente S/Fo foi significativo e teve uma relação alta com CV ($R^2= >75$; $p < 0,05$).

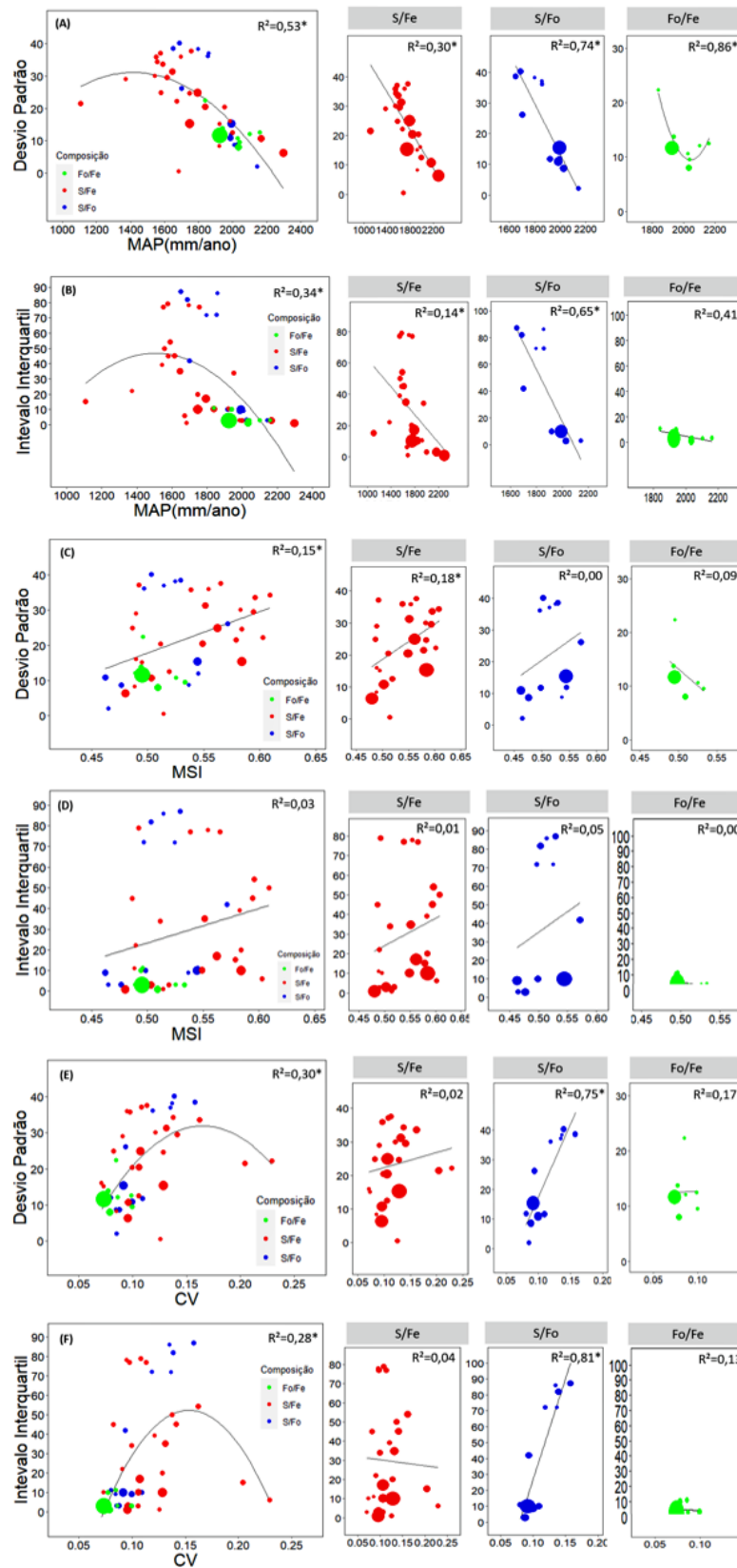


Figura 9: Regressões linear e polinomial dos regimes de precipitação com as métricas SD e IQR; em que as ZTEs estão representadas pelos pontos, cujos tamanho e cor referem-se respectivamente à área e aos tipos de transições; A) Regressão polinomial da MAP em relação

ao SD; B) Regressão linear das transições S/Fe e S/Fo e polinomial da Fo/Fe, da MAP em relação ao SD; C) Regressão polinomial da MAP em relação ao IQR; D) Regressão linear das transições S/Fe, S/Fo e Fo/Fe da MAP em relação ao IQR.

A relação dos dados para SD e IQR para analisar a heterogeneidade da cobertura arbórea, com as variáveis associadas ao regime de chuvas apresentam-se em sua maioria semelhantes ao IH que foi desenvolvido a partir da cobertura do uso da terra do MapBiomias. Desta forma refletem as mesmas conclusões feitas no tópico anterior. A única diferença é que IH e SD em relação ao MSI foram estatisticamente significativas e o IQR não foi. Mas isto parece não interferir nos resultados já que ambas as relações são relativamente baixas, e sugerem que a sazonalidade não é um fator determinante. Assim as ZTEs com maior heterogeneidade da cobertura arbórea, ou seja, os ecótonos estão localizados em valores intermediário de MAP e de CV e que este aumenta com o aumento da sazonalidade, porém essa relação é relativamente baixa (Figuras 8 e 9). Desta forma como as análises tiveram resultados semelhantes fornecem maior consistência para responder essa investigação.

4 DISCUSSÃO

No presente trabalho, investigaram-se duas questões principais: a primeira abordando a caracterização de zonas de tensão ecológicas (ZTEs), definidas a partir de uma perspectiva geográfica pelo IBGE, como ecótonos, do ponto de vista estrutural (i.e., cobertura de árvores representando o fechamento do dossel); e a segunda, avaliando as relações entre a distribuição das ZTEs e os regimes de chuva ao longo da fronteira geográfica NE-SW entre os biomas Amazônia e Cerrado.

