

VANIELE DA SILVA BARROS

**ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE FOCOS DE CALOR NOS
BIOMAS BRASILEIROS UTILIZANDO GRÁFICO DE
RECORRÊNCIA**

**Recife – PE
Fevereiro/2021**



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA
APLICADA

ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE FOCOS DE CALOR NOS
BIOMAS BRASILEIROS UTILIZANDO GRÁFICO DE
RECORRÊNCIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada como exigência parcial à obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada.

Área de Concentração: Biometria e Estatística Aplicada

Orientador: Profa. Dra. Tatijana Stosic

Coorientadora: Dra. Lidiane da Silva Araújo

Recife – PE
Fevereiro/2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B277a

Barros, Vaniele da Silva

Análise de séries temporais de focos de calor nos biomas brasileiros utilizando gráfico de recorrência / Vaniele da Silva Barros. - 2021.

54 f. : il.

Orientadora: Tatijana Stosic.

Coorientadora: Lidiane da Silva Araujo.

Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Recife, 2021.

1. Gráfico de Recorrência. 2. Análise de Quantificação de Recorrência. 3. Focos de calor. 4. Biomas. I. Stosic, Tatijana, orient. II. Araujo, Lidiane da Silva, coorient. III. Título

CDD 519.5

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA
APLICADA

ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE FOCOS DE CALOR NOS
BIOMAS BRASILEIROS UTILIZANDO GRÁFICO DE
RECORRÊNCIA

VANIELE DA SILVA BARROS

Manuscrito da Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 15/02/2020 pela Banca Examinadora.

Orientadora:

Profa. Dra. Tatijana Stosic
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Coorientadora:

Dra. Lidiane da Silva Araújo
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Borko Stosic
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Sílvio Fernando Alves Xavier Júnior
Universidade Estadual da Paraíba – Examinador Externo

Dedico aos meus pais, Maria Aparecida e José Uilson e aos meus avós, Marinete e Antônio. São meu alicerce, minha vida, meu tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida e por ter me permitido realizar tantos sonhos nesta existência. Agradeço por me permitir errar, aprender e crescer, por Sua eterna compreensão, por Seu amor infinito e por não ter me deixando desistir em meio as dificuldades. Ainda não descobri o que fiz nesta vida para receber tantas bênçãos.

Aos meus pais e aos meus avós, por me ajudarem a alcançar meus objetivos, sendo este mais um. Por acreditarem em mim e não terem poupado esforços para me ajudar durante toda a minha trajetória escolar/acadêmica, especialmente ao meu avô, Antônio Barros, por toda paciência, amor, incentivo e apoio incondicional, a quem eu nunca serei suficientemente grata.

Aos meus tios paternos e aos meus irmãos Tiago e Vanessa, que sempre estiveram presentes e com quem sempre pude contar.

Ao meu noivo e melhor amigo Danilo Sipriano, com quem compartilhei sonhos, entusiasmo, expectativas e frustrações e recebi apoio, incentivo, compreensão e solidariedade inefável ao longo deste percurso. Agradeço por me acalmar nos momentos de estresse, por sempre estar ao meu lado e não poupar esforços para me ajudar em tudo que estava ao seu alcance. Por me incentivar profissional e academicamente, e sempre me apoiar nas minhas decisões. A sua família, por me adotar nesses últimos anos e cuidarem tão bem de mim, especialmente a minha cunhada e amiga/irmã, Daniela Cipriano, e seu esposo, Paulino Andres, por todo apoio e auxílio durante esses últimos anos.

A geografa, amiga e irmã de coração, Naiane Gomes, pelo seu incentivo, sua amizade, e por várias vezes ter disponibilizado seu tempo a mim, seja para me ouvir ou para me ajudar com conceitos de sua área.

A Profa. Dra. Tatijana Stosic pela orientação, apoio, paciência e tamanha competência, proporcionando-me um maior amadurecimento profissional.

Ao amigo e Prof. MSc. José Elizângelo Lopes, por ter me acompanhado desde o do ensino fundamental II até a especialização, e por ser um exemplo de profissional que eu tenho seguido.

A todos os professores que tive, que de alguma forma contribuíram para eu chegar até aqui. Em especial, a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em

Biometria e Estatística Aplicada pelo aprendizado, apoio e a disponibilidade a ajudar sempre.

Aos amigos que Deus me presenteou durante esta trajetória, Edvaldo Nunes e Marília Gabriela, com quem tive a oportunidade de compartilhar as dificuldades enfrentadas no decorrer da minha trajetória neste programa. Agradeço por todos os ensinamentos, conselhos, risos e lágrimas que compartilhamos. Vocês me ajudaram a entender que o mundo acadêmico não é somente marcado por disputas, mas também é feito de redes de solidariedade e afeto.

Aos colegas que fiz durante o programa, pela convivência agradável ao longo do primeiro ano, em especial Lucas Amaral e Augusto César.

A Leika, por toda contribuição, disponibilidade e paciência para me ajudar no desenvolvimento desta pesquisa.

A Joelma por todas as contribuições.

A gerente da GRE - Agreste Meridional, Adelma Elias, ao gestor e ao coordenador da instituição que trabalho (EREMFPC), Márcio José e Cleiton Silva, pela flexibilidade, compreensão e apoio.

Ao Programa de Pós Graduação em Biometria e Estatística Aplicada e a Universidade Federal Rural de Pernambuco pelo ambiente colaborativo. Ao INPE pela disponibilidade dos dados.

Agradeço, antecipadamente, aos membros da banca examinadora desta dissertação pelo tempo direcionado à leitura e pelas possíveis observações e sugestões para esta pesquisa.

“Até aqui nos ajudou o Senhor.”

1 Sm 7, 12

RESUMO

O interesse científico em estudos que utilizam a análise de recorrência na abordagem das transições entre comportamentos regulares e caóticos, bem como, na identificação de estruturas dos sistemas dinâmicos vem se difundindo ao longo dos anos. Dentre as principais ferramentas desta análise, destacam-se o método Gráfico de Recorrência e a Análise de Quantificação de Recorrência, que são constantemente empregadas na análise de séries temporais supostamente provenientes de sistemas dinâmicos não-lineares e até não-estacionários. Em particular, este trabalho buscou analisar os padrões de larga e pequena escala nos Gráficos de Recorrência das séries das queimadas nos biomas Amazônia, Cerrado, Caatinga e Mata atlântica e obter as medidas quantitativas pelo método da Análise de Quantificação de Recorrência. Foram analisadas séries diárias dos focos de calor dos biomas, registrados no período de 04 de julho de 2002 a 31 de dezembro de 2019, geradas a partir de dados disponíveis pelo Instituto Nacional de Pesquisas espaciais – INPE. No Brasil, a média anual de focos de calor, entre 2002 e 2019, é de aproximadamente 241.866 detecções, sendo esses eventos mais frequentes entre os meses de julho a outubro. Considerando os valores absolutos referentes a quantidade de focos de calor de cada bioma, a maior concentração de focos ocorre no bioma Amazônia, por ter a maior extensão territorial, no entanto, considerando a quantidades de focos de calor e a área de cada bioma, o Cerrado apresenta o maior registro por km^2 . As estruturas presentes nos Gráficos de Recorrência das séries diárias de focos dos biomas indicam uma baixa previsibilidade, enquanto para as séries de anomalias, indicam alta previsibilidade, além de apresentarem mudanças abruptas na dinâmica dos sistemas em ambos os casos. Os valores dos vários índices que servem como medidas de quantificação do processo confirmam esses resultados, e foram obtidos através da aplicação do método Análise de Quantificação de Recorrência.

Palavra-chave: Gráfico de Recorrência, Análise de Quantificação de Recorrência, Focos de calor, Biomas.

ABSTRACT

The scientific interest in studies that use recurrence analysis to approach the transitions between regular and chaotic behaviors, as well as, in the identification of structures of dynamic systems, has spread over the years. Among the main tools of this analysis, we highlight the Recurrence Graph method and the Recurrence Quantification Analysis, which are widely used in the analysis of time series supposedly coming from non-linear and even non-stationary dynamic systems. In particular, this work analyzed or evaluated the large and small scale patterns in the Recurrence Graphs of the series of hot pixels in the Amazon, Cerrado, Caatinga and Atlantic Forest biomes and to obtain the quantitative measures by the method of Recurrence Quantification Analysis. Daily series of hot pixels derived from data provided by National Institute of Space Research – INPE, of the biomes were analyzed for the period from July 4, 2002 to December 31, 2019. In Brazil, the annual average of number of hot pixels, between 2002 and 2019, is approximately 241,866 detections, being these most frequent events between the months of July to October. Considering the absolute values referring to the number of hot pixels in each biome, the highest concentration occurs in the Amazon biome, as it has the largest territorial extension, however, considering the number of hot pixels and the area of each biome, the Cerrado has the highest record per km^2 . The structures present in the Recurrence Graphs of the daily series of hot pixels of the biomes indicate low predictability, while for the series of anomalies, they indicate high predictability, in addition to presenting abrupt changes in the dynamics of the systems in both cases. The values of the various indices that serve as measures of process quantification confirm these results, were obtained through the application of the Recurrence Quantification Analysis method.

Keywords: Recurrence plot, Recurrence quantification analysis, hot pixels, biomes.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Mapa representando a distribuição dos biomas do Brasil... ..	23
Figura 2: I. Segmento de trajetória do espaço da fase do sistema Lorenz (onde os parâmetros padrão são: $r = 28, \sigma = 10, b = 8/3$) utilizando seus três componentes; II. Seu gráfico de recorrência correspondente. Um ponto da trajetória em j que cai na vizinhança de um dado ponto em i é considerado um ponto de recorrência. Assim é plotado um ponto preto no RP no local (i, j) , com $\epsilon = 5$	29
Figura 3: Exemplos de gráficos de recorrência do sistema de Rössler.....	30
Figura 4: Homogêneo (ruído branco igualmente distribuído).....	31
Figura 5: Periódica (oscilações harmônicas superpostas).....	31
Figura 6: Deriva (mapa logístico alterado com ruído).....	32
Figura 7: Descontínuo (movimento browniano).....	32
Figura 8: Gráfico de séries de focos de calor por bioma e ano.....	36
Figura 9: Séries normalizadas dos biomas.....	39
Figura 10: Gráficos de Recorrência dos biomas: Amazônia(a), Caatinga(b), Cerrado(c) e Mata Atlântica(d).....	41
Figura 11: Séries das anomalias dos biomas: Amazônia(a), Caatinga(b), Cerrado(c) e Mata Atlântica(d).....	43
Figura 12: Gráficos de Recorrência das séries de anomalias dos biomas: Amazônia(a), Caatinga(b), Cerrado(c) e Mata Atlântica(d).....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos parâmetros para série de biomas.	40
Tabela 2 - Análise de Quantificação de Recorrência para os Biomas.	42
Tabela 3 - Valores dos parâmetros para séries dos biomas.	44
Tabela 4 - Análise de Quantificação de Recorrência para os biomas.	45

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BDQUEIMADAS	Banco de Dados de Queimadas
DEINFO	Departamento de Estatística e Informática
<i>DET</i>	<i>Deterministic</i>
<i>DIV</i>	<i>Divergence</i>
<i>ENTR</i>	<i>Entropy</i>
FNN	<i>False nearest neighbors</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBio	instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>L</i>	<i>Average diagonal line length</i>
<i>L_{max}</i>	<i>Longest diagonal line</i>
<i>LAM</i>	<i>Laminarity</i>
LOI	<i>Line of identity</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NSF	<i>National Science Foundation</i>
PPGBEA	Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada
PROARCO	Programa de Monitoramento de Queimadas e Prevenção e Controle de Incêndios Florestais no Arco do Desflorestamento da Amazônia
<i>RR</i>	<i>Recurrence Rate</i>
<i>RP</i>	<i>Recurrence Plot</i>
<i>RQA</i>	<i>Recurrence Quantification Analysis</i>
<i>TT</i>	<i>Trapping Time</i>
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	<i>Threshold</i>
$\Theta(\cdot)$	Função <i>Heaviside</i> ($\Theta(x) = \{1 x > 0; 0 x \leq 0\}$)
τ	Tempo de atraso
i, j	Índices
l_{min}	Comprimento mínimo predeterminado de uma linha diagonal
m	Dimensão de incorporação
N	Tamanho da série observada
N_l	Número total de linhas diagonais
$P(l)$	Histograma dos comprimentos de l
$P(v)$	Histograma dos comprimentos de v
$p(l)$	Probabilidade de obter a linha diagonal igual ao comprimento l
$R(\varepsilon)$	Matriz de recorrência
v_{min}	Comprimento mínimo predeterminado de uma linha vertical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	18
2.1. Objetivo Geral	18
2.2. Objetivos Específicos.....	18
3. REVISÃO DA LITERATURA	19
3.1. Focos de calor, queimadas e incêndios florestais	19
3.2. Efeitos ambientais.....	20
3.3. Detecção de focos de calor no Brasil	21
3.4. Biomas brasileiros	22
3.5. Recorrência	27
3.5.1. Gráficos de Recorrência	28
3.5.3. Análise de Quantificação de Recorrência	33
4. DADOS E METODOLOGIA.....	36
4.1. Descrição dos dados.....	36
4.2. O <i>Software</i> utilizado	36
4.3. Metodologia.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6. CONCLUSÕES	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1. INTRODUÇÃO

O fogo é um fenômeno mundial que influencia os padrões e processos globais dos ecossistemas, incluindo a distribuição e estrutura da vegetação, o ciclo do carbono e o clima. De acordo com a fundação NSF - *National Science Foundation* (2003), dois dos maiores desafios das ciências ambientais nas primeiras décadas do século XXI são: proteção do meio ambiente e diminuição das consequências dos desastres físico-naturais, que tem se intensificado com as atividades humanas.

