UFRPE

Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento de Física
Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada

Uso de redes complexas para análise de conexões espaciais de precipitação em Pernambuco, Brasil

Giovanna Ferreira dos Santos

Dissertação de Mestrado
Recife-PE
Agosto de 2024

Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento de Física
Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada

Giovanna Ferreira dos Santos

Uso de redes complexas para análise de conexões espaciais de precipitação em Pernambuco, Brasil

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada do Departamento de Física da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Física Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Borko Stosic

Dissertação de Mestrado
Recife-PE
Agosto de 2024

Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento de Física
Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada

Giovanna Ferreira dos Santos

Uso de redes complexas para análise de conexões espaciais de precipitação em Pernambuco, Brasil

Dissertação de mestrado julgada ? para obtenção do título de mestre em Física Aplicada e ? por unanimidade em agosto de 2024 pela comissão examinadora.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Borko Stosic
Orientador - DEINFO/UFRPE

Prof. Dr. Lucian Bejan
Examinador Interno - DEINFO/UFRPE

Profa. Dra. Lidiane da Silva Araújo
Examinador Externo - Universidade Federal do Pampa

Resumo

A precipitação é o principal componente do ciclo hidrológico e sua variabilidade temporal e espacial afeta vários setores econômicos, ecossistemas e saúde humana. Compreender a variabilidade da precipitação em diferentes escalas temporais e espaciais contribui para um melhor planejamento de medidas de curto e longo prazo para mitigar condições perigosas relacionadas à água, como inundações e secas, que se espera intensificarem ao longo deste século em uma grande proporção de terras tropicais. A região Nordeste do Brasil (NEB) cobre 18,26% (1.542.000 km^2) de todo o território do país e com mais de 53 milhões de habitantes é uma das regiões mais densas afetadas pelas secas na escala mundial e uma das áreas mais vulneráveis aos impactos das alterações climáticas. A precipitação apresenta alta variabilidade no tempo e no espaço pelo fato de depender da combinação de diversos fatores (características topográficas, condições climáticas, uso do solo, proximidade com superfícies de água, entre outros) tornando-se extremamente desafiador realizar análises empíricas, modelagens e previsões. Embora os métodos clássicos estatísticos continuem a ser a principal ferramenta em estudos hidrológicos, novos conceitos da ciência de sistemas complexos fornecem uma variedade de abordagens quantitativas, como a Teoria do Caos, Análise Fractal e Multifractal e Redes Complexas que foram usadas com sucesso para avaliar a não linearidade e a complexidade geral da dinâmica da chuva. Neste trabalho foi estudada a variabilidade espacial do regime de precipitação no estado de Pernambuco. O método de redes complexas foi usado para identificar as conexões espaciais e as localizações vizinhas dentro das redes geradas. Os índices que descrevem a topologia das redes foram calculados para diferentes limiares de coeficiente Pearson entre as séries temporais diárias de precipitação a partir de dados de satélite TRMM. Os resultados mostraram que: i) o índice grau de vértice diminui com o aumento do limiar de coeficiente Pearson, sendo maior na região do Sertão do São Francisco; ii) para limiares de Pearson baixos e intermediários, o índice grau de vértice global é o maior para o Sertão, enquanto para limiares altos, os valores maiores foram obtidos para a Zona da Mata; iii) o índice coeficiente de agrupamento diminui com o aumento do coeficiente Pearson, sendo maior na região da Zona da Mata e do sudoeste do Sertão; iv) para todos os limiares de Pearson, o valor de coeficiente de agrupamento global é o maior para Zona da Mata e o menor para o Agreste. Estes resultados indicam

que as conexões espaciais da precipitação reveladas com uso de redes complexas refletem a variabilidade espacial do regime de chuva no estado de Pernambuco.

Palavras-Chave: Precipitação; Pernambuco; Chuva; Variabilidade; Redes Complexas.