Para o primeiro objetivo específico, os resultados mostraram que 87% das ZTEs representam ecótonos do ponto de vista da estrutura de tipos de vegetação (e.g., florestas e savanas). Ou seja, possuem mais de um tipo de vegetação, o que pode representar o complexo mosaico de fitofisionomias savânicas e florestais descrito na literatura (ZORTEA, 2018; HAIDAR, 2013; MARIMON *et al.*, 2014; KUNZ *et al.* 2009; IVANAUSKAS, 2008; MARIMON *et al.*, 2006; RATTER, 1992; HANSEN; DI CASTRI, 1992), além de uma grande heterogeneidade florística (Bueno *et al.*, 2018). Esses resultados concordam com a presença de um complexo ecotonal, ao longo da fronteira geográfica Amazônia-Cerrado definida pelo IBGE (Marques *et al.*, 2019; SILVA JR. *et al.*, 2019), que abranja uma faixa muito mais ampla, complexa e sinuosa do que representado no mapeamento oficial.

Trabalhos iniciais que sugerem que florestas e savanas são estados estáveis de equilíbrio do sistema vegetação-clima utilizam os mesmos dados de cobertura arbórea (%CA) e o procedimento *flexmix* para representar os dois tipos de vegetação (HIROTA *et al.*, 2011; STAVER *et al.*, 2011) utilizados neste trabalho. A existência de estados alternativos implica que para um mesmo intervalo de condições externas (e.g., MAP entre 1.000 e 2.500 mm/ano) tanto florestas quanto savanas podem dominar o ambiente; e ainda que a dinâmica de transição entre florestas e savanas ocorre de forma abrupta ou catastrófica. No entanto, os resultados deste trabalho e de anteriores identificam, em determinadas regiões, características de uma zona ecotonal, o que sugere uma transição mais gradual entre os biomas Amazônia e Cerrado. Em particular, neste trabalho, isso pode ser observado através do aumento da heterogeneidade no intervalo de MAP entre 1.500 e 1.800 mm/ano, e declínio para MAP mais baixos e altos (Figuras 7 e 8, especialmente para ZTEs S-Fe). Desta maneira, em escalas mais finas, sugere-se que a dinâmica de transição entre florestas e savanas pode ser tanto gradual quanto abrupta, dependendo dos fatores ambientais de escalas mais fina (e.g., nutrientes no solo – RATTER, 1972; LLOYD; VEENENDAAL, 2016) e perturbações (e.g., incêndios – STAVER *et al.*, 2011).

Para a segunda hipótese, investigou-se como a heterogeneidade desses ecótonos distribui-se ao longo de um gradiente de regimes de precipitação. Tal heterogeneidade aparentemente não pode ser explicada pela sazonalidade, mas sim pelos MAP e CV com os quais teve uma maior correlação e consistência entre os índices utilizados. Essa correlação com o MAP foi recentemente demonstrada por vários autores, considerando a precipitação anual como o principal controle da distribuição relativa da cobertura vegetal de floresta tropical e savana (HIROTA *et al.*, 2011; STAVER *et al.*, 2011) e regionalmente (ALEMAN *et al.*, 2020; ALEMAN; STAVER, 2018; WUYTS *et al.*, 2018; SANKARAN *et al.*, 2005; MALHI; WRIGHT, 2004).

O CV também prediz a heterogeneidade e pode fazer parte do mecanismo compensador de resiliência sugerido por Ciemer *et al.* (2019). De fato, em teoria, a heterogeneidade aumenta a resiliência e deixa as transições mais graduais no espaço e no tempo, uma vez que mudanças de estado ocorrem fora de fase para cada local (VAN NES; SCHEFFER, 2005). Neste contexto, os ecótonos poderiam ser comparados a “links móveis” em uma abordagem trazida por Lundberg e Moberg (2003). Os “links móveis” são organismos que suportam funções essenciais ao conectar áreas entre si e contribuem para a resiliência do ecossistema (Holling 1973). Fornecem isso através de memória ecológica (e.g., recursos genéticos) ou seja, são fontes de

reorganização após perturbações. Isso é proveniente da troca interespaçial desses organismos que vivem entre habitats e ecossistemas, e suportam funções essenciais ao conectar áreas entre si (Lundberg e Moberg 2003). Assim os organismos que habitam essas zonas de transições por estarem em um ambiente que sofre intensa pressão, conseqüentemente sofrem uma seleção genética de espécies menos especializadas, que tendem a sobreviver mais facilmente e podem se modificar sob efeito dessas novas condições (BUENO *et al.*, 2018; WUYTS *et al.*, 2018); ou seja, a heterogeneidade destes locais possibilita um conjunto mais diversificado de estratégias e métodos para lidar e se adaptar às mudanças (KARK *et al.*, 2007. RISSER, 1995).

Fazendo a conexão com uma série de estudos de campo, podem-se encontrar algumas interpretações para os nossos resultados em relação aos tipos de transição. Uma explicação para a maior amplitude das transições que tem presença de floresta estacional é que estas são compostas por espécies mais generalistas, pois ocorrem tanto em estruturas savânicas quanto florestais, ao longo de um gradiente e variabilidade de chuvas, permitindo uma distribuição geográfica descontínua em resposta às flutuações climáticas (ESQUIVEL-MUELBERT *et al.*, 2017; KUNZ, 2009; OLIVEIRA-FILHO; RATTER, 1995). Por outro lado, florestas ombrófilas são mais sensíveis em relação ao estresse hídrico, ficando mais restrita a locais mais úmidos (ESQUIVEL-MUELBERT *et al.*, 2017; IBGE, 2012). Isso pode explicar a restrição da maioria das ZTEs compostas por floresta ombrófila ocorrerem em áreas de maior precipitação ($MAP > 1.800$ mm/ano). Curiosamente, algumas das ZTEs S-Fo, quando mais heterogêneas, também ocorrem no intervalo intermediário e têm uma relação alta com CV ($R^2 > 0,70$).

Uma questão científica que vem ganhando importância fundamental nos últimos anos é a avaliação dos chamados “tipping points” ou pontos de inflexão do sistema terrestre (LENTON *et al.*, 2008), além da perda “progressiva” de resiliência dos ecossistemas. Neste sentido, os ecótonos podem ser potenciais áreas de estudos para identificar e entender como e por que a heterogeneidade pode aumentar a resiliência, ou seja a capacidade de sustentar e persistir no tempo (HOLLING, 1973). No entanto, esses ecótonos já estão sofrendo intensa pressão antrópica e estão localizados justamente no arco do desmatamento (Tabela 2; DAVIDSON *et al.*, 2012). Neste sentido, os resultados deste trabalho unem-se ao coro de investimento científico em melhor caracterizar regiões ecotonais para aprofundar o conhecimento dos mecanismos que dirigem a resiliência, especialmente em locais em que a vegetação é mais heterogênea.