Existem alguns aspectos naturais *in loco* que controlam a ocorrência e a propagação do fogo, seja duração da estação seca, a frequência dos raios e/ou os ventos fortes, no entanto, há também algumas variáveis antrópicas que contribuem significativamente para a incidência de queimadas ou incêndios, como, uso e manejo da terra e densidade da rede de estradas (ARCHIBALD et al., 2009).

As queimadas e, principalmente, os incêndios florestais além de liberar na atmosfera uma grande quantidade de gases responsáveis pelo efeito estufa, são uma das maiores ameaças à preservação da biodiversidade do planeta, com impactos direto sobre a fauna e a flora, e ainda contribuem, indiretamente, com a degradação ambiental (SOARES e BATISTA, 2007). Além disso, a queima da biomassa vegetal pode gerar problemas para saúde humana, especialmente doenças respiratórias (ARBEX et al., 2004), e pode provocar consequências socioeconômicas consideráveis.

Atualmente, é comum notícias informando da existência de milhares de focos de incêndios no país, principalmente durante a estação mais crítica, geralmente de julho a outubro (GONTIJO et al., 2011). Entre 2002 e 2019, no Brasil, foram detectados mais de 4 milhões de dados com temperaturas acima de 47°C, capturados pelos satélites de monitoramento sobre o país, realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), os quais são identificados como focos de calor.

A detecção sistemática de focos de calor realizada pelo INPE é pioneira e a mais completa desenvolvida no mundo. De acordo com a coordenação do Programa de Queimadas do Instituto Nacional, desde 1980 são aprimoradas as tecnologias para o monitoramento de queimadas por meio de imagens de satélites, que é particularmente útil em regiões remotas sem meios intensivos de acompanhamento, condição que representa a situação geral do Brasil.

Vários fatores como vegetação, condições climáticas e medidas de proteção podem afetar a iniciação, propagação e supressão de incêndios, tornando a modelagem deste fenômeno extremamente difícil. Por isso, existe na comunidade científica um esforço contínuo para desenvolver modelos teóricos e computacionais para descrever o comportamento do fogo. Isso é crucial para entender e modelar os fenômenos relacionados, e estabelecer novos métodos mais eficientes de manejo de recursos bioambientais, uso do solo e agricultura (BOWMAN et al., 2009).

Neste sentido, faz-se necessário compreender melhor o sistema complexo das queimadas, nos diferentes biomas brasileiros, particularmente o nível da previsibilidade da variação temporal que será abordado neste trabalho através dos métodos Gráfico de Recorrência (RP) e Análise de Quantificação de Recorrência (RQA), que foram desenvolvidos para análise não linear das séries temporais baseando-se nas recorrências dos estados de sistemas dinâmicos no espaço de fase (MARWAN et al., 2007; ZBILUT; WEBBER JR, 1992).

Nas últimas décadas, os gráficos de recorrência tornaram-se uma alternativa para o estudo de sistemas complexos, e isto pode ser constatado diante de sua aplicação em áreas como engenharia (FAUSTINE et al., 2020), medicina (RUNNOVA et al., 2020; AFONSO et al., 2019; MARWAN et al., 2002), ciências biológicas (SHELHAMER, 1997), geofísica (OZKEN et al., 2018; MARWAN et al., 2002a), física (WENDI & MARWAN, 2018; THIEL et al., 2004), química (RUSTICI et al., 1999; ROMANO, 2005), climatologia (GOSWAMI et al., 2013) e economia (ADDO et al., 2013; STAN et al., 2010; BASTOS & CAIADO, 2011; DE SANTANA et al., 2020).

A dissertação foi dividida em sete capítulos. O capítulo 2 são apresentados os objetivos geral e específicos. O capítulo 3 refere-se a revisão de literatura: traz conceitos necessários para facilitar a compreensão acerca do trabalho desenvolvido; discute algumas questões importantes sobre Focos de Calor, Queimadas e Incêndios Florestais, tendo em vista que seus respectivos conceitos ainda são confundidos entre si. Posteriormente, destaca-se os efeitos ambientais e a detecção dos focos de calor no país. Subsequentemente, salienta-se a respeito dos biomas brasileiros e sobre as técnicas utilizadas.

No capítulo 4, descreve-se os dados utilizados neste trabalho e a metodologia aplicada para a realização das análises. Os resultados e a discussão são apresentados no capítulo 5. As considerações finais da pesquisa são feitas no capítulo 6 e, em seguida, as referências, no capítulo 7.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Investigar as propriedades das séries temporais das queimadas nos biomas brasileiros.

2.2. Objetivos Específicos

- ✚ Analisar os padrões de larga e pequena escala nos Gráficos de Recorrência das séries das queimadas nos biomas Amazônia, Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica;
- ✚ Obter as medidas quantitativas pelo método da Análise de Quantificação de Recorrência.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Focos de calor, queimadas e incêndios florestais

As expressões “Focos de calor”, “Queimadas” e “Incêndios” são, na maioria das vezes, empregadas de maneira incerta em relação a sua origem e a seu contexto de ocorrência, por isso, neste tópico, destacaremos suas respectivas denominações.

Designa-se como foco de calor um pixel, elemento de resolução da imagem de que varia de 375 m x 375 m até 5 km x 4 km, em que o algoritmo de sensoriamento detecta condições que indiquem a existência de fogo. Neste pixel pode haver uma ou várias queimadas distintas, mas a indicação será de um único foco, pois a extensão territorial coberta pelo pixel varia de acordo com a distância em que o satélite analisado está posicionado quando a imagem é registrada (INPE, 2020a). Um foco de calor não significa, necessariamente, que esteja ocorrendo uma queimada ou incêndio florestal, mas sim que uma determinada área apresenta uma temperatura superior a 47°C (BATISTA, 2004). Se uma queimada for muito extensa, será detectada em alguns pixels vizinhos, ou seja, vários focos estarão associados a uma única grande queimada.

Queimada é denominada como uma prática que utiliza o fogo de forma controlada com a finalidade de “limpar” áreas agrícolas, controlar pragas e doenças, preparar o solo para o plantio, renovar pastagens, melhorar a oferta e qualidade dos alimentos, abrir novas áreas de plantio, entre outros (VIEIRA et al., 2016). Ela deve ser feita sob condições ambientais que permitam que o fogo se mantenha confinado à área que será utilizada para a agricultura ou pecuária (JUSTINO et al., 2002).

Nesse contexto, pode-se afirmar que incêndios florestais são eventos com um potencial devastador (FRANÇA et al. 2007). Representam uma ameaça ambiental de primeira ordem (CAMPO et al. 2006). Em outras palavras, quando o fogo está incontrolável, consumindo toda ou parte de qualquer tipo de vegetação, é classificado como incêndio florestal (RIBEIRO; BONFIM, 2000; SOARES; BATISTA, 2007), suas características são afetadas pelas complexas interações entre vegetação, clima, topografia e atividades antrópicas ao longo do tempo (TORRES, 2017). Muitos possuem causas naturais e podem ser ecologicamente entendidos como um entre muitos fatores que atuam nos ecossistemas, no entanto, na maioria das regiões do mundo, as principais fontes de ignição estão ligadas à ação antrópica (WHELAN, 1995).

3.2. Efeitos ambientais

Sabe-se que o fogo é considerado um dos principais problemas ambientais no Brasil e no mundo, seja sua ação controlada ou não. Seus efeitos nos ecossistemas são complexos (ICMBio, 2010), e podem gerar problemas em três escalas: local, regional e global.

Em escala local, destrói a fauna e flora, empobrece o solo, reduz a penetração de água no subsolo, e em muitos casos, causa mortes, acidentes e perda de propriedades (INPE, 2020a), além disso, aumenta a susceptibilidade à erosão (CAMPO et al., 2006). No contexto regional, causam poluição atmosférica que pode resultar em impactos diversos, como, paralisação de aeroportos, danos ao patrimônio público e privado (ICMBio, 2010), e poluição devida à fumaça gerada tem um efeito significativo sobre a saúde das populações atingidas. Esse impacto inclui aumento de mortalidade, de admissões hospitalares, de visitas à emergência e de utilização de medicamentos, devidas a doenças respiratórias e cardiovasculares, além de diminuição da função pulmonar (GOH, 1999) sendo capaz de alterar, ou até mesmo destruir ecossistemas. Em escala global, promovem aumento nas emissões de carbono para a atmosfera, podendo ter consequências para o clima planetário (HERAWATI & SANTOSO, 2011), e é considerada uma grande fonte adicional de emissões de gases do efeito estufa (FEARNSIDE, 2002). Cabe salientar que os efeitos do fogo são diretamente relacionados às condições ambientais, o tipo de material combustível, sua intensidade e duração.

No que se refere às queimadas, especificamente, apesar de ser a utilização do fogo de forma prescrita, controlada (ARAÚJO; RIBEIRO, 2005) e ter um baixo custo financeiro, quando é aplicada em uma determinada área, dependendo de sua intensidade, duração, e das características do ecossistema atingido (ex. composição vegetal, topografia, clima etc.), afeta de forma direta ou indireta, os atributos físicos, químicos e biológicos do solo (REDIN et al., 2011; MUÑOZ-ROJAS et al., 2016), como o pH, teor de nutrientes e carbono, biodiversidade da micro, meso e macrofauna, temperatura, porosidade e densidade (CAPECHE, 2012). Sem falar no efeito da erosão nos solos expostos (TAVARES et al, 2008) e do ressecamento (solo exposto ao sol) o que reduz sua capacidade produtiva. Porém, segundo Rodrigues (1999), a frequência dos eventos também é um fator que deve ser considerado quando são avaliados os impactos nos atributos do solo.

É importante ressaltar que a ação do fogo é uma parte integrante e necessária de alguns ecossistemas onde ocorrem naturalmente devido a raios, como no Cerrado (INPE, 2020). No entanto, as práticas contínuas de corte e queima, a fim de abrir novas áreas para agricultura e pastagem, leva a inúmeros problemas decorrentes dessas práticas (CERTINI, 2005).

3.3. Detecção de focos de calor no Brasil

Anualmente, centenas de milhares de focos de calor relacionados à queima de biomassa são detectados globalmente usando dados de sensoriamento remoto do espaço (DWYER et al., 2000; GIGLIO et al., 2006; ICHOKU et al., 2008), e essa detecção juntamente com o monitoramento são fundamentais para o planejamento do controle e dimensionamento das consequências geradas pelo fogo sobre o ambiente.

No Brasil, devido a sua vasta extensão territorial e para facilitar o monitoramento dos focos de calor em regiões remotas do país, o INPE vem desenvolvendo e aprimorando desde a década de 80, um sistema operacional chamado BDQUEIMADAS - Banco de Dados de Queimadas, utilizado para detectar e quantificar regularmente, por meio de imagens de satélites, a extensão da vegetação queimada no país, com o objetivo de monitorar a cobertura da terra e o impacto do fogo, para apoiar as ações de gestão ambiental e controlar o desmatamento, as queimadas e os incêndios florestais. A partir de 1998, esse trabalho passou a ser realizado em conjunto com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), através do Programa de Monitoramento de Queimadas e Prevenção e Controle de Incêndios Florestais no Arco do Desflorestamento da Amazônia (PROARCO), dando ênfase à Amazônia (INPE, 2019).

De acordo com o INPE (2020a) algumas condições impossibilitam ou prejudicam bastante a detecção dos focos de calor, dentre elas: frentes de fogo com menos de 30 m; fogo apenas no chão de uma floresta densa, sem afetar a copa das árvores; nuvens cobrindo a região; queimada de pequena duração; fogo em uma encosta de montanha, enquanto que o satélite só observou o outro lado; imprecisão na localização do foco de queima, que no melhor caso é de cerca de 375 m, mas chegando a 6 km, porém, através de trabalhos de validação foi indicado que cerca de 80% dos focos estão em um raio de 1 km das coordenadas indicadas.