Abstract

Precipitation is a key component of the hydrological cycle, and its temporal and spatial variability affects various economic sectors, ecosystems, and human health. Understanding precipitation variability across different temporal and spatial scales contributes to better planning for short- and long-term measures to mitigate water-related hazards such as floods and droughts, which are expected to intensify throughout this century in a significant portion of tropical lands. The Northeast region of Brazil (NEB) covers 18.26% (1,542,000 km^2) of the country's territory and, with over 53 million inhabitants, is one of the most densely populated regions affected by droughts on a global scale and one of the most vulnerable areas to the impacts of climate change. Precipitation exhibits high variability in time and space due to its dependence on a combination of factors (topographic features, climatic conditions, land use, proximity to water bodies, among others), making empirical analysis, modeling, and forecasting extremely challenging. While classical statistical methods remain the primary tool in hydrological studies, new concepts from complex systems science provide a range of quantitative approaches, such as Chaos Theory, Fractal and Multifractal Analysis, and Complex Networks, which have been successfully used to assess the nonlinearity and overall complexity of rainfall dynamics. This study investigated the spatial variability of precipitation patterns in the state of Pernambuco. The complex networks method was used to identify spatial connections and neighboring locations within the generated networks. Indices describing the network topology were calculated for different Pearson correlation thresholds between daily precipitation time series from TRMM satellite data. The results showed that: i) the vertex degree index decreases with increasing Pearson correlation threshold, being highest in the Sertão do São Francisco region; ii) for low and intermediate thresholds of Pearson, the global vertex degree index is the highest for Sertão, while for high thresholds, the highest values were obtained for Zona da Mata; iii) the clustering coefficient index decreases with increasing Pearson correlation, being highest in the Zona da Mata and the southwestern Sertão; iv) for all thresholds of Pearson, the global clustering coefficient value is highest in the Zona da Mata and lowest in the Agreste. These results indicate that the spatial connections of precipitation revealed through complex networks reflect the spatial variability of rainfall patterns in the state of Pernambuco.

Keywords: Precipitation; Pernambuco; Rain; Variability; Complex Networks.

Lista de Figuras

Página

4.1 Posição do Estado de Pernambuco no Brasil, com as três regiões: Zona da Mata, Agreste e Sertão. 24
4.2 Estado de Pernambuco com grade TRMM: Vermelho (Zona da Mata), Verde (Agreste), Azul (Sertão). 24

5.1 Grau do vértice da rede TRMM de chuva diária em Pernambuco. As redes são construídas utilizando o coeficiente Pearson com limiares T = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 e 0.8. 27
5.2 Coeficiente de agrupamento da rede TRMM de chuva diária em Pernambuco. As redes são construídas utilizando o coeficiente Pearson com limiares T = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 e 0.8. 29

Lista de Tabelas

Página

5.1 Grau de vértice global (com desvio padrão) da rede TRMM da chuva diária em Pernambuco para diferentes limiares de coeficiente Pearson. 26

5.2 Grau de vértice global (com desvio padrão) da rede TRMM da chuva diária em Zona da Mata, Agreste e Sertão para diferentes limiares de coeficiente Pearson. 28

5.3 Coeficiente de agrupamento global (com desvio padrão) da rede TRMM da chuva diária em Pernambuco para diferentes limiares de coeficiente Pearson. 29

5.4 Coeficiente de agrupamento global (com desvio padrão) da rede TRMM da chuva diária em Zona da Mata, Agreste e Sertão para diferentes limiares de coeficiente Pearson. 30

Sumário

Página

1 Introdução **10**

2 Objetivos **13**

2.1 Objetivo Geral 13

2.2 Objetivos Específicos 13

3 Revisão Bibliográfica **14**

3.1 Ciclo Hidrológico 14

3.1.1 Precipitação 15

3.1.2 Classificações das Precipitações 17

3.1.3 Precipitação na Região Nordeste do Brasil 18

3.2 Redes Complexas 19

3.2.1 Medidas de Redes Complexas 20

4 Dados e Metodologia **23**

4.1 Área de estudo 23

4.2 Dados 23

4.3 Metodologia 24

4.4 Software 25

5 Resultados e Discussões **26**

6 Conclusões **32**

Referências Bibliográficas **33**

Capítulo 1

Introdução

Meteorologia é a ciência que analisa os fenômenos atmosféricos da Terra. O estudo do comportamento dos elementos meteorológicos que compõem as características climáticas terrestres é de suma importância para análise e compreensão dos processos atmosféricos, previsões e investigações climáticas, com aplicações em diversas áreas de estudo, como na hidrologia, ecologia, agricultura e economia.

Compreendida como toda a água que atinge a superfície terrestre sob diversas formas, quais sejam: chuva, granizo, neve, neblina, entre outras, diferentes apenas no estado físico em que a água se encontra [1], a precipitação é um importante elemento meteorológico e o principal componente do ciclo hidrológico cuja variabilidade espaço-temporal está intimamente ligada a setores econômicos, ecossistemas e saúde humana [2–4].

O estudo do comportamento da precipitação é possível através da análise de dados que incluem índices estatísticos como intensidade, frequência, duração, variabilidade espacial e temporal, entre outros. A obtenção desses dados é crucial para a aplicação prática em diversas áreas, como balanço hídrico, análise de secas e inundações, impacto das mudanças climáticas nos sistemas hidrológicos, vazões ligadas a hidroeletricidade, entre outras inúmeras aplicações [5]. A confiabilidade dos resultados das aplicações dos dados obtidos depende diretamente da qualidade e quantidade dos mesmos.