5 CONCLUSÃO

Nossos resultados mostram que há presença de ecótonos nessas zonas de transição Amazônia-Cerrado, a partir da quantificação de suas características estruturais básicas (e.g., fechamento do dossel). Desta forma tais ZTEs não podem ser definidas por uma simples e bem delimitada linha, mas sim por uma complexa faixa de transição. Também mostramos que a heterogeneidade desses ecótonos aparentemente pode ser explicada pelos regimes de chuvas principalmente pelos MAP e CV com os quais teve uma maior correlação e consistência entre os índices utilizados. Esses dados reforçam que essas transições ocorrem de forma gradual e que em teoria funciona como mecanismo compensador de resiliência. Assim a complexidade dos limites entre os biomas floresta tropical e cerrado têm sido mal interpretados e mal representados pelos mapas atuais, podendo levar a várias complicações para os esforços de conservação e à perda de informações, devido à falta de áreas protegidas, mapeamento adequado e legislação específica. Com aumento acelerado das mudanças climáticas globais e avanço do desmatamento torna-se importante conhecer e quantificar os processos relacionados a esses ecótonos presentes nessas transições. Assim nossos resultados fornecem importantes informações para formulações de estratégias ambientais e científicas. Podem auxiliar os órgãos públicos competentes a desenvolver técnicas para caracterizar ecótonos utilizando tanto técnicas de sensoriamento remoto como pesquisas em campo (e.g. levantamento florístico), fornecendo uma direção inicial para coleta de dados. Essa caracterização das ZTEs como ecótonos é muito importante pois pode auxiliar na avaliação e quantificação da dinâmica temporal e espacial destas regiões, e conseqüentemente, do potencial de mudanças futuras. Como não avaliamos esses ecótonos no tempo mais estudos seriam necessários através desses mosaicos de floresta-savana para estabelecer sob que circunstâncias padrões semelhantes encontrados seriam de extrema importância para reforçar a importância dessas áreas.

6 REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. Bases para o estudo dos ecossistemas da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, v. 16, p. 7-30, 2002.

ALATALO, J. M., JÄGERBRAND, A. K., MOLAU, U. Impacts of different climate change regimes and extreme climatic events on an alpine meadow community. **Sci Rep. Nature Publishing Group**, v.6, p.1-12, 2016.

ALEMAN, J. C., FAYOLLE, A., FAVIER, C., STAYER, A. C., DEXTER, K. G., RYAN, C. M., AZIHOU, A. F., BAUMAN, D., TE BEEST, M., CHIDUMAYO, E. N., CROMSIGT, J. P. G. M., DESSARD, H., DOUCET, J-L, FINCKH, M., GILLET, J-F., GOURLET-FLEURY, S., HEMPSON, G. P., HOLDO, R. M., KIRUNDA, B., KOUAME, F. N., MAHY, G., MAIATO, F., GONÇALVES, P., MCNICOL, I., NIETO QUINTANO, P., PLUMPTRE, A. J., PRITCHARD, R. C., REVERMANN, R., SCHMITT, C.B., SWEMMER, A. M., TALILA, H., WOOLLEN, E., SWAINE, M. D. Floristic evidence for alternative biome states in tropical Africa. **Proc. Natl. Acad. Sci.**, v.117, n. 45, p. 28183-28190, 2020.

ALEMAN, J. C., STAYER, A. C. Spatial patterns in the global distributions of savanna and forest. **Glob. Ecol. Biogeogr.**, v. 27, p. 792–803, 2018.

ALENCAR, A. Z., SHIMBO, J., LENTI, F., BALZANI MARQUES, C., ZIMBRES, B., ROSA, M., ARRUDA, V., CASTRO, I., FERNANDES MÁRCICO RIBEIRO, J.P., VARELA, V., ALENCAR, I., PIONTEKOWSKI, V., RIBEIRO, V., M. C. BUSTAMANTE, M., EYJISANO, E., BARROSO, M. Mapping Three Decades of Changes in the Brazilian Savanna Native Vegetation Using Landsat Data Processed in the Google Earth Engine Platform. **Remote Sensing**, v.12, p.1-23 2020.

ALENCAR, A. A., BRANDO, P. M., ASNER, G. P., & PUTZ, F. E. Landscape fragmentation, severe drought, and the new Amazon forest fire regime. **Ecological Applications**, v.25, n.6, p.1493–1505, 2015.

ALISSON, E. "Mudanças no clima do Brasil até 2100". *Agência Fapesp*, 10/09/2013

ALLEN CD, MACALADY AK, CHENCHOUNI H, BACHELET D, MCDOWELL N, VENNETIER M, KITZBERGER T., RIGLING, A., BRESHEARS, D. D., HOGG, E.H., GONZALEZ, P., FENSHAM, R., ZHANG, Z., CASTRO, J., DEMIDOVA, N., LIM, J. H., ALLARD, G., RUNNING, S. W, SEMERCI, A., COBB, N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. **Forest Ecology and Management**, v.259, p.660–684, 2010.

ALLEN, D. J., ORT, D. R. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. **Trends Plant Science**, v. 6, n.1, p.36-42, 2001.

ALLEN, C. D.; BRESHEARS, D. D. Drought-induced shift of a forest–woodland ecotone: Rapid landscape response to climate variation. **PNAS**, v.95, n.25, p.14839-14842, 1998.

AMETSITSI, G.K.D., VAN LANGEVELDE, F., LOGAH, V., JANSSEN, T., MEDINA-VEJA, J.A., ISSIFU, H., OLLIVIER, L., DEN HARTOGH, K., ADJEI-GYAPONG, T., ADU-BREDU, S., LLOYD, J., VEENENDAAL, E. M. Fixed or mixed? Variation in tree functional types and vegetation structure in a forest-savanna ecotone in West Africa. **Journal of Tropical Ecology**. p. 1-18, 2020.