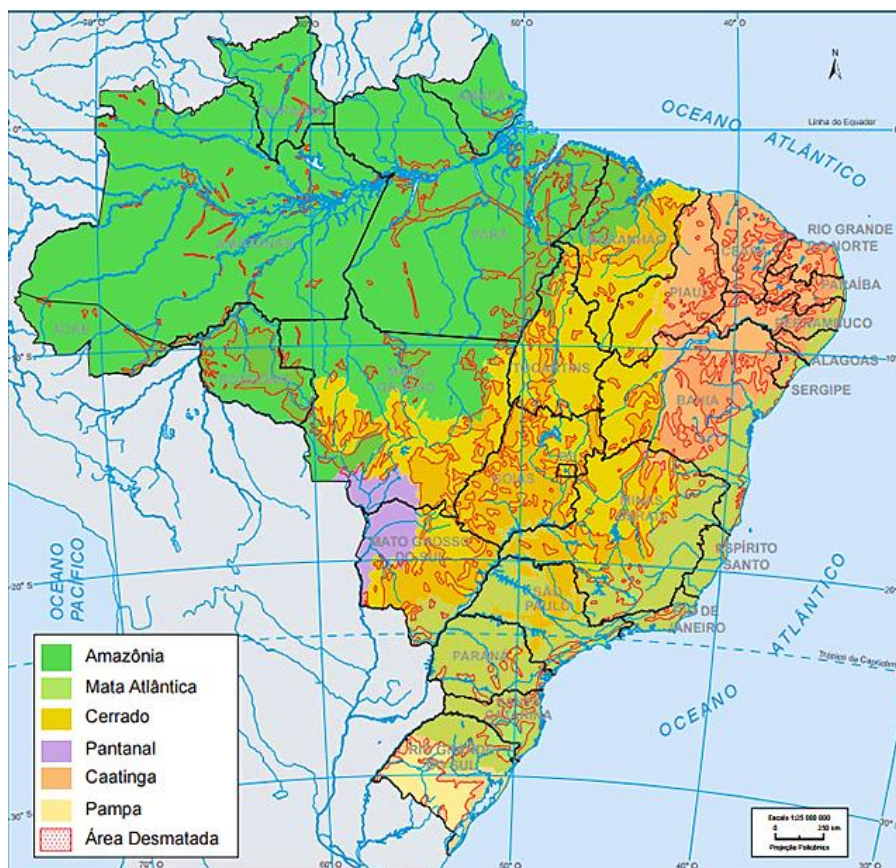
Os dados de focos de calor são obtidos diariamente em todo o território nacional e grande parte da América do Sul, através das imagens térmicas de vários satélites, e em seguida integrados a um sistema geográfico de informações e disponibilizado na Internet (INPE, 2020a).

3.4. Biomas brasileiros

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2020), bioma é definido como um conjunto de vida tanto animal como vegetal, formado pelo agrupamento de tipos de vegetação que podem ser identificados em nível regional, com condições de geologia e clima semelhantes e que, ao longo do tempo, sofreram os mesmos processos de mudanças. Por isso, cada bioma tem uma diversidade de flora e fauna própria. Em outras palavras, consiste em um grande espaço geográfico natural onde existe uma uniformidade do clima, do solo e da vegetação.

O Brasil é um país que constituiu importantes centros de biodiversidade pela combinação de altos níveis de riqueza e endemismo (ALEIXO, et al. 2010). Encontra-se recoberto pelos mais variados ecossistemas, colocando-se entre os países com maior diversidade mundial, abrigando cerca de 20% do total das espécies existentes (IBAMA, 2020), são 103 mil espécies de animais e 55 mil de vegetais distribuídas em 8,5 milhões km² (ICMBio, 2020). O país ocupa quase a metade da América do Sul, abarcando várias zonas climáticas e estas diferenças climáticas levam a grandes variações ecológicas, formando zonas biogeográficas distintas, mais conhecidas como biomas (MMA, 2020a). De acordo com o IBGE (2020), o país é formado por seis biomas, sendo eles: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Mapa representando a distribuição dos biomas do Brasil



Fonte: Atlas Geográfico Escolar

🚩 Bioma Amazônia

Considerado o maior bioma do Brasil e a maior reserva de biodiversidade mundial, ocupa uma área de 4.196.943 km² o que corresponde a 49,29% do território do país, distribuída nas regiões norte, nordeste e centro-oeste (IBGE, 2020a), distribuído em cinco unidades da federação: grande parte de Rondônia, mais de 50% de Mato Grosso, além de parte de Maranhão e Tocantins. A Amazônia possui a maior floresta tropical do mundo, equivalente a 1/3 das reservas de florestas tropicais úmidas que abrigam cerca de 40 mil espécies de plantas, 300 espécies de mamíferos, 1,3 mil espécies de aves (ICMBio, 2020), ou seja, contém a maior quantidade de espécies da flora e da fauna.

O bioma é caracterizado pelo clima quente e úmido e por florestas ombrófilas densas e abertas. Tem chuvas torrenciais bem distribuídas durante o ano e rios com fluxo intenso (MMA, 2020a), e abriga a maior bacia hidrográfica do mundo. Embora ampla e inegavelmente rica, a Amazônia, no entanto, mostra-se frágil. Além de sensível às ações humanas, cujas interferências podem causar danos de proporções irreversíveis, o

ecossistema amazônico também sofre com a instabilidade climática e os baixos índices socioeconômicos da região (BRASIL, 2014).

No bioma Amazônia está concentrado o maior índice de focos de calor do país e nos últimos 10 anos foram queimadas cerca de 683.298 km^2 e a incidência de queimas na região está diretamente relacionada à ação humana (SILVERIO et al., 2019), em particular, limpeza de pastagens e áreas florestais para produção agropecuária e também em práticas de manejo como a queima de resíduos em áreas plantadas (PIVELLO, 2011), tendo como uma de suas possíveis consequência, a propagação do fogo pelas grandes áreas florestais. E o cenário fica ainda pior em anos de estiagem severa (ALENCAR et al., 2015), pois as secas mais intensas e prolongadas reduzem a umidade no chão da floresta e criam condições para as chamas se alastrarem com facilidade, aumentando a chance de grandes incêndios florestais (ARAGAO et al., 2007; MARENCO et al., 2011; BRANDO et al., 2014).

Bioma Mata Atlântica

A Mata Atlântica é uma das florestas mais ricas em diversidade de espécies. Originalmente, abrangia, aproximadamente, 1.110.182 km^2 em 17 estados (Alagoas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Piauí, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo e Sergipe), estendendo-se por grande parte da costa do país. Hoje, restam apenas 162.000 km^2 que equivale a cerca de apenas 14,6% de sua cobertura original. Abriga sete das nove maiores bacias hidrográficas do país e três dos maiores centros urbanos do continente sul-americano (INPE, 2019a).

Este bioma é constituído por um conjunto de formações florestais (Florestas: Ombrófila Densa, Ombrófila Mista, Estacional Semidecidual, Estacional Decidual e Ombrófila Aberta) e ecossistemas associados como as restingas, manguezais e campos de altitude. Mesmo reduzida e muito fragmentada, estima-se que na Mata Atlântica existam cerca de 20.000 espécies vegetais (cerca de 35% das espécies existentes no Brasil), incluindo diversas espécies endêmicas e ameaçadas de extinção. Em relação à fauna, os levantamentos já realizados indicam que a Mata Atlântica abriga 849 espécies de aves, 370 espécies de anfíbios, 200 espécies de répteis, 270 de mamíferos e cerca de 350 espécies de peixes (MMA, 2020a).

Cerrado

O Cerrado é a segunda maior região biogeográfica da América do Sul e é considerada a formação savânica mais biodiversa do mundo. Com 2.036.448 km² ocupa cerca de 23,9% do território brasileiro (INPE, 2020). A sua área contínua estende-se sobre as regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste. Neste espaço territorial localizam-se as nascentes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Amazônica/Tocantins, São Francisco e Prata), o que resulta em um elevado potencial aquífero e favorece a sua biodiversidade (MMA, 2020).

Este bioma apresenta diversas fisionomias. Sua paisagem geral não é uniforme e apresenta-se em formações florestais, savânicas e campestres. Os aspectos das formações florestais assemelham-se: a mata ciliar, mata de galeria, mata seca e o cerradão. As formações savânicas são compostas pelo cerrado denso, cerrado típico, cerrado ralo, cerrado rupestre, vereda, parque cerrado e palmeiral. Já as formações campestres englobam as fitofisionomias de campo sujo, campo limpo e o campo rupestre (RIBEIRO; WALTER, 2008). Abriga mais de 11.000 espécies de plantas nativas, cerca de 44% dessas espécies são endêmicas (KLINK & MACHADO, 2005). Contudo, segundo o Ministério do Meio Ambiente (2020), inúmeras espécies de plantas e animais correm risco de extinção. Estima-se que 20% das espécies nativas e endêmicas já não ocorram em áreas protegidas e que pelo menos 137 espécies de animais presentes no Cerrado estão ameaçadas de extinção.

Embora o Cerrado seja um bioma adaptado ao uso do fogo, a prática torna-se crítica quando atinge grandes áreas, e acontece com uma frequência maior do que a capacidade que o ambiente suporta, causando diversas alterações (BRASIL, 2014).

Pantanal

O Pantanal é considerado uma das maiores extensões úmidas contínuas do planeta com uma rica biodiversidade, apesar de ser o de menor extensão no Brasil. Tem área de 150.355 km², o que equivale a, aproximadamente, 1,8% da área total do território, presente em 7% do território do Mato Grosso e 25% do estado do Mato Grosso do Sul (IBGE, 2020a). Este bioma, em seu espaço territorial, sofre influência direta de três importantes biomas brasileiros: Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, sendo uma planície

aluvial, influenciado por rios que drenam a bacia do Alto Paraguai (MMA, 2020). O bioma mantém boa parte da sua cobertura vegetal nativa, responsável, talvez, pela permanência de espécies que, em outros biomas, já se mostram em extinção (IMCBio, 2020).

Entretanto, o Pantanal também tem sofrido com as ações antrópicas, sobretudo com as atividades agropecuárias. No que diz respeito as queimadas, nos últimos 10 anos foram registrados 51.093 focos de calor, equivalente a 3,09% da quantidade total. O elemento fogo, seja provocado por práticas de manejo inadequadas ou causas naturais é um fator de grande influência no Pantanal, afetando diretamente a dinâmica e estrutura dos distintos ambientes que o formam, podendo trazer consequências diversas em diferentes escalas, que vão desde o risco para as populações rurais e degradação ambiental local até contribuições no aquecimento global (RAMOS et al., 2018).

Caatinga

A Caatinga ocupa cerca de 9,9% do território nacional, abrangendo uma área de aproximadamente 844.453 km² e integra parte significativa da região Nordeste, constituída pelos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, e uma pequena parte ao norte do Sudeste, norte de Minas Gerais e oeste do Espírito Santo (MMA, 2020; IBGE, 2020a). Rico em biodiversidade, o bioma abriga 178 espécies de mamíferos, 591 de aves, 177 de répteis, 79 espécies de anfíbios, 241 de peixes e 221 abelhas. Cerca de 27 milhões de pessoas vivem na região, a maioria carente e dependente dos recursos do bioma para sobreviver (MMA, 2020a).

É constituída principalmente por savana estépica, tem uma vegetação típica de regiões semiáridas, formada por plantas xerófilas, adaptadas ao clima seco e a pouca quantidade de água. Por causa do desmatamento e queimadas, 80% dos ecossistemas originais da caatinga foram alterados. Esse bioma está sujeito a dois períodos secos anuais: um de longo período de estiagem, seguido de chuvas intermitentes e um de seca curta seguido de chuvas torrenciais (MMA, 2020).

Pampa

Restrito ao estado do Rio Grande do Sul, onde ocupa uma área de 176.496 km², cerca de 2,1% do território brasileiro (IBGE, 2020a). O Pampa é uma das áreas de campos

temperados mais importantes do mundo, é um bioma de campos típico da zona temperada da América do Sul, estando na região Sul do Brasil e restrita ao estado do Rio Grande do Sul (MMA, 2020).

O bioma exibe um imenso patrimônio cultural associado à biodiversidade. As paisagens naturais do Pampa se caracterizam pelo predomínio dos campos nativos, e quanto a sua estrutura de vegetação, se comparada à das florestas e das savanas, é mais simples e menos exuberante, porém não menos relevante do ponto de vista da biodiversidade e dos serviços ambientais, pois os campos têm uma importante contribuição no sequestro de carbono e no controle da erosão, além de serem fonte de variabilidade genética para diversas espécies que estão na base de nossa cadeia alimentar. Além disso, há também a presença de matas ciliares, matas de encosta, matas de pau-ferro, formações arbustivas, butiazais, banhados, afloramentos rochosos etc. (MMA, 2020a).

O Pampa é marcado por clima chuvoso, sem período seco regular e com frentes polares e temperaturas negativas no inverno. E acredita-se que devido essas características, ele seja o bioma que possui a menor quantidade de focos de calor do país. Em 2019, foram registrados 1.420 focos, os quais representam 0,72% dos registrados pelo INPE no Brasil.

3.5. Recorrência

A recorrência é um fenômeno dos sistemas dinâmicos que vem sendo estudado há várias décadas e está associado ao Teorema da Recorrência de Poincaré (POINCARÉ, 1890). De maneira elementar, esse teorema assegura que para uma grande classe de sistemas dinâmicos, os estados do sistema ao longo de uma trajetória retornam infinitas vezes arbitrariamente próximos a quase todos os estados anteriormente percorridos. Em outras palavras, marca-se um ponto de referência x_i e após um longo período a trajetória visita outro ponto x_j , tal que

$$|x_i - x_j| < \delta \text{ para } \delta \geq 0,$$

em que δ é uma espécie de limiar (*threshold*) que determina a precisão a ser levada em consideração, pois, em sistemas caóticos é quase impossível ocorrer $|x_i| = |x_j|$ (BOARETTO et al., 2017).