Na hidrologia, as conexões estão por toda parte. No ciclo hidrológico, cada componente (precipitação, evaporação, infiltração, escoamento) está conectado a todos os outros, e as conexões existem também dentro de cada um dos seus elementos individuais: por exemplo, há conexões temporais e espaciais no processo de precipitação [6].

No entanto, a compreensão da origem e extensão das conexões nos sistemas hidrológicos continua sendo um enorme desafio, isso porque a precipitação apresenta alta variabilidade no tempo e no espaço, por depender da combinação de diversos fatores, como características topográficas, condições climáticas, uso do solo, proximidade com superfícies de água, entre outros, tornando-se extremamente desafiador realizar análises empíricas, modelagens e previsões. Em contrapartida, a compreensão da variabilidade

da precipitação permite melhores planejamentos na adoção de medidas a curto e longo prazo com o intuito de minimizar os impactos do excesso e da ausência da água, como inundações e secas, cujos dados revelam a intensificação desses fenômenos ao longo do século XXI em grandes proporções de terras tropicais [7]. Por esse motivo, é necessário que os dados de precipitação coletados de pluviômetros, tradicional instrumento utilizado na captação de informações de chuva, sejam precisos e confiáveis, para evitar erros na representação do funcionamento de bacias hidrogŕaficas, por exemplo. Com isso, tornou-se necessário o desenvolvimento de novos métodos de coleta de dados de precipitação afim de minimizar problemas na obtenção de informações erradas, bem como permitir que coletas sejam realizadas em áreas remotas de dificil acesso, possibilitando um vasto e detalhado monitoramento de grandes áreas.

Com o avanço da tecnologia, novos métodos de coleta de informações surgiram com o intuito de obter dados cada vez mais confiáveis e que abranjam áreas antes não monitoradas por problemas de acesso, por exemplo, o que demandaria grandes investimentos para instalação e manutenção de postos pluviométricos. Um desses métodos envolve o uso de satélites para coletar dados que permitirão estimar valores de precipitação a partir de sensores desenvolvidos para detecção de chuva [8]. São muitos os benefícios da utilização de satélites para recolher dados de precipitação, pois possibilitam altas resoluções de dados em tempo real de forma constante, monitoramento em larga escala, obtenção de dados escassos em determinadas regiões e economia de recursos financeiros [9, 10].

Embora os dados de precipitação fornecidos por satélites sejam mais precisos (possuem alta resolução espacial e temporal) que os gerados por fontes tradicionais como o pluviômetro, ainda assim esses dados estão passíveis de erros, principalmente por se tratarem de medidas indiretas. Dessa forma, para regiões de topografia complexa é necessário que os dados coletados através de satélites sejam validados a partir de observações terrestres visando garantir a confiabilidade das informações colhidas e a segurança de suas diversas aplicações [8, 11]. Apesar dos métodos clássicos estatísticos continuarem sendo a principal ferramenta em estudos hidrológicos, o desenvolvimento de novos conceitos no campo da ciência de sistemas complexos como a teoria do caos [12], análise fractal e multifractal [13], e redes complexas [14] (usadas com sucesso para avaliar a não linearidade e a complexidade geral da dinâmica da chuva) emergem como uma alternativa de análise de variabilidade espaçotemporal da chuva [15].

Redes complexas são compreendidas como grafos com estrutura topográfica não trivial. Constituídas por elementos interagentes compostos por nós conectados entre si através de links, as redes complexas têm sido recentemente aplicadas em diversos áreas de conhecimento, como biologia, sociologia, economia, ciência da computação, entre outros [16,17]. No estudo de conexões espaciais de precipitação, uma rede complexa permite uma melhor compreensão da variabilidade temporal e espacial da precipitação a partir da análise das relações entre estações pluviométricas, revelando informações que podem não

ser identificadas por meio de métodos tradicionais [15]. Nos últimos anos os conceitos de redes complexas têm sido aplicados em diversos estudos dos dados de precipitação. Malik et al. [18] examinou as características espaciais e temporais das chuvas de monções do verão indiano. Boers et al. [14] usaram métodos semelhantes para fornecer uma classificação de precipitação para o Sistema de Monções da América do Sul. Sivakumar e Woldemeskel [15] aplicaram as ideias de redes complexas para examinar as características espaciais da dinâmica da precipitação na Austrália através da observação de 230 estações pluviométricas. Scarsoglio et al. [19] examinaram a variabilidade temporal e espacial da precipitação anual em todo o mundo aplicando o método de redes complexas. Diversos outros estudos acerca da aplicação da teoria das redes complexas na análise das conexões espaciais de precipitação foram realizados na última década por autores como Gadhawe et