ANDERSON, L.O., NETO,G.R., CUNHA, A.P., FONSECA,M.G., MOURA,Y.M., DALAGNOL, R.,WAGNER, F.H., ARAGÃO, L.E.O. Vulnerability of Amazonian forests to

repeated droughts **The royal society publishing**, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0411>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2019.

ARAGÃO, L. E. O. C., MALHI, Y., ROMAN-CUESTA, R. M., SAATCHI, S., ANDERSON, L. O., & SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v.34, p.1–5, 2007.

BARROS, C., THUILLER, W., MÜNKEMÜLLER, T. Drought effects on the stability of forest grassland ecotones under gradual climate Change. **PLOS One**, p. 1-18, 2018.

BATTISTI, I. D. E. **Comparação entre modelos de regressão com uma aplicação em biometria florestal**. 2001. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras. Lavras, p.96. 2001.

BLAND, J. M., ALTMAN, D. G. Measurement Error. **BMJ**, v 312, 1996.

BIVAND, R., LEWIN-KOH, N. (2020). **maptools: tools for handling spatial objects**. <https://CRAN.R-project.org/package=maptools>, R package version 1.0-1.

BIVAND, R., KEITT, T., ROWLINGSON, B., PEBESMA, E., SUMNER, M., HIJMANS, R., ROUAULT, E., WARMERDAM, F., OOMS, J., RUNDEL, C. (2019). **rgdal: Bindings for the “Geospatial” Data Abstraction Library**. <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>, R package version 1.4-7.

BUENO, M. L., DEXTER, K. G., PENNINGTON, R. T., PONTARA, V., NEVES, D. M., RATTER, A., OLIVEIRA-FILHO, A. T. The environmental triangle of the Cerrado domain: ecological factors driving shifts in tree species composition between forests and savanas. **Journal of Ecology**, p.1-32, 2018.

BURKE, A., FISHEL, S., MITCHELL, A., DALBY, S., LEVINE, D. J. Planet Politics: A Manifesto from the End of IR. **Millennium**, v.44, n.3, p.499-523, 2016.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica** 5.ed. São Paulo: Saraiva, 2004. 526p.

CIEMER, C., BOERS, N., HIROTA, M., KURTHS, J., MÜLLER-HANSEN, F., OLIVEIRA, R. S., WINKELMANN, R. Higher resilience to climatic disturbances in tropical vegetation exposed to more variable rainfall. **Nature Geoscience**, p.1-7, 2019.

CLEMENTS, F.E. Research methods in Ecology. Nebraska: University Publishing Co. p. 512, 1905.

CLEMENTS, F.E. 1949. **Dynamics of Vegetation**. New York, The H.W. Wilson Co.

COUTINHO, L. M. Biomas brasileiros. São Paulo: **Oficina de textos**, p.128. 2016.

DAVIDSON, E., DE ARAÚJO, A., ARTAXO, P. *et al.* The Amazon basin in transition. **Nature**, v.481, p.321–328, 2012.

DESJARDINS, T., FILHO, A.C., MARIOTTI, A., GIRARDIN, C. Changes of the Forest-savanna boundary in Brazilian Amazônia during the Holocene as revealed by soil organic carbon isotope ratios. **Oecologia**, v.108, p.749-756, 1996.

DZUREC, R. S., BOUTTON, T. W., CALDWELL, M. M., SMITH, B. N. Carbon isotope ratios of soil organic matter and their use in assessing community composition change in Curlew Valley, Utah. **Oecologia**, v. 66, p.17-24, 1985.

ENDERS, C. K. **Applied missing data analysis**. New York: Guilford, 2010.

ESQUIVEL-MUELBERT, A., BAKER, T. R., DEXTER, K. G., LEWIS, S.L., STEEGE, H., LOPEZ-GONZALEZ, G., MONTEAGUDO MENDOZA, A., BRIENEN, R., FELDPAUSCH, T.R., PITMAN, N., ALONSO, A., VAN DER HEIJDEN, G., PEÑA-CLAROS, M., AHUITE, M., ALEXIAIDES, M., ÁLVAREZ DÁVILA, E., MURAKAMI, A. A., ARROYO, L., AULESTIA, M., BALSLEV, H., BARROSO, J., BOOT, R., CANO, A., CHAMA MOSCOSO, V., COMISKEY, J. A., CORNEJO, F., DALLMEIER, F., DALY, D. C., DÁVILA, N., DUIVENVOORDEN, J. F., DUQUE MONTOYA, A. J., ERWIN, T., DI FIORE, A., FREDERICKSEN, T., FUENTES, A., GARCÍA-VILLACORTA, R., GONZALES, T., GUEVARA ANDINO, J. E., HONORIO CORONADO, E. N., HUAMANTUPACHUQUIMACO, I., KILLEEN, T. J., MALHI, Y., MENDOZA, C., MOGOLLÓN, H., JØRGENSEN, P. M., MONTERO, J. C., MOSTACEDO, B., NAURAY, W., NEILL, D., VARGAS, P. N., PALACIOS, S., PALACIOS CUENCA, W., PALLQUI CAMACHO, N. C., PEACOCK, J., PHILLIPS, J. F., PICKAVANCE, G., QUESADA, C. A., RAMÍREZ-ANGULO, H., RESTREPO, Z., REYNEL RODRIGUEZ, C., PAREDES, M. R., SIERRA, R., SILVEIRA, M., STEVENSON, P., STROPP, J., TERBORGH, J., TIRADO, M., TOLEDO, M., TORRES-LEZAMA, A., UMAÑA, M. N., URREGO, L. E., VASQUEZ MARTINEZ, R., GAMARRA, L. V., VELA, C. I. A., VILANOVA TORRE, E., VOS, V., VON HILDEBRAND, P., VRIESENDORP, C., WANG, O., YOUNG, K. R., ZARTMAN, C. E., PHILLIPS, O. L. 'Seasonal drought limits tree species across the Neotropics', **Ecography**, v. 40, n. 5, p. 618-629, 2017.

FISICHELLI, N. A., FRELICH, L. E., REICH, P. B. Climate and interrelated tree regeneration drivers in mixed temperate–boreal forests. **Landsc Ecol**, v.28, p.149–159, 2013.

FLORES, B.M., STAAL, A., JAKOVAC, C. C., HIROTA, M., HOLMGREN, M., OLIVEIRA, R. S. Soil erosion as a resilience drain in disturbed tropical forests. **Plant Soil**, v.450, p.11–27, 2020.