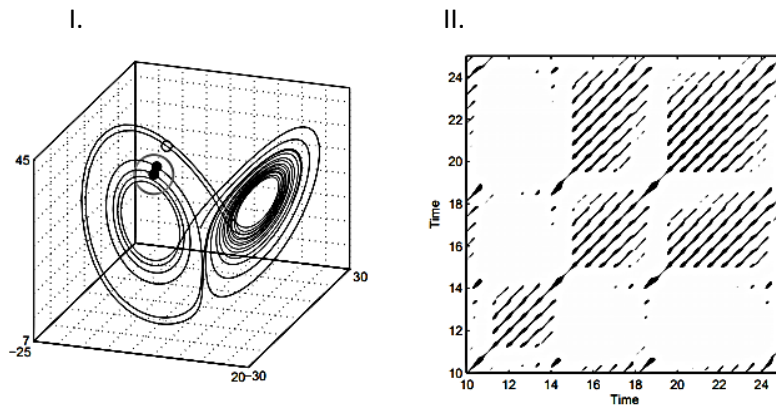
Dentro do contexto de séries temporais, diz-se que dois estados são recorrentes quando pertencem a uma mesma trajetória e encontram-se a uma distância menor do que um determinado valor limite em seu espaço de fases. É importante salientar que as séries temporais são utilizadas para representar dados nas mais diversas áreas, como em finanças, computação, estatística, meteorologia, dentre outras (COSTA, 2014).

3.5.1. Gráficos de Recorrência

Os Gráficos de Recorrência (*Recurrence Plot* - RP) foram idealizados por Eckmann, Kamphorst e Ruelle (1987) e são uma forma de visualizar a recorrência de sistemas dinâmicos unidimensionais ou multidimensionais em um espaço abstrato, denominado espaço de fase e permitem uma análise bidimensional do comportamento desses sistemas, os quais são representados por séries temporais.

De acordo com Monteiro (2002), o espaço de fase é um espaço matemático formado por coordenadas que representam todas as variáveis necessárias para especificar o estado instantâneo do sistema e é uma ferramenta útil na compreensão do comportamento desses sistemas. Em um determinado instante o estado do sistema é representado por um ponto, e a sua evolução temporal, por uma trajetória no espaço de fase. À medida que as variáveis dinâmicas mudam seus valores no tempo, no caso de um sistema dinâmico contínuo, o ponto representado traça um percurso de uma curva contínua no espaço, e no caso de um sistema dinâmico discreto, traça uma sequência de pontos (MARWAN et al., 2007). No entanto, apesar de poder ser multidimensional, permite apenas uma visualização de sua trajetória em até três dimensões (SOUZA, 2008; MARWAN, J. KURTHS, 2005). A partir da ferramenta Gráfico de Recorrência é possível analisar a trajetória do espaço da fase m -dimensional através da representação bidimensional de suas recorrências, como é visto na Figura 1 (MARWAN, 2003).

Figura 2 - I. Segmento de trajetória do espaço da fase do sistema Lorenz (onde os parâmetros padrão são: $r = 28$, $\sigma = 10$, $b = 8/3$) utilizando seus três componentes; II. Seu gráfico de recorrência correspondente. Um ponto da trajetória em j que cai na vizinhança de um dado ponto em i é considerado um ponto de recorrência. Assim é plotado um ponto preto no RP no local (i, j) , com $\varepsilon = 5$.



Fonte: (MARWAN, 2003)

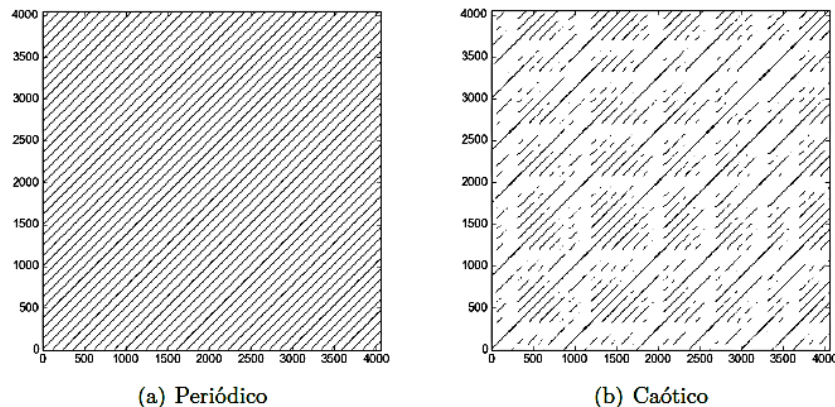
O RP pode ser expresso matematicamente através de uma matriz quadrada bidimensional ($N \times N$),

$$R_{ij}(\varepsilon) = \Theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \text{ com } \vec{x}_i \in \mathcal{R}^m, i, j = 1, \dots, N \quad (3.1)$$

- \vec{x}_i e \vec{x}_j são vetores no espaço de fase e representam a evolução dos estados do sistema dinâmico;
- ε é o limiar (*threshold*), um parâmetro que determina se os estados são considerados recorrentes ou não recorrentes;
- $\Theta(\cdot)$ é a função *Heaviside* que mapeia os pontos recorrentes dentro do gráfico de recorrência;
- $\|\cdot\|$ é a norma (mínima, máxima ou euclidiana);
- m é a dimensão de imersão.

A matriz construída a partir da função de Heaviside que mapeia os pontos recorrentes do sistema da seguinte forma: se $R_{i,j} = 1$, com $(i = 1, \dots, N)$, o ponto é considerado recorrente, ou seja, está dentro da vizinhança e um ponto preto é atribuído a posição (i, j) do gráfico, formando uma linha preta diagonal (linha de identidade / *line of identity* - LOI), com o ângulo de $\frac{\pi}{4}$; Caso $R_{i,j} = 0$, o estado não é considerado recorrente e um ponto branco é atribuído na posição (i, j) do gráfico, como pode ser observado na Figura 3 que apresenta exemplos de gráficos de recorrência do sistema de Rössler.

Figura 3 - Exemplos de gráficos de recorrência do sistema de Roessler.



Fonte: (REIS, 2016)

É importante salientar que os parâmetros dimensão de imersão m e o tempo de atraso τ podem ser obtidos utilizando, respectivamente, o método dos falsos vizinhos mais próximos e a função de informação mútua média (CAO, 1997). Além disso, um parâmetro crucial de um RP é o limiar ε , pois a forma do Gráfico de Recorrência pode variar significativamente dependendo do raio de vizinhança adotado, pois se o ε escolhido for muito pequeno, poucos ou quase nenhum ponto de recorrência poderá ser detectado e, conseqüentemente, haverá pouca informação sobre a estrutura do sistema. Caso contrário, se ε for muito grande, falsas recorrências podem ser detectadas. Portanto, é necessário encontrar um meio-termo para o valor de ε (REIS, 2016; MARWAN et al., 2007).

3.5.2. Estruturas dos Gráficos de Recorrência

De acordo com Reis (2016), o gráfico de recorrência apresenta diferentes padrões visuais que podem fornecer informações sobre a série analisada. Segundo Eckmann, Kamphorst e Ruelle (1987), esses padrões visuais podem ser divididos em duas categorias:

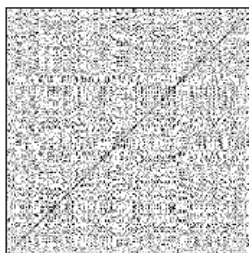
- larga escala - tipologia (*typology*).
- pequena escala – textura (*texture*).

No que se refere aos padrões de larga escala, eles fornecem uma visão global do comportamento do sistema (ruidoso, periódico etc.), enquanto os padrões de pequena escala fornecem as estruturas do gráfico (MARWAN; KURTHS, 2005).

A tipologia pode ser caracterizada como Homogênea, Periódica, Deriva e Descontínua (ECKMANN; KAMPHORST; RUELLE, 1987; MARWAN, 2003; MARWAN et al., 2007).

- **Homogêneo:** neste caso, o tempo característico de cada linha é pequeno em relação ao tempo total de exposição do sistema, ou seja, os pontos são pequenos se forem comparados ao gráfico em sua totalidade, e isso dificulta a identificação de quaisquer padrões na disposição das observações. Conforme a Figura 4, a seguir:

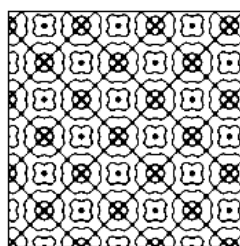
Figura 4 - Homogêneo (ruído branco igualmente distribuído).



Fonte: Adaptada de (MARWAN et al., 2007).

- **Periódico:** tem como característica a presença de linhas diagonais, paralelas à LOI, totalmente preenchidas e possuem estruturas de blocos recorrentes, com o aspecto de tabuleiro de xadrez e são características dos sistemas oscilantes. Como ilustra a Figura 5 abaixo:

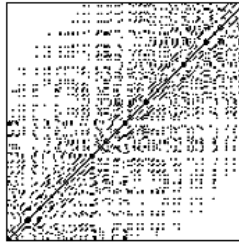
Figura 5 - Periódica (oscilações harmônicas superpostas).



Fonte: Adaptada de (MARWAN et al., 2007)

- **Deriva:** é característico de sistemas em que os parâmetros variam lentamente. Outra característica é a ausência de pontos recorrentes, tanto no canto superior esquerdo, quanto no canto inferior direito, ou seja, os pontos recorrentes diminuem à medida que se afastam a LOI.

Figura 6 - Deriva (mapa logístico alterado com ruído).



Fonte: Adaptada de MARWAN et al., 2007.

- **Descontínuo:** Esse gráfico é característico de sistemas em que a descontinuidade é causada por mudanças abruptas na dinâmica ou pela ocorrência de eventos raros. Apresenta faixas brancas provocadas por essas mudanças ou por eventos extremos.

Figura 7 - Descontínuo (movimento browniano).



Fonte: Adaptada de (MARWAN et al., 2007)

A inspeção mais detalhada do Gráfico de Recorrência está presente na estrutura da categoria textura (pequena escala), que são pontos únicos e isolados, linhas diagonais e linhas verticais e horizontais (MARWAN, 2003):

- **Pontos únicos e isolados:** Representam um estado recorrente ($R_{i,j} = 1$) e podem ser interpretados como estados que não persistem por um longo período.
- **Linhas diagonais:** São definidas por

$$\mathbf{R}_{i+k,j+k} \equiv 1, \quad \text{com } k = (0, 1, \dots, L - 1) \quad (3.2)$$

onde L é o comprimento da linha e é determinado pela duração da evolução similar. Ocorrem quando uma parte da trajetória evolui de forma paralela a outro segmento de trajetória, ou seja, indica que a trajetória visita a mesma região do espaço de fase em tempos diferentes.

- **Linhas verticais e horizontais:** São definidas por

$$\mathbf{R}_{i,j+k} \equiv 1 \quad \text{com } k = (0, 1, \dots, V - 1) \quad (3.3)$$

onde o V é o comprimento da linha e mostra que o estado do sistema permanece estacionário durante a evolução temporal (MARWAN, 2003; FACCHINI et al., 2007).

3.5.3. Análise de Quantificação de Recorrência

Devido à dificuldade de visualizar detalhes dos sistemas dinâmicos apenas com a matriz (RP), foi necessário criar quantificadores que contabilizassem as estruturas de pequena escala presentes no Gráfico de Recorrência, com o intuito de fornecer uma análise mais robusta e objetiva sobre o comportamento desses sistemas. Diante disso, Zbilut e Webber Jr. (1992) desenvolveram medidas de complexidades que permitem a quantificação da estrutura e complexidade dos RPs, as quais constituem o método da Análise de Quantificação de Recorrência (*Recurrence Quantification Analysis – RQA*) (ZBILUT; WEBBER JR, 1992; ZBILUT; GIULIANI; WEBBER JR, 1998;). Essas medidas utilizam tanto a densidade de pontos de recorrência quanto as estruturas de linhas diagonais e verticais do gráfico para calcular os valores de seus quantificadores e serão apresentadas abaixo de acordo com MARWAN *et al.*, (2007).

A primeira é uma medida da densidade de pontos de recorrência no RP e corresponde à probabilidade de um estado ocorrer em um espaço de fase, dentro de um limiar escolhido. É considerada a medida mais simples do RQA, denominada taxa de recorrência (*Recurrence Rate – RR*). Essa variável pode alternar de 0% (sem pontos recorrentes) a 100% (todos os pontos são recorrentes) e é representada pela seguinte expressão matemática:

$$RR(\varepsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{ij}(\varepsilon) \quad (3.4)$$

A segunda, é o determinismo (*Determinism – DET*). Essa medida e as próximas, são baseadas no histograma $P(l)$ de linhas diagonais de comprimento l , ou seja

$$P(l) = \sum_{i,j=1}^N (1 - R_{i-1,j-1})(1 - R_{i+l,j+l}) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k} \quad (3.5)$$

O determinismo, também conhecido como previsibilidade, é a razão entre o número de pontos pertencentes as diagonais e o número total de pontos recorrentes. É calculado por:

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N l P(l)}{\sum_{l=1}^N l P(l)} \quad (3.6)$$

onde,

- l é o comprimento da linha diagonal;
- $P(l)$ representa a probabilidade de existência de linhas diagonais de comprimento l no RP;
- l_{min} é o menor tamanho de uma linha ser considerada uma diagonal.

É importante ressaltar que l_{min} exclui as linhas diagonais que são formadas pelo movimento tangencial do espaço fase e para $l_{min} = 1$, $DET = 1$ e para determiná-lo é necessário levar em consideração que o histograma $P(l)$ pode se tornar esparso se o l_{min} for muito grande, e conseqüentemente, a confiabilidade do DET pode reduzir. Quanto a medida determinismo, diz-se que para um sistema com comportamento não correlacionado ou fracamente correlacionada, estocástico ou caótico, as linhas diagonais serão nulas ou muito curtas. Para sistemas periódicos as diagonais serão mais longas e com menos pontos de recorrência isolados.

Outra medida de quantificação é o tamanho médio das linhas diagonais (*Average diagonal line length - L*) que fornece o tempo médio em que dois segmentos da trajetória permaneçam evoluindo de maneira similar em um estado do sistema. Pode ser definido como o tempo médio de previsibilidade do sistema e é representado pela seguinte equação,

$$L = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N l P(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P(l)}, \quad (3.7)$$

Tem-se também o tamanho máximo da linha diagonal (*Longest diagonal line - L_{max}*), que se trata do comprimento máximo da linha diagonal no RP, excluindo a linha diagonal principal de identidade ($i = j$). Daí,

$$L_{max} = \max(\{l_i\}_{i=1}^{N_l}), \quad (3.8)$$

e $N_l = \sum_{l \geq l_{min}} P(l)$ é o número total de linhas diagonais. O inverso desta medida está relacionado a divergência exponencial (*Divergence - DIV*) da trajetória do espaço de fase, em que quanto mais rápido os segmentos de trajetória divergem, mais curtas são as linhas diagonais e mais altas são as medidas DIV e pode ser obtida por,

$$DIV = \frac{1}{L_{max}} \quad (3.9)$$

A entropia (*Entropy - ENTR*) é uma medida utilizada para medir o grau de desordem do RP em relação às linhas diagonais. Refere-se a entropia de Shannon

(SHANNON, 1948) da probabilidade $p(l) = \frac{P(l)}{P(N_l)}$ para encontrar uma linha diagonal acima de um determinado comprimento l no RP. Obtida, matematicamente, por

$$ENTR = - \sum_{l=l_{min}}^N p(l) \ln p(l) \quad (3.10)$$

A penúltima e a última variáveis de recorrência são laminaridade (*Laminarity - LAM*) e tempo de permanência (*Trapping Time - TT*), as quais são baseadas nas estruturas verticais (ou horizontais) do gráfico, e o número total de linhas verticais de comprimento v no RP é dado pelo histograma:

$$P(v) = \sum_{i,j=1}^N (1 - R_{i,j})(1 - R_{i,j+v}) \prod_{k=0}^{v-1} R_{i,j+k} \quad (3.11)$$

A laminaridade é a razão entre os pontos de recorrência que formam a estrutura e todo o conjuntos de pontos de recorrência que podem ser calculados. Ela é definida por,

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N v P(v)}{\sum_{v=1}^N v P(v)}, \quad (3.12)$$

no qual $P(v)$ é o número total de linhas verticais de tamanho v e v_{min} corresponde a o tamanho mínimo da linha vertical a ser considerada. O tempo de permanência é o comprimento médio das estruturas verticais, ele estima o tempo médio que o sistema permanecerá em um determinado estado. Seu cálculo, assim como na laminaridade, considera um comprimento mínimo v_{min} e é dado por

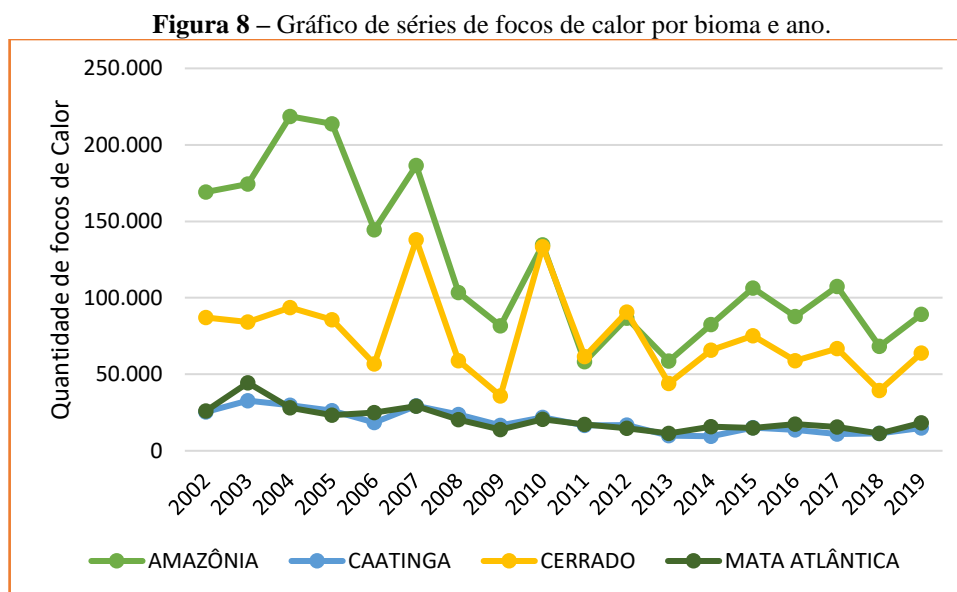
$$TT = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N v P(v)}{\sum_{v=v_{min}}^N P(v)} \quad (3.13)$$

4. DADOS E METODOLOGIA

4.1. Descrição dos dados

Neste trabalho, utiliza-se para o levantamento dos dados, o satélite de referência AQUA_M-T do banco de dados de queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), de 04 de julho de 2002 até 31 de dezembro de 2019 dos biomas: Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica e Caatinga. A Figura 8 ilustra as séries temporais originais dos biomas estudados.

O satélite utilizado possui o sensor MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*, o qual é considerado de referência por ser um satélite cuja informações diárias de focos detectados são usadas para compor a série temporal ao longo dos anos e assim, permitir a análise de tendências nos números de focos para as mesmas regiões em períodos de interesse.



Fonte: INPE (2020)¹.

4.2. O Software utilizado

O tratamento e análise dos dados foram realizados com auxílio do *software* R Core Team (2020). O pacote utilizado foi o *nonlinearTseries* (GARCIA, 2020), para a

¹ Elaborado pelo autor a partir dos dados do INPE.
Disponível em: <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal>.

construção do Gráfico de Recorrência, cálculo dos parâmetros (m e ε) dos RPs e Análise de Quantificação de Recorrência. Para o cálculo do parâmetro τ , utilizou-se o e o `tseriesChaos` (DI NARZO, 2019).

4.3. Metodologia

Para realizar a análise dos dados será utilizado o seguinte procedimento:

- I. Normalizam-se as séries originais dos focos de calor de cada bioma estudado entre 0 e 1, de acordo com a equação a seguir

$$Y = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (4.1)$$

em que, x denota a série original, e $\max(x)$ e $\min(x)$ são os valores de máximo e mínimo de x (BASTOS; CAIADO, 2011).

- II. Estimam-se os parâmetros de imersão, τ e m , para a reconstrução do espaço de fase do sistema dinâmico que gerou as séries originais, em que o retardo τ é convenientemente escolhido e dimensão de imersão m é estimada pelo método dos falsos vizinhos mais próximos.
- III. Estima-se o limiar ε com uso do método iterativo sugerido por Webber e Zbilut (2005), que consiste na busca pelo limiar que produz um percentual entre 1% e 5% do valor da taxa de recorrência, $RR(\varepsilon)$, dada pela relação (3.4).
- IV. Aplica-se o Método Gráfico de Recorrência (RP) às séries normalizadas individuais dos biomas, para analisar a dinâmica da ocorrência dos focos de calor e as correlações entre as séries.
- V. Efetua-se o Método Análise de Quantificação de Recorrência (RQA), utilizando as estruturas de pequena escala do RP, para obter as medidas quantitativas relacionadas a comportamento dinâmico individual de cada bioma.
- VI. Transforma-se os dados para obter-se as séries de anomalias, que diminuem a influência sazonal da série, da seguinte maneira:

$$X_{ij}(t) = \frac{x_{ij}(t) - \langle x_i(t) \rangle}{\sigma_i} \quad (4.2)$$

em que $x(t)$ é o valor observado no tempo t , $\langle x(t) \rangle$ é a média do dia t em todos os anos observados e σ é o desvio padrão do dia.

- VII. A partir das séries temporais normalizadas obtidas no passo VI, estimam-se os parâmetros de imersão, m e τ .
- VIII. Estima-se o limiar ε com uso do método iterativo sugerido por Webber e Zbilut (2005).
- IX. Aplica-se o Método Gráfico de Recorrência (RP) às séries de anomalias individuais dos biomas.
- X. Efetua-se o Método Análise de Quantificação de Recorrência (RQA), utilizando as estruturas de pequena escala (textura) do RP.

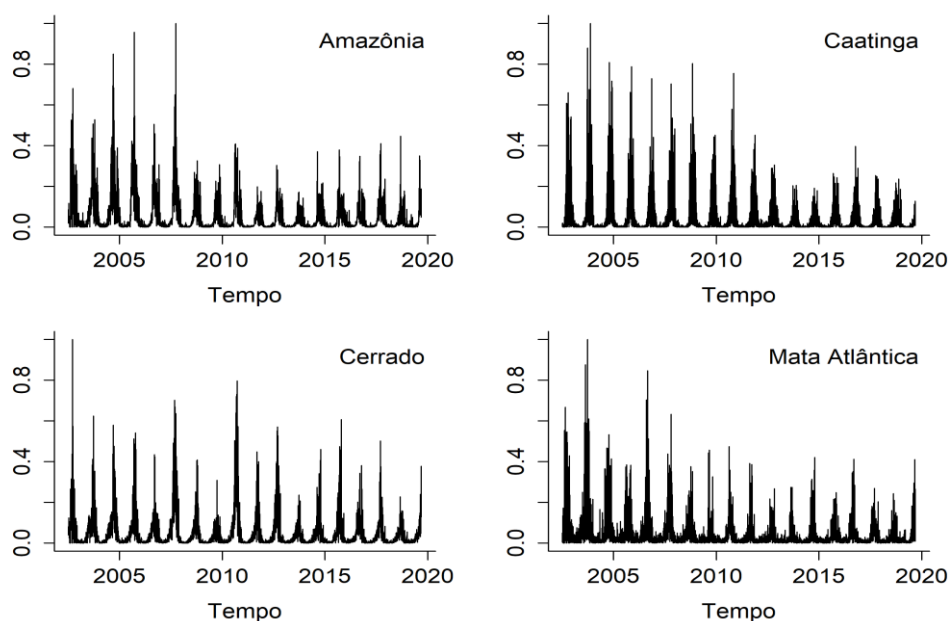
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos a partir das análises das séries temporais diárias de focos de calor dos biomas Amazônia, Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica.

As séries normalizadas dos biomas estudados são apresentadas na Figura 9, cuja análises são feitas a partir da quantidade de focos de calor diários, registrados pelo INPE no intervalo de tempo em evidência. É importante salientar que o bioma que possui o maior registro de focos de calor é a Amazônia, no entanto, analisando os valores absolutos referentes a quantidade de focos de calor de cada bioma, apesar da maior concentração de focos ocorrer no bioma Amazônia, devido sua vasta extensão, o Cerrado é o que apresenta o maior registro por km^2 (DA SILVA et al., 2020).

De acordo com o gráfico (Figura 9), identifica-se que no bioma Amazônia, o mês no qual obteve-se o maior registro de focos foi setembro de 2007, no entanto, foi em 2004 que apresentou a maior quantidade anual. Tanto a Caatinga, quanto a Mata Atlântica tiveram seu maior registro anual em 2003, e o Cerrado em 2007. Dentre os dezoito anos analisados, em 2002, 2003, 2004, 2005, 2007 e 2010, foram observados os maiores quantitativos de focos de calor nesses biomas, ultrapassando o registro de 300.000 focos, ficando significativamente acima da média (241.866 detecções) de focos registrados no país entre 2002 e 2019 (INPE, 2020).

Figura 9 - Séries normalizadas dos biomas.



Fonte: Compilação do autor (2020).

Para a construção dos RP's é necessário definir os seguintes parâmetros de recorrência: tempo de atraso, obtido por meio de informações mútuas; a dimensão de imersão, logrado pelo método dos falsos vizinhos mais próximos (CAO, 1997); e o limiar de recorrência, o qual Webber e Zbilut (2005) sugerem que ele produza um percentual entre 1% e 5% do valor de RR . Assim, o valor de ε utilizado para o RP foi explorado repetidas vezes até que o valor de RR estivesse entre 2% e 5% (COCO; DALE, 2014). Quanto ao valor dos parâmetros citados para os Gráficos de Recorrência dos biomas aqui analisados, encontram-se listados na Tabela 1:

Tabela 1 - Valores dos parâmetros para série de biomas.

	Tempo de atraso - τ	Imersão - m	Limiar - ε
Amazônia	3	10	0,008
Caatinga	3	10	0,006
Cerrado	3	10	0,010
Mata Atlântica	3	11	0,017

Fonte: Compilação do autor (2020).