FRALEY, C., RAFTERY, A. E. MCLUST: Software for Model-Based Cluster Analysis. **Journal of Classification**, v.16, p.297–306, 1999.

FREITAS, H. A., PESSENDA, L.C.R., ARAVENA, R., GOUVEIA, S.E.M., RIBEIRO, A. S., BOULET, R. Late Quaternary vegetation dynamics in the Southern Amazon Basin inferred from carbon isotopes in soil organic matter. **Quaternary Research**, v.55, p.39- 46, 2001.

FORTIN, M. J., R. OLSON, J., FERSON, S., IVERSON, L., HUNSAKER, C., EDWARDS, G., LEVINE, D., BUTERA, K., KLEMAS, V. Issues related to the detection of boundaries. **Landscape Ecology**, v. 15, n. 5, p. 453–466, 2000.

FUNK, C. e colab. **The climate hazards infrared precipitation with stations — a new environmental record for monitoring extremes**. p. 1–21, 2015.

GLOOR, M., BRIENEN, R. J. W., GALBRAITH, D., FELDPAUSCH, T. R., SCHÖNGART, J., GUYOT, J. L., PHILLIPS, O. L. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. **Geophysical Research Letters**, v.40, p.1729-1733, 2013.

GRABHERR, G., GOTTFRIED, M., PAULI, H. Long term monitoring of mountain peaks in the Alps. In: Burga, C. & Kratochwil, A. (eds.) **Biomonitoring: general and applied aspects on regional and global scales**. Kluwer, Dordrecht, N.L, 2001.

GRAVES, R.; WANG, D.; HOGAN, C. M. 2010. "**Ecotone**." In: Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). Encyclopedia of Earth, 2010.

GRÜN, B., LEISCH, F., SARKAR, D., MORTIER, F., PICARD, N.(2019) *Flexmix* for R. <https://cran.r-project.org/web/packages/flexmix/flexmix.pdf>, R package version 2.3-17.

GRÜN, B., LEISCH, F. Complement: Finite Mixture Model Diagnostics Using Resampling Methods. **Semantic Scholar**, 2012. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/843f/a203e9bf3cf921456659df3470f7bf861d1e.pdf>>. Acesso em: 01 de outubro de 2020.

GRÜN, B., LEISCH, F. FlexMix: An R package for finite mixture modelling. **R News**, .7, n.1, p.8-13, 2007.

GOLDBLUM, D.; RIGG, L. S. Tree growth response to climate change at the deciduous-boreal forest ecotone, Ontario, Canada. **Can J For Res.** v. 35, p. 2709–2718, 2005.

GOTTFRIED M., PAULI H. & GRABHERR G. Prediction of vegetation patterns at the limits of plant life: A new view of the alpine-nival ecotone. **Arctic and Alpine Research**, v.30, p.207-221, 1998.

GOUVEIA, S.E.M., PESSENDA, L.C.R., ARAVENA, R., BOULET, R., ROVERATTI, R., GOMES, B.M. Dinâmica de vegetações durante o Quaternário recente no sul do Amazonas indicada pelos isótopos do carbono (^{12}C , ^{13}C e ^{14}C). **Geochimica Brasiliensis**, v.11, n.3, p.355-367, 1997.

Haidar, R. F., Fagg, J.M.F., Pinto, J.R.R., Dias, R.R., Damasco, G., Silva, L.C.R., Fagg, C.W., Florestas estacionais e áreas de ecótono no estado do Tocantins, Brasil: parâmetros estruturais, classificação das fitofisionomias florestais e subsídios para conservação. **Acta Amaz.**, v.43, n.3, 2013.

Hansen, C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, S., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O., Townshend, J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. **Science**.v.342, 2013.

Hansen, M. C., Defries, R. S. Detecting Long-term Global Forest Change Using Continuous Fields of Tree-Cover Maps from 8-km Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Data for the Years 1982–99. **Ecosystems**, v.7, p.695–716, 2004.

Hansen, A.; Castri, F. **Landscape boundaries: consequences for biotic diversity and ecological flows - Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows**. Springer-Verlag, New York, USA. p.438. 1992.

Hewitt, G.M. Post-glacial re-colonization of European biota. **Biological Journal of the Linnean Society**, v.68, p.87-112, 1999.

Hennenberg, K. J. Goetze, D., Kouamé, L., Orthmann, B., Porembski, S. Border and ecotone detection by vegetation composition along forest-savanna transects in Ivory Coast. **Journal of Vegetation Science**, v. 16, n. 3, p. 301–310, 2005.

HIJMANS, R.J., VAN ETTEN, J., SUMNER, M., CHENG, J., BEVAN, A., BIVAND, R., Busetto, L., CANTY, M., FORREST, D., GHOSH, A., GOLICHER, D., GRAY, J., GREENBERG, J.A., HIEMSTRA, P., HINGEE, K., GEOSCIENCES, I. FOR M.A, KARNEY, C., MATTIUZZI, M., MOSHER, S., NOWOSAD, J., PEBESMA, E., LAMIGUEIRO, O.P., RACINE, E.B., ROWLINGSON, B., SHORTRIDGE, A., VENABLES, B., WUEEST, R. (2020). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>, R package version 3.0-7

HIROTA, M., HOLMGREN, M., VAN NES, E. H., AND SCHEFFER, M. Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions. **Science**, v.334, p.232–235, 2011.

HOLLING, C. S. Resilience and stability of ecological systems. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v.4, p.1–23, 1973.

HUFKENS, K., SCHEUNDERS, P., CEULEMANS, R. Ecotones in vegetation ecology: Methodologies and definitions revisited. **Ecological Research**, v. 24, n. 5, p. 977–986, 2009.

IBGE (2019) **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística** – Área territorial brasileira. <http://www.ibge.gov.br/>. Accessed 10 de janeiro 2019.

IBGE(2012). **Manual Técnico da Vegetação Brasileira: Sistema fitogeográfico Inventário das formações florestais e campestres Técnicas e manejo de coleções botânicas Procedimentos para mapeamentos**. Rio de Janeiro, 2012. (2Ed.). Disponível em: < <https://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/pdf/manual-tecnico-da-vegetacao-brasileira.pdf> >. Acesso em: 22 de outubro de 2020.