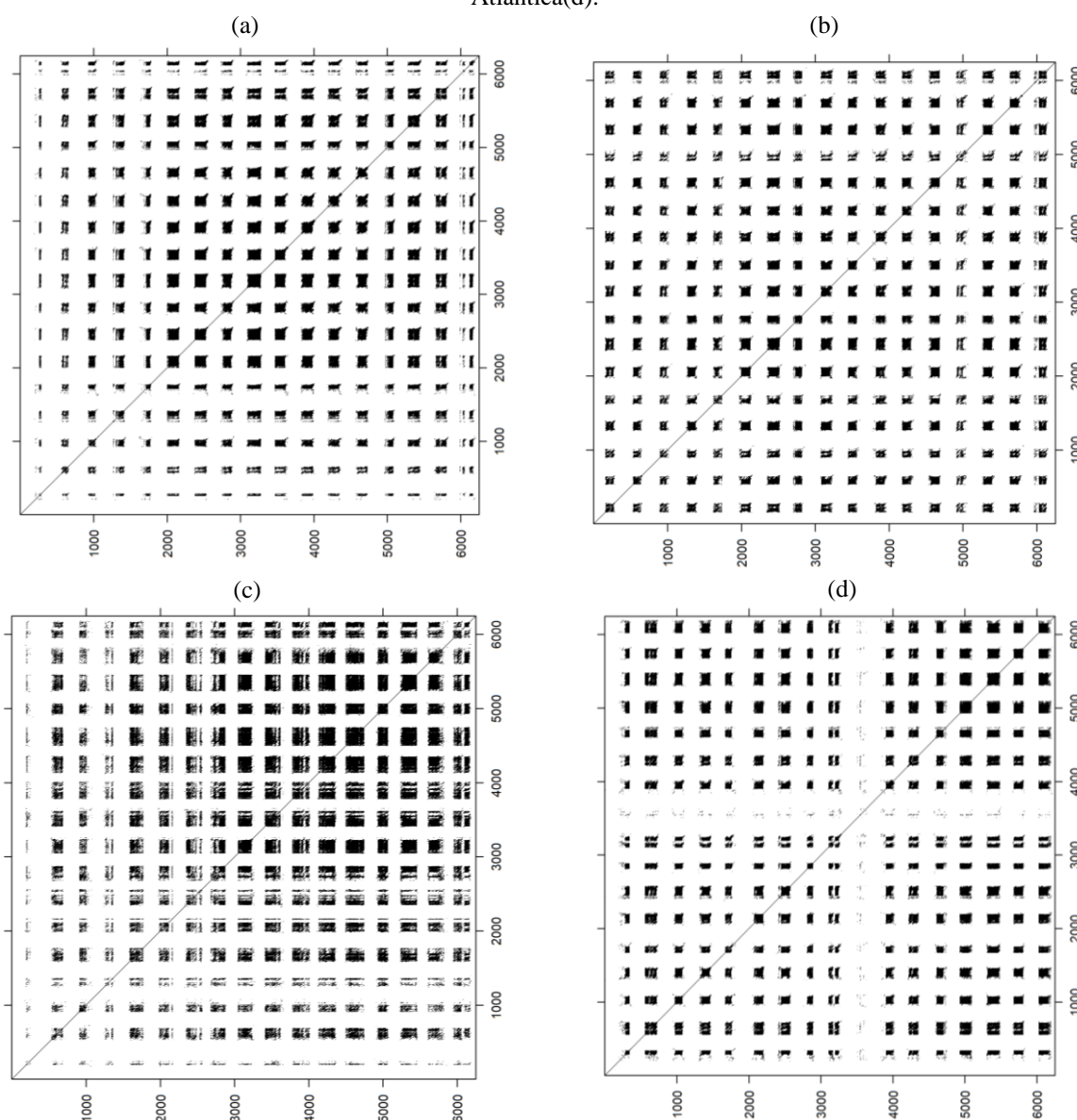
Observa-se, através da Tabela 1, que a incorporação utilizada foi a maior para o bioma Mata Atlântica e no que se refere aos valores do limiar ε para as séries individuais, pode-se concluir que são distintos. Segundo Bastos e Caiado (2011), para aplicação da RQA utiliza-se o valor médio, e neste caso, tem-se, portanto, $\varepsilon = 0,010$. As séries temporais foram construídas com 6.391 valores, que equivalem a 913 semanas.

Os RPs dos biomas estudados são apresentados na Figura 10. A tipologia do gráfico fornece uma visão global, a qual permite analisar os estados no espaço de fase em toda série temporal. Assim, analisando os RPs apresentados na Figura 10, pode-se observar que eles indicam que a variação dos focos de calor não é aleatória, tendo em vista que as parcelas de recorrência não exibem apenas pontos únicos isolados.

Observando o gráfico de recorrência do bioma Cerrado, Figura 10(c), nota-se que nos períodos, aproximadamente, de meados de 2002 ao final de 2003 (~ 1-500dias) e no período de 2005 e 2006 (~1000-1500 dias) há presença de faixas brancas indicando mudanças abruptas na dinâmica do sistema. No RP da Mata Atlântica, Figura 10(d), também se observa uma faixa branca que se destaca em meio as demais no período de 2011 a 2013 (~ 3200-3900 dias), onde podemos observar na Figura 9 as oscilações do número de focos de calor. Após esse período, a densidade de pontos de recorrência

aumenta, mostrando maior similaridade na dinâmica das séries. No RP de Amazonia, Figura 10(a), e Cerrado, Figura 10(c) observa-se padrão “deriva” em que aparece a diminuição de pontos de recorrência em direção ao canto superior esquerdo e inferior direito. Este padrão de larga escala indica que o sistema possui parâmetros que variam lentamente (MARWAN et al., 2007). O RP de caatinga (Figura 10 b) apresenta a estrutura com formato de tabuleiro de xadrez indicando um processo semi periódico (MARWAN et al., 2007). Os demais RPs também apresentam esta estrutura, refletindo a periodicidade das séries originais observado na Figura 5.

Figura 10 - Gráficos de Recorrência dos biomas: Amazônia(a), Caatinga(b), Cerrado(c) e Mata Atlântica(d).



Fonte: Compilação do autor (2020).

As medidas de quantificação da Análise de Quantificação de Recorrência dos biomas foram calculadas e seus valores encontram-se listados na Tabela 2 apresentada a seguir.

Tabela 2 - Análise de Quantificação de Recorrência para os Biomas.

	Amazônia	Caatinga	Cerrado	Mata Atlântica
Taxa de recorrência	0,05	0,077	0,03	0,001
Determinismo	0,72	0,78	0,57	0,18
Comprimento médio da linha diagonal	4,13	5,31	3,79	2,18
Maior comprimento da linha diagonal	161	148	112	36
Entropia de Shannon	0,74	0,89	0,73	0,24
Laminaridade	0,77	0,81	0,64	0,17
Tempo de permanência	5,90	8,50	5,23	2,57

Fonte: Compilação do autor (2020).

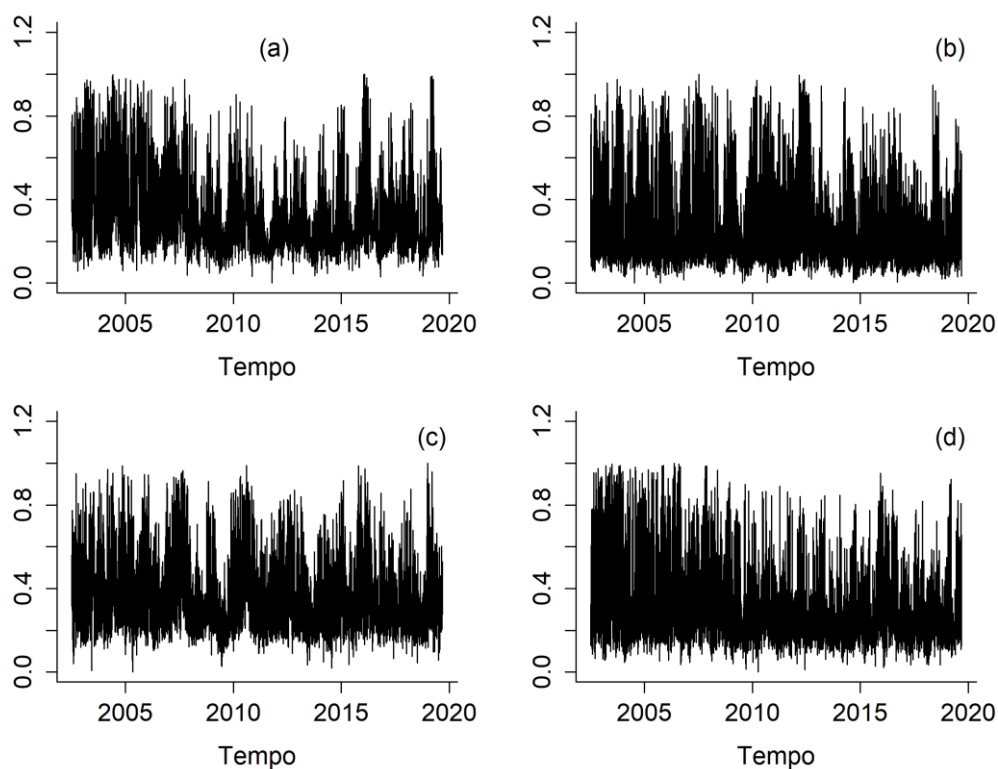
De acordo com os resultados apresentados acima, constata-se diversas propriedades específicas da dinâmica dos focos de calor nos quatro biomas estudados. Nota-se que os valores de todos os índices são os menores para Mata Atlântica e os maiores para caatinga, exceto o valor do comprimento máximo da linha diagonal. Isso indica que as séries de Mata Atlântica são os menos previsíveis (menor determinismo e comprimento médio da linha diagonal), com trajetórias que divergem mais rápido no espaço da fase (menor comprimento máximo da linha diagonal), enquanto a caatinga apresenta uma dinâmica com propriedades opostas (MARWAN et al., 2007). A entropia também foi mais baixa para a Mata Atlântica, indicando menor grau de desordem em relação ao tamanho das linhas diagonais.

A variável tempo de permanência (TT) tem sido menos abordada na literatura e, portanto, algumas considerações devem ser feitas. Essa variável, juntamente com a laminaridade, reflete a persistência de um estado em um determinado intervalo de tempo. Mais especificamente, o TT indica o comprimento médio das linhas verticais no Gráfico de Recorrência. Valores baixos de TT indicam alta complexidade na dinâmica do sistema (“um sistema sem estados laminares”), pois, nessa situação, o sistema permanece por um

curto período em um estado similar ao do momento anterior (DOS SANTOS et al., 2014). Na Tabela 2, constata-se que o tempo de permanência foi relativamente baixo (em relação ao tempo de extensão de RP), indicando o curto tempo em que os sistemas permaneceram num estado laminar. No entanto, tal valor é maior para os focos registrados na caatinga, indicando que a dinâmica dos focos nesse bioma é mais estável, e mais uma vez, a Mata Atlântica apresentou o menor resultado. É importante ressaltar que os biomas se diferenciam em diversos fatores, dentre eles a biodiversidade e a ação do fogo, a qual pode resultar tanto em efeitos positivos para os ecossistemas, quanto degradá-lo (COSTA; RODRIGUES, 2015).

Na Figura 11, estão presentes os gráficos de anomalias dos biomas estudados, em que retira-se a sazonalidade, diminui a variabilidade e observa-se que não há um padrão sazonal anual.

Figura 11 - Séries de anomalias dos biomas: Amazônia(a), Caatinga(b), Cerrado(c) e Mata Atlântica(d).



Fonte: Compilação do autor (2020).

E mais uma vez, para a construção dos RP's, definimos os parâmetros de recorrência: tempo de atraso e dimensão de imersão utilizando informação mútua e vizinhos mais próximos (CAO, 1997) e o limiar de recorrência que produza um percentual

entre 1% e 5% do valor de RR (WEBBER & ZBILUT, 2005; COCO & DALE, 2014). Estes parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos parâmetros para séries dos biomas.