INFOPEDIA. Portugal, c2003 **Dicionário Porto Editora**. Disponível em: <https://www.infopedia.pt/>>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2021.

IRL, S. D. H. Plant diversity on high elevation islands – drivers of species richness and endemismo. **Frontiers of biogeography**, v. 8, n.3, p.1-8, 2016.

IVANAUSKAS, N., MONTEIRO, R., RODRIGUES, R. Classificação fitogeográfica das florestas do Alto Rio Xingu Phytogeographical classification of the Upper Xingu River forest. **Acta Amazônica**, v.387, p. 387-402, 2008.

JAGANNATHAN, P ARLÉRY, R., KATE, H. T., ZAVARINA, M. V. A note on climatological normals. **Secrétariat of the World Meteorological Organization - Geneva – Switzerland** v. WMO-N.208, n. 84, p.36. 1967.

KARK, S., ALLNUTT, T. F., LEVIN, N., MANNE, L. L., WILLIAMS, P. H. The role of transitional areas as avian biodiversity centres. **Global Ecology and Biogeography**, v.16, p.187–196, 2007.

KARK, S., VAN RENSBURG, B. J. Ecotones: Marginal or central areas of transition? **Israel Journal of Ecology & Evolution**, v. 52, p. 29–53, 2006.

KENT, M., GILL, W.J., WEAVER, R., ARMITAGE, R. P. Landscape and plant community boundaries in biogeography. **Prog Phys Geogr**, v. 21, p.315–353, 1997.

KUNZ, S. H., et al. Análise da similaridade florística entre florestas do Alto Rio Xingu, da Bacia Amazônica e do Planalto Central. **Brazilian Journal of Botany**, v. 32, n. 4, p.725-736, 2009.

LAVOREL, S., GRIGULIS, K., LAMARQUE, P. P., COLACE, M. P., GARDEN, D., GIREL, J., ET AL. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services. **J Ecol.**, v.99, p.135–147, 2011.

LUNDBERG, J., MOBERG, F. Mobile link organisms and ecosystem functioning: implications for ecosystem resilience and management. **Ecosystems**, v.6, p.87–98, 2003.

IPBES. RICE, J., SEIXAS, C.S., ZACCAGNINI, M. E., BEDOYA-GAITÁN, M., VALDERRAMA, N. (eds). The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for the Americas. **Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services**, Bonn, Germany. p.656, 2018.

IPCC, 2019. Relatório Especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Disponível em: < <https://www.ipcc.ch/> >. Acesso em: 22 de outubro de 2020.

LEISCH, F. “*FlexMix*: A General Framework for Finite Mixture Models and Latent Class Regression in R.” **Journal of Statistical Software**, v.11, n.8, p.1–18, 2004.

LENTON, T. M., HELD, H., KRIEGLER, E., HALL, JIM W., LUCHT, W., RAHMSTORF, S., SCHELLNHUBER, H. J. Tipping elements in the Earth's climate system **PNAS**, v.105, n.6, p.1786-1793, 2008.

LLOYD, J. VEENENDAAL, E. Are fire mediated feedbacks burning out of control? **Biogeosciences Discussions**, p. 1-20, 2016.

MARQUES, E. Q., MARIMON-JUNIOR, B. H., MARIMON, B. S., MATRICARDI, E. A. T., MEWS, H. A., COLLI, G. R. Redefining the Cerrado–Amazonia transition: implications for conservation. **Springer Nature**, p.1-17, 2019.

MCLACHLAN, G. J. PEEL, D. **Finite Mixture Models**. Wiley, 2000.

MALHI Y, ROBERTS, T., BETTS, R. A., KILLEEN, T. J., LI, W., NOBRE, C. A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v.319, p.169–172, 2008.

MALHI, Y., WRIGHT, J. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. B**, v.359, p.311–329, 2004.

MARACAHIPES-SANTOS, L., SANTOS, J.O., LENZA, E. Temporal changes in species composition, diversity, and woody vegetation structure of savannas in the Cerrado-Amazon transition zone. **Acta Botanica Brasílica**, v.32, n.2, p.254-263, 2018. DOI: 10.1590/0102-33062017abb0316

MARENCO, J.A., ALVES, L.M., SOARES, W.R., RODRIGUEZ, D.A., CAMARGO, H., PAREDES RIVEROS, M., DIAZ PABLÓ, A. Two contrasting seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 26, n. 22, p. 9137-9154, 2013.

MARIMON, B. S., MARIMON-JUNIOR, B. H., FELDPAUSCH, T. R., SANTOS, C. O., MEWS, H. A., LOPEZ-GONZALEZ, G., LLOYD, J., FRANCAZAK, D. D., OLIVEIRA, E. A., MARACAHIPES, L., MIGUEL, A., LENZA, E., PHILLIPS, O. L. Disequilibrium and hyperdynamic tree turnover at the forest–cerrado transition zone in southern Amazonia. **Plant Ecology & Diversity**, v.7, p. 281-292, 2014.

MARIMON, B. S., LIMA, E. S., DUARTE, T. G., CHIEREGATTO, L.C., RATTER, J. A. Observations on the vegetation of northeastern Mato Grosso, Brazil. IV. An analysis of the Cerrado-Amazonian Forest ecotone. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 63, p. 323-341, 2006.

MARKHAM, C. G. Seasonality of precipitation in the United States. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 60, p.593 – 597, 1970.

MARQUES, E. Q., MARIMON-JUNIOR, B. H., MARIMON, B. S., MATRICARDI, E. A. T., MEWS, H. A., COLLI, G. R. Redefining the Cerrado–Amazonia transition: implications for conservation. **Springer Nature**, p.1-17, 2019.

MILAN, E.; MORO, R. S. O conceito biogeográfico de ecótono. **Terra Plural**, v. 10, n. 1, p. 75–88, 2016.

NAIMAN, R.J., DECAMPS, H. The ecology of interfaces: riparian zones. **Annu Rev Ecol Syst**, v. 28, p. 621–658, 1997.

NEIFF, J.J. Planícies de inundação são ecótonos? In: HENRY, R. (Org.). Ecótonos nas interfaces dos ecossistemas aquáticos. **São Carlos: RiMa.**, p. 29-45,2003.