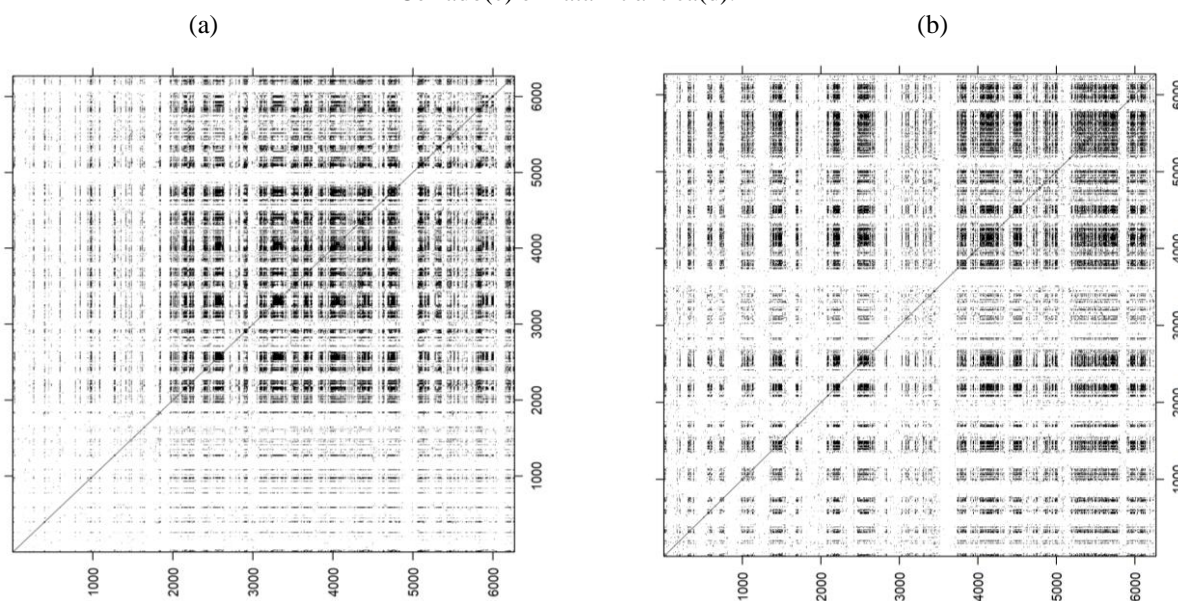
	Tempo de atraso – τ	Imersão - m	Limiar - ϵ
Amazônia	1	11	0,15
Caatinga	1	12	0,18
Cerrado	1	11	0,18
Mata Atlântica	1	12	0,18

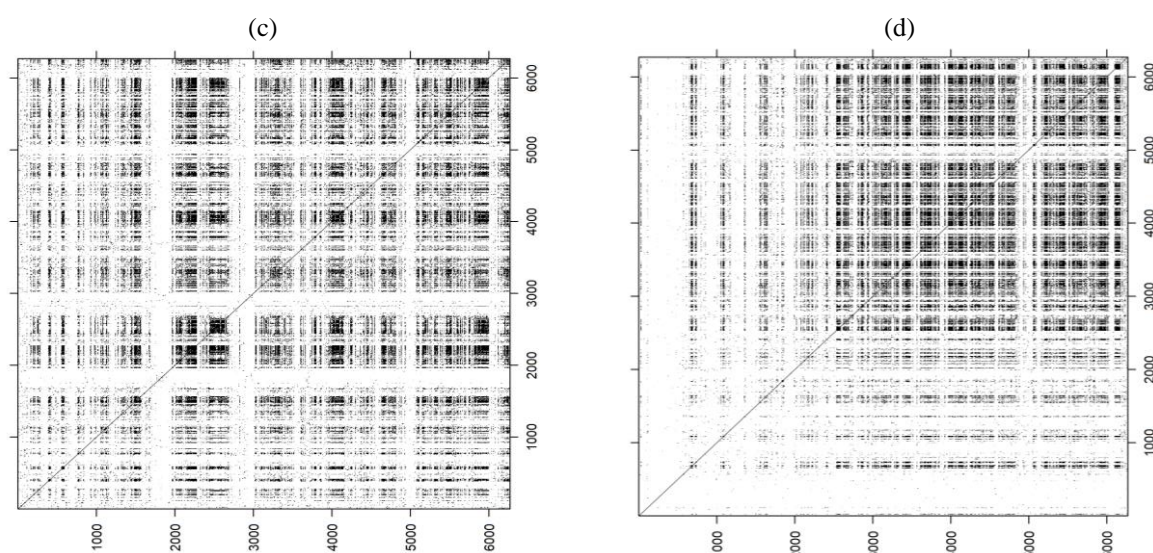
Fonte: Compilação do autor (2020).

Observa-se que a incorporação utilizada foi a maior, sendo $m = 12$, e o limiar usado no RQA foi a média entre os limiares, $\epsilon = 0,17$.

Os Gráficos de Recorrência das séries de anomalias dos biomas abordados, mostram que os dados de focos de calor não se mostraram aleatórios, uma vez que os RPs, neste caso, também não apresentaram pontos isolados, e existem bandas brancas indicando mudanças abruptas na dinâmica dos sistemas. No RP da Amazônia (Figura 12a) e no da Mata Atlântica (Figura 12d) observa-se padrão “deriva” em que aparece uma diminuição de pontos de recorrência em direção ao canto superior esquerdo e inferior direito. Este padrão de larga escala indica que o sistema possui parâmetros que variam lentamente (MARWAN et al., 2007).

Figura 12 - Gráficos de Recorrência das séries de anomalias dos biomas: Amazônia(a), Caatinga(b), Cerrado(c) e Mata Atlântica(d).





Fonte: Compilação do autor (2020)

Observando o RP do bioma Amazônia, Figura 12(a), nota-se que entre, aproximadamente, 2002 a 2007 (~1-2000 dias) destacam-se faixas brancas, após esse período, a densidade de pontos de recorrência aumenta, mostrando maior similaridade na dinâmica das séries. No RP da Caatinga, Figura 12(b), as bandas brancas mais notórias estão compreendidas no período de 2007 a 2008 (~1600-2000 dias) e no período de 2012 (~ 3500-3800 dias). Enquanto no bioma Cerrado, Figura 12(c), visualmente, pode-se observar uma aparência com o gráfico do bioma Amazônia, no entanto, suas bandas brancas estão compreendidas nos intervalos referentes ao ano de 2007 (1600-2000 dias) e em 2010 (~ 2700-3000 dias). Quanto ao RP da Mata Atlântica, as bandas brancas estão situadas no período de 2002 a 2009 (~ 1-2600 dias) e em 2016 (~ 4900-5200 dias). Essas transições podem também ser identificadas na Figura 11.

Tabela 4 - Análise de Quantificação de Recorrência para os biomas.

	Amazônia	Caatinga	Cerrado	Mata Atlântica
Taxa de recorrência	0,04	0,018	0,018	0,023
Determinismo	0,98	0,96	0,96	0,95
Comprimento médio da linha diagonal	7,82	5,91	5,82	5,88
Maior comprimento da linha diagonal	134	72	77	53
Entropia de Shannon	2,77	2,41	2,41	2,46
Laminaridade	0,66	0,42	0,31	0,57
Tempo de permanência	5,14	3,70	3,34	3,74

Fonte: Compilação do autor (2020).

As medidas de quantificação dos RPs alusivas as séries de anomalias dos biomas Amazônia, Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica são exibidas na Tabela 4. O valor da taxa de recorrência foi relativamente baixa para todos os casos, apontando baixa densidade de pontos recorrentes, no entanto, nota-se que foi mais alto para a Amazônia, e conseqüentemente, os estados para esse bioma possui uma maior probabilidade de ocorrência se comparado aos demais. Os valores de laminaridade foram discrepantes para todas as séries, indicando que os processos estocásticos que geram os dados de focos de calor possuem características distintas quanto à intermitência. O tempo médio de previsão, indicado pelo comprimento médio da linha diagonal, foi maior para o bioma Amazônia. Além disso, a série do bioma Mata Atlântica possui o menor valor de L_{max} , indicando que os segmentos de trajetórias divergiram mais rapidamente, ou seja, mostrando-se mais caótica. As taxas de determinismo foram altas para todos os biomas, indicando alta previsibilidade. As taxas de entropia também são elevadas e possuem valores bem próximos uns dos outros, entretanto, as séries da Caatinga e do Cerrado obtiveram a menor taxa, e daí, conclui-se que possuem o mesmo grau de desordem. O tempo de permanência foi baixo, confirmando a alta complexidade na dinâmica dos sistemas e indicando o curto tempo em que os sistemas permaneceram num estado laminar.

6. CONCLUSÕES

O estudo permitiu a análise de aspectos quantitativos e qualitativos da dinâmica dos dados de focos de calor dos biomas Amazônia, Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica, através do Método Gráfico de Recorrência e Análise de Quantificação de Recorrência, os quais possibilitaram a diferenciação entre os estados dos biomas e mostraram-se satisfatórios na identificação das transições ocorridas nas séries temporais dos conjuntos de ecossistemas estudados.

Os Gráficos de Recorrência das séries normalizadas que foram analisados, evidenciaram algumas características observadas na tipologia dos RPs como, por exemplo, a ausência de pontos isolados, indicando que a variação dos focos de calor não é aleatória e refletindo a periodicidade das séries. Algumas particularidades dos biomas também foram apresentadas, como: os RPs da Amazônia e do Cerrado mostraram que o sistema dinâmico de ambos possui parâmetros que variam lentamente e são não-estacionários. A Caatinga apresentou uma estrutura semi periódica, enquanto a Mata Atlântica apresentou uma estrutura descontínua, indicando mudanças repentinas na dinâmica dos sistemas. Quanto a RQA, notou-se que a série temporal da Mata Atlântica foi a que obteve a menor previsibilidade e registrou o maior grau de desordem. A Caatinga apresentou o maior determinismo e comprimento médio da linha diagonal e, conseqüentemente, é a série mais previsível e a dinâmica dos focos nesse bioma é mais estável.

Os RPs das séries de anomalias apresentaram estruturas em larga escala semelhantes aos RPs das séries normalizadas, como: não apresentaram pontos isolados e possuem bandas brancas indicando mudanças abruptas na dinâmica dos sistemas. Quanto as medidas de quantificação, foi possível observar que os processos estocásticos, que geram os dados de focos de calor, possuem características distintas quanto a previsibilidade e à intermitência. As taxas de determinismo foram altas para todos os biomas, indicando alta previsibilidade.

Os resultados obtidos com a metodologia adotada, fornecem novas percepções sobre a distribuição temporal dos focos de calor nos biomas estudados e sobre as propriedades da sua dinâmica, que podem ajudar a entender melhor este fenômeno que é extremamente complexo.

Em um trabalho futuro planeja-se utilizar o método Gráfico de Recorrência para analisar as correlações entre as séries temporais de queimadas e variáveis climáticas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDO, P. M.; BILLIO, M.; GUÉGAN, D. Nonlinear dynamics and recurrence plots for detecting financial crisis. **The North American Journal of Economics and Finance**, v. 26, n. 0, p. 416–435, 2013.
- AFONSO, L. C.; ROSA, G. H.; PEREIRA, C. R.; WEBER, S. A.; HOOK, C.; ALBUQUERQUE, V. H. C.; PAPA, J. P. A recurrence plot-based approach for Parkinson's disease identification. **Future Generation Computer Systems**, v. 94, p. 282-292, 2019.
- ALEIXO, A. L. P.; ALBERNAZ, A. L. K. M.; GRELE, C. E. V.; VALE, M. M.; RANGEL, T. F. Mudanças climáticas e a biodiversidade dos biomas brasileiros: passado, presente e futuro. **Natureza & Conservação**, v. 8, p.194-196, 2010.
- 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.
- ARAGÃO, L. E. O.; 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, n. 7, 2007.
- ARAÚJO, E. A.; RIBEIRO, G. A. Impactos do fogo sobre a entomofauna do solo em ecossistemas florestais. **Natureza & Desenvolvimento**, v. 1, n. 1, p. 75-85, 2005.
- ARBEX, Marcos Abdo et al. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 30, n. 2, p. 158-175, 2004.
- ARCHIBALD, S.; ROY, D. P.; VAN WILGEN, B. W.; SCHOLE, R. J. What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. **Global Change Biology**, v. 15, n. 3, p. 613-630, 2009.
- BASTOS, J. A.; CAIADO, J. Recurrence quantification analysis of global stock markets. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 390, n. 7, p. 1315-1325, 2011.
- BATISTA, A. C. Detecção de incêndios florestais por satélite. **Revista Floresta**, v. 34, n. 2, p. 237-241, 2004.
- BOARETTO, B. R. Otimização da análise de recorrência utilizando placas de vídeo em tecnologia CUDA. In: **II Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia**. 2017.
- BOWMAN, D. M.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A.; ... ; PYNE, S. J. Fire in the Earth system. **Science**, v. 324, n. 5926, p. 481-484, 2009.
- BRANDO, P. M.; BALCH, J. K.; NEPSTAD, D. C.; MORTON, D. C.; PUTZ, F. E.; COE, M. T.; ... ; SOARES-FILHO, B. S. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–

fire interactions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 17, p. 6347-6352, 2014.

BRASIL, A. Queimadas e incêndios florestais. **Jornal Ambiente Brasil**, 2014. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/florestal/artigos/queimadas/incendios_florestais.html>. Acesso em: 10 abr. 2020.

CAMPO, J.; ANDREU, V.; GIMENO-GARCÍA, E.; GONZÁLEZ, O.; RUBIO, J. L. Occurrence of soil erosion after repeated experimental fires in a Mediterranean environment. **Geomorphology**, v. 82, n. 3-4, p. 376-387, 2006.

CAO, L. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 110, n. 1-2, p. 43-50, 1997.

CAPECHE, C. L. Impactos das Queimadas na Qualidade do Solo – Degradação Ambiental e Manejo e Conservação do Solo e Água. **In: Embrapa Solos-Resumo em anais de congresso (ALICE). In: II ENCONTRO CIENTÍFICO DO PARQUE ESTADUAL DOS TRÊS PICOS**, 2010. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012. 651 p.

CERTINI, G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. **Oecologia**, v. 143, n. 1, p. 1-10, 2005.

COCO, M. I.; DALE, R. Cross-recurrence quantification analysis of categorical and continuous time series: an R package. **Frontiers in psychology**, v. 5, p. 510, 2014.

COSTA, D. G.. **Uso de gráfico de recorrência e redes complexas para caracterização de sistemas complexos de baixa dimensão**. 2014. Dissertação de Mestrado. Master's thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2014.

COSTA, Y. T.; RODRIGUES, S. C. Efeito do fogo sobre vegetação e solo a partir de estudo experimental em ambiente de cerrado. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 30, p. 149-165, 2015.

DA SILVA, J. M.; ARAÚJO, L. S.; STOSIC, T.; STOSIC, B. Análise de séries temporais de focos de calor em biomas brasileiros utilizando o Grafo de Visibilidade Horizontal. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e308996276-e308996276, 2020.

DE SANTANA, L. I. T.; DA SILVA, J. M.; ARAÚJO, L. S.; MOREIRA, G. R.; STOSIC, T. Análise de quantificação de recorrência de preços brasileiros do milho, da soja e da carne de frango. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e9979109461-e9979109461, 2020.

DI NARZO, A. F. **tseriesChaos: Analysis of Nonlinear Time Series**. R package version 0.1-13.1. 2019. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=tseriesChaos>>

DOS SANTOS, L.; BARROSO, J. J.; DE GODOY, M. F.; MACAU, E. E.; FREITAS, U. S. Recurrence quantification analysis as a tool for discrimination among different dynamics classes: the heart rate variability associated to different age groups. In: **Translational recurrences**. Springer, Cham, 2014. p. 125-136.

Mata Atlântica – SOS Mata Atlântica. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/conheca/mata-atlantica/>>. Acesso em: 21 jan. 2021.

DWYER, E.; PINNOCK, S.; GRÉGOIRE, J. M.; PEREIRA, J. M. C. Global spatial and temporal distribution of vegetation fire as determined from satellite observations. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 6-7, p. 1289-1302, 2000.

ECKMANN, J. P.; KAMPHORST, S. O.; RUELLE, D. Recurrence Plots of Dynamical Systems. **EPL (Europhysics Letters)**, v. 4, n. 9, p. 973-977, 1987.

FACCHINI, A.; MOCENNI, C.; MARWAN, N.; VICINO, A.; TIEZZI, E. Nonlinear time series analysis of dissolved oxygen in the Orbetello Lagoon (Italy). **ecological modelling**, v. 203, n. 3-4, p. 339-348, 2007

FAUSTINE, A.; PEREIRA, L.; KLEMENJAK, C. Adaptive Weighted Recurrence Graphs for Appliance Recognition in Non-Intrusive Load Monitoring. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2020.

FEARNSIDE, P. M. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, v. 16, n. 44, p. 99-123, 2002.

FRANÇA, H.; NETO, M.B.; SETZER, A. W. **O fogo no Parque Nacional das Emas**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007.

GARCIA, C. A. **nonlinearTseries: Nonlinear Time Series Analysis**. [S.I.], 2019. R package version 0.2.6. Disponível em: <http://CRAN.R-project.org/package=nonlinearTseries>.

GIGLIO, L.; CSISZAR, I.; JUSTICE, C. O. Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors. **Journal of geophysical research: Biogeosciences**, v. 111, n. G2, 2006.

GONTIJO, G. A.; PEREIRA, A. A.; OLIVEIRA, E. D. S.; JÚNIOR, F. Detecção de queimadas e validação de focos de calor utilizando produtos de Sensoriamento Remoto. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 15, p. 7966-7973, 2011.

GOSWAMI, B.; MARWAN, N.; FEULNER, G.; KURTHS, J. How do global temperature drivers influence each other?. **The European Physical Journal Special Topics**, v. 222, n. 3-4, p. 861-873, 2013.

GOH, K. T.; SCHWELA, D.; GOLDAMMER, J.; SIMPSON, O. Health Guidelines for Vegetation Fire Events: Background Papers. 1999.

HERAWATI, H.; SANTOSO, H. Tropical forest susceptibility to and risk of fire under changing climate: A review of fire nature, policy and institutions in Indonesia. **Forest Policy and Economics**, v. 13, n. 4, p. 227-233, 2011.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - Ministério do Meio Ambiente. **Fauna Silvestre**. Disponível em <<http://www.ibama.gov.br/fauna-silvestre>> Acesso em: 15 abr.2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://cnae.ibge.gov.br/en/component/content/94-7a12/7a12-vamos-conhecer-o-brasil/nosso-territorio/1465-ecossistemas.html?Itemid=101>>. Acesso em: 15 abr. 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2004. Disponível em: <<https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html>>. Acesso em: 15 abr. 2020a.

ICHOKU, C.; GIGLIO, L.; WOOSTER, M. J.; REMER, L. A. Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 2950-2962, 2008.

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Apostila para Formação de Brigadista de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais. **Diretoria de unidades de conservação de Proteção Integral**, Coordenação Geral de Proteção Ambiental. Brasília, 2010. 87 p.

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2020. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/portal/ultimas-noticias/20-geral/10308-hoje-22-e-o-dia-internacional-da-biodiversidade>>. Acesso em: 16 abr. 2020.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Coordenação geral de observação da terra. Prodes – Incremento anual de área desmatada no Cerrado Brasileiro**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/cerrado>> Acesso em: 30 abr. 2020.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios**. Disponível em: <<http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal/informacoes/perguntas-frequentes>> Acesso em: 10 abr. 2020a.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Observação da Terra**. 2019. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>> Acesso em: 12 abr. 2020.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Notícia**. 2019a. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5115> Acesso em: 12 abr. 2020.

JUSTINO, F. B.; SOUZA, S. S.; SETZER, A. Relação entre focos de calor e condições meteorológicas no Brasil. In: **Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**. 2002. p. 2086-2093.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian cerrado. **Conservation biology**, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2005.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 12, 2011.

MARWAN, N.; WESSEL, N.; MEYERFELDT, U.; SCHIRDEWAN, A.; KURTHS, J. Recurrence-plot-based measures of complexity and their application to heart-rate-variability data. **Physical review E**, v. 66, n. 2, p. 026702, 2002

MARWAN, N.; THIEL, M.; NOWACZYK, N. R. Cross recurrence plot based synchronization of time series. **Nonlinear processes in Geophysics**, v. 9, n. 3/4, p. 325-331, 2002a.

MARWAN, N. **Encounters with neighbours: current developments of concepts based on recurrence plots and their applications**, 2003.

MARWAN, N.; KURTHS, J. Line structures in recurrence plots. **Physics Letters A**, v. 336, n. 4-5, p. 349-357, 2005.

MARWAN, N.; ROMANO, M. C.; THIEL, M.; KURTHS, J. Recurrence plots for the analysis of complex systems. **Physics Reports**, v. 438, n. 5-6, p. 237–329, 2007.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Biomás**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biomás>. Acesso em: 25 abr. 2020.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/images/arquivos/areas_protegidas/snuc/Livro%20SNUC%20PNAP.pdf. Acesso em: 25 abr. 2020a.

MONTEIRO, L. H. **Sistemas dinâmicos**. Editora Livraria da Física, 2002.

MUÑOZ-ROJAS, M.; LEWANDROWSKI, W.; ERICKSON, T. E.; DIXON, K. W.; MERRITT, D. J. Soil respiration dynamics in fire affected semi-arid ecosystems: Effects of vegetation type and environmental factors. **Science of the Total Environment**, v. 572, p. 1385-1394, 2016.

NSF. Complex Environmental Systems. 2003. Disponível em: http://www.nsf.gov/geo/ere/ereweb/ac-ere/acere_synthesis_rpt_summary.pdf>Acesso em: 04 mai. 2020.

OZKEN, I.; EROGLU, D.; BREITENBACH, S. F.; MARWAN, N.; TAN, L.; TIRNAKLI, U.; KURTHS, J. Recurrence plot analysis of irregularly sampled data. **Physical Review E**, v. 98, n. 5, p. 052215, 2018.

PIVELLO, V. R. The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: past and present. **Fire ecology**, v. 7, n. 1, p. 24-39, 2011.

POINCARÉ, H. Sur les équations aux dérivées partielles de la physique mathématique. **American Journal of Mathematics**, p. 211-294, 1890.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019. Disponível em: <http://www.R-project.org/>.

RAMOS, L. F.; OLIVEIRA, M.; SORIANO, B. M. Análise da distribuição de focos de calor no Pantanal brasileiro em 2017. In: **Embrapa Pantanal-Resumo em anais de congresso (ALICE)**. In: EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO PANTANAL, 6.; SEMANA DA

BIOLOGIA, 13., 2018, Corumbá. Resumos... Corumbá: Embrapa Pantanal, 2018. (Embrapa Pantanal. Eventos Científicos), 2018.

REDIN, M.; SANTOS, G. D. F. D.; MIGUEL, P.; DENEGA, G. L.; LUPATINI, M.; DONEDA, A.; SOUZA, E. L. D. Impactos da queima nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 381-392, 2011.

REIS, B. F.; MACAU, E.; QUILES, M. G.; DOMINGUES, M. O. Uso de transformada wavelet discreta ortogonal e gráfico de recorrência para caracterização de sistemas dinâmicos não-lineares. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 4, n. 1, 2016.

RIBEIRO, G. A.; BONFIM, V. R. Incêndio florestal versus queima controlada. **Revista Ação Ambiental**, v. 12, p. 8-11, 2000.

RIBEIRO, J.P.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. **Cerrado: ecologia e flora**, v. 1, p. 151-212, 2008.

RODRIGUES, C. A. G. Efeitos do fogo e da presença animal sobre a biomassa aérea e radicular, nutrientes do solo, composição florística, fenologia e dinâmica de um campo de capim-carona (*Elyonurus muticus* (Spreng.) O. Ktze.) no Pantanal (sub-região de Nhecolândia). **Embrapa Pantanal-Tese/dissertação (ALICE)**, 1999.

ROMANO, M. C.; THIEL, M.; KURTHS, J.; KISS, I. Z.; HUDSON, J. L. Detection of synchronization for non-phase-coherent and non-stationary data. **EPL (Europhysics Letters)**, v. 71, n. 3, p. 466, 2005.

RUNNOVA, A.; SELSKII, A.; ZHURAVLEV, M.; EMELYANOVA, E.; SELSKAYA, E. The recurrence plot analysis in the processing of experimental biomedical data. In: **Saratov Fall Meeting 2019: Computations and Data Analysis: from Nanoscale Tools to Brain Functions**. International Society for Optics and Photonics, 2020. p. 114590F.

RUSTICI, M.; CARAVATI, C.; PETRETTO, E.; BRANCA, M.; MARCHETTINI, N. Transition Scenarios during the Evolution of the Belousov–Zhabotinsky Reaction in an Unstirred Batch Reactor. **The Journal of Physical Chemistry A**, v. 103, n. 33, p. 6564-6570, 1999.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **Bell system technical journal**, v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948.

SHELHAMER, M. On the correlation dimension of optokinetic nystagmus eye movements: computational parameters, filtering, nonstationarity, and surrogate data. **Biological Cybernetics**, v. 76, n. 4, p. 237-250, 1997.

SILVÉRIO, D.; SILVA, S.; ALENCARA, A.; MOUTINHOA, P. Amazônia em chamas. **Nota técnica do Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia – IPAM**. Recuperado de: <https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2019/08/NT-Fogo-Amaz%C3%B4nia-2019.pdf>, 2019.

SOARES, R. V.; BATISTA, A.C. **Incêndios florestais: controle, efeitos e uso do fogo**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007.

SOUZA, E. G. Caracterização de sistemas dinâmicos através de gráficos de recorrência. **Universidade Federal do Paraná. Tese de doutorado**, 2008.

STAN, C.; CRISTESCU, C. P.; DIMITRIU, D. G. Analysis of the intermittent behavior in a low-temperature discharge plasma by recurrence plot quantification. **Physics of Plasmas**, v. 17, n. 4, p. 042115, 2010.

TAVARES, S. D. L.; MELO, A. D. S.; DE ANDRADE, A. G.; ROSSI, C. Q.; CAPECHE, C. L.; BALIEIRO, F. D. C.; ... ; PIMENTA, T. S. Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação. **Embrapa Solos-Documentos (INFOTECA-E)**, 2008.

THIEL, M.; ROMANO, M. C.; KURTHS, J.; MEUCCI, R.; ALLARIA, E.; ARECCHI, F. T. Influence of observational noise on the recurrence quantification analysis. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 171, n. 3, p. 138-152, 2002.

TORRES, F. T. P.; ROQUE, M. P. B.; LIMA, G. S.; MARTINS, S. V.; DE FARIA, A. L. L. Mapeamento do risco de incêndios florestais utilizando técnicas de geoprocessamento. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 0-0, 2017.

VIEIRA, A. C.; MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; GUIMARÃES, M. C.; FREITAS, M. S.; PECORARO, D. Fogo e seus efeitos na qualidade do solo de pastagem. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 06, p. 1703-1711, 2016.

WEBBER JR, C. L.; ZBILUT, J. P. Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. **Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences**, v. 94, p. 26-94, 2005.

WENDI, D.; MARWAN, N. Gráfico de recorrência estendido e quantificação para sistemas dinâmicos contínuos ruidosos. **Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science**, v. 28, n. 8, pág. 085722, 2018.

WHELAN, R. J. **The ecology of fire**. Cambridge university press, 1995.

ZBILUT, J. P.; WEBBER JR, C. L. Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots. **Physics letters A**, v. 171, n. 3-4, p. 199-203, 1992.

ZBILUT, J. P.; GIULIANI, A.; WEBBER JR, C. L. Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross-recurrence quantification. **Physics Letters A**, v. 246, n. 1-2, p. 122-128, 1998.