NOBRE, C. A., SELLERS, P. J., SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **J. Climate**, v. 4, 957–988, 1991.

NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI) hosts and provides public access to one of the most significant archives for environmental data on Earth. **NOAA**, 2015. Disponível em: < <https://www.ncdc.noaa.gov/news/defining-climate-normals-new-ways>>. Acesso em: 10 de novembro de 2019.

ODUM, E. P., BARRETT, G. W. **Fundamentos de ecologia**. São Paulo: Ed. Cengage Learning, 2008, 612p.

OLIVERAS, I., MALHI, Y. Many shades of green: the dynamic tropical forest–savannah transition zones. **Philosophical Transactions**, p.1-15, 2016.

OLIVEIRA-FILHO, A., RATTER, J. A. A study of the origin of central Brazilian forests by the analysis of plant species distribution patterns. **Edinburgh Journal of Botany**, v.52, p.141 – 194, 1995.

PARMESAN, C., GAINES, S., GONZALEZ, L., KAUFMAN, D. M., KINGSOLVER, J., PETERSON, A. T., SAGARIN, R. Empirical perspectives on species borders: from traditional biogeography to global change. **Oikos**, v.108, p.58–75, 2005.

PAULI, H., GOTTFRIED M. & GRABHERR G. Vascular plant distribution patterns at the low-temperature limits of plant life - the alpine-nival ecotone of Mount Schrankogel (Tyrol, Austria). **Phytocoenologia**, p. 297 – 325, 1999.

PEBESMA, E., BIVAND, R., ROWLINGSON, B., GOMEZ-RUBIO, V., HIJMANS, R., SUMNER, M., MACQUEEN, D., LEMON, J., LINDGREN, F., O'BRIEN, J., TAPIADOR, F.J., TURK, F.J., PETERSEN, W., HOU, A.Y., GARCÍA-ORTEGA, E., MACHADO, L.A.T., ANGELIS, C.F., SALIO, P., KIDD, C., HUFFMAN, G.J., DE O'ROURKE, J. (2021). sp: Classes and Methods for Spatial Data. <https://cran.r-project.org/web/packages/sp/sp.pdf>, R package version 1.4-5

PESSENDA, L.C.R., GOUVEIA, S.E.M., RAMONARAVENA, B. M., GOMES, R. B., RIBEIROS, A.S. Dating and Stable Carbon Isotopes of Soil Organic Matter in Forest-Savanna Boundary Areas in the Southern Brazilian Amazon Region. Proceedings of the 16th International ¹⁴C Conference, edited by W. G. **Mook and J. van der Plicht** *Adiocarbon*, v.40, n. 2, p. 1013-1022, 1998.

PIERCE, D. (2019) <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4> , R package version 1.17.

PITELKA, L. F. Plant Migration and Climate Change: A more realistic portrait of plant migration is essential to predicting biological responses to global warming in a world drastically altered by human activity. *American Scientist*, v. 85, n. 5, p. 464-473, 1997.

RATTER, J.A., 1992. **Transitions between cerrado and forest vegetation in Brazil**. In: Furley et al. (Eds.), *Nature and Dynamics of Forest Savanna Boundaries*. Chapman & Hall, London, p. 417–429.

RATTER, J. A., RICHARDS, P. W., ARGENT, G., GIFFORD, D. R. Observations on the vegetation of northeastern Mato Grosso – The wood vegetation types of the Xavantina – Cachimbo Expedition Area. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, v.226, p.229-492, 1973.

R Core Team (2018). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

REICH, P. B., SENDALL, K. M., RICE, K., RICH, R. L., STEFANSKI, A., HOBBIE, S. E., MONTGOMERY, R. A. Geographic range predicts photosynthetic and growth response to warming in co-occurring tree species. **Nat Publ Group**, v.5, p.148–152, 2015.

RISSER, P. G. The Status of the Science Examining Ecotones. **BioScience**, v. 45, n.5, p. 318–325, 1995.

ROITMAN, I., BUSTAMANTE, M.M.C., HAIDAR, R.F., SHIMBO, J.Z., ABDALA, G.C., EITEN, G., FAGG, C.W., FELFILI, M.C., FELFILI, J.M., JACOBSON, T.K.B., *et al.*, Optimizing biomass estimates of savanna woodland at different spatial scales in the Brazilian Cerrado: Re-evaluating allometric equations and environmental influences. **PLoS ONE**, v.13, 2018.

SANKARAN, M., HANAN, N., SCHOLLES, R., RATNAM, J., AUGUSTINE, D., CADE, B., GIGNOUX, J., HIGGINS, S., ROUX, X., LUDWIG, F., ARDÖ, J., BANYIKWA, F., BRONN, A., BUCINI, G., CAYLOR, K., COUGHENOUR, M., DIOUF, A., EKAYA, W., FERAL, C., ZAMBATIS, N. Determinants of woody cover in African savannas. **Nature**, v.438, p.846–849, 2005.

SCHWARTZ D, MARIOTTI A, LANFRANCHI R, GUILLET B. $^{13}\text{C}/^{17}\text{C}$ ratios of soil organic matter as indicators of ecosystem changes in tropical regions. **Geoderma**, v.39, p.97-103, 1986.

SILVA JR, C.A., COSTA, G.M., ROSSI, S., VALE, J.C.E., LIMA, R.B., LIMA, M., OLIVEIRA JR, J.F., TEODORO, P.E., SANTOS, R.C., Remote sensing for updating the boundaries between the Brazilian Cerrado-Amazonia biomes. **Environmental Science & Policy**, v. 101, p.383-392, 2019.

SILVÉRIO, D. V., BRANDO, P. M., BALCH, J. K., PUTZ, F. E., NEPSTAD, D. C., OLIVEIRA-SANTOS, C., BUSTAMANTE, M. Testing the Amazon savannization hypothesis: Fire effects on invasion of a neotropical forest by native cerrado and exotic pasture grasses. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, p.1-8, 2013.

SMITH, T. B.; WAYNE, R.K.; GIRMAN, D. J.; BRUFORD, M. W. A role for ecotones in generating rainforest biodiversity. **Science**, v. 276, p.1855–1857, 1997.

SOARES, L. C. Limites meridionais e orientais da área de ocorrência da Floresta amazônica em território Brasileiro. **Rev. Bras. Geografia**, v.1, p. 3-122, 1953.

STAAL, A., TUINENBURG, O.A., BOSMANS, J.H.C. ET AL. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. **Nature Clim Change**, v.8, p.539–543, 2018.

STAVER, A. C., ARCHIBALD, S., LEVIN, S. A. The global extent and determinants of savanna and forest as alternative biome states. **Science**, v.334, p.230–232, 2011.

STEFFEN, W., ROCKSTRÖM, J., RICHARDSON, K., LENTON, T. M., FOLKE, C., LIVERMAN, D., SUMMERHAYES, C. P., BARNOSKY, A. D., CORNELL, S. E., CRUCIFIX, M., DONGES, J. F., FETZER, I., LADE, S. J., SCHEFFER, M., WINKELMANN, R. AND SCHELLNHUBER, H. J.: Trajectories of the Earth System in the Anthropocene, **Proc.**

Natl. Acad. Sci. U. S. A., v.115, n.33, p.8252–8259, 2018.

TASSER, E., LEITINGER, G., TAPPEINER, U. Land Use Policy Climate change versus land-use change—What affects the mountain landscapes more? Land use policy. **Elsevier Ltd**, v.60, p. 60–72, 2017.

TORRELO-RAVENTOS, M., FELDPAUSCH, T. R., VEENENDAAL, E., SCHRODT, F., SAIZ, G., DOMINGUES, T. F., ET AL. On the delineation of tropical vegetation types with an emphasis on forest/savanna transitions. **Plant Ecology & Diversity**, v.6, p. 101–137, 2013.

THOMAS, C. D., CAMERON, A., GREEN, R. E., BAKKENES, M., BEAUMONT, L. J., COLLINGHAM, Y. C., ERASMUS, B. F. N., FERREIRA DE SIQUIERA, M., GRAINGER, A., HANNAH, L., HUGHES, L., HUNTLEY B, VAN JAARSVELD, A. S., MIDGLEY, G. F., MILES, L., ORTEGA-HUERTA, M. A., PETERSON, A. T., PHILLIPS, O. L., WILLIAMS, S. E. Extinction risk from climate change. **Nature**, v.427, p.145–148, 2004.

VAN NES, E. H., SCHEFFER, M. Implications of spatial heterogeneity for catastrophic regime shifts in ecosystems. **Ecology**, v.86, n.7, p. 1797–1807, 2005.

VIDOTTO, E., PESSENDA, L. C. R., RIBEIRO, A. D. S., FREITAS, H. A. D., BENDASSOLLI, J. A. Dinâmica do ecótono floresta-campo no sul do estado do Amazonas no Holoceno, através de estudos isotópicos e fitossociológicos. **Acta Amazônica**, v.37, n.3, p. 385-400, 2007.

VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. **IBGE**: Rio de Janeiro, 1991. Disponível em: <

<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf> >. Acesso em: 15 de janeiro de 2019.

ZEVIANI, W. M. RIBEIRO-JÚNIOR, P. J., BONAT, W. H. Modelos de regressão não linear. Laboratório de Estatística e Geoinformação Departamento de Estatística Universidade Federal do Paraná. **Docplayer**, 2013. Disponível em: < <https://docplayer.com.br/1941256-Curso-modelos-de-regressao-nao-linear.html>>. Acesso em: 20 de setembro de 2020.

ZORTEA, M. **Determinantes Ambientais de vegetação Savânica e Florestal em Enclaves de Cerrado na Amazônia Mato-Grossense**. 122 f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos), Universidade do Estado de Mato Grosso, Alta Floresta- MT, 2018.

WALTHER, G. R. Community and ecosystem responses to recent climate change. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v.365, p.2019–2024, 2010.

WICKHAM, H., CHANG, W., HENRY, L., PEDERSEN, T. L., TAKAHASHI, K., WILKE, C., WOO, K., YUTANI, H., DUNNINGTON, D., R STUDIO. (2020). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/ggplot2.pdf>, R package version 3.33.

WUYTS, B., CHAMPNEYS, A. R., HOUSE, J. I. Amazonian forest-savanna bistability and human impact. **Nature Communications**, p.1-12, 2018.

ANEXO A- Códigos da legenda para os valores de pixel na coleção 3 do MapBiomias.

COLEÇÃO 3 - PORTUGUÊS	COLLECTION 3 - ENGLISH	NEW ID
1. Floresta	1. Forest	1
1.1. Floresta Natural	1.1. Natural Forest	2
1.1.1. Formação Florestal	1.1.1. Forest Formation	3
1.1.2. Formação Savânica	1.1.2. Savanna Formation	4
1.1.3. Mangue	1.1.3. Mangrove	5
1.2. Floresta Plantada	1.2. Forest Plantation	9
2. Formação Natural não Florestal	2. Non Forest Natural Formation	10
2.1. Área Úmida Natural não Florestal	2.1. Wetland	11
2.2. Formação Campestre	2.2. Grassland Formation	12
2.3. Apicum	2.3. Salt flat	32
2.4. Outra Formação Natural não Florestal	2.3. Other non forest natural formation	13
3. Agropecuária	3. Farming	14
3.1. Pastagem	3.1. Pasture	15
3.2. Agricultura	3.2. Agriculture	18
3.2.1. Cultura Anual e Perene	3.2.1. Annual and Perennial Crop	19
3.2.2. Cultura Semi-Perene	3.2.2. Semi-Perennial Crop	20
3.3. Mosaico de Agricultura e Pastagem	3.3. Mosaic of Agriculture and Pasture	21
4. Área não vegetada	4. Non vegetated area	22
4.1. Praia e Duna	4.1. Beach and Dune	23
4.2. Infraestrutura Urbana	4.2. Urban Infrastructure	24
4.3. Afloramento Rochoso	4.3. Rocky outcrop	29
4.4. Mineração	4.4. Mining	30
4.5. Outra Área não Vegetada	4.5. Other non vegetated area	25
5. Corpos D'água	5. Water	26
5.1. Rio, Lago e Oceano	5.1. River, Lake and Ocean	33
5.2. Aquicultura	5.2. Aquaculture	31
6. Não observado	6. Non Observed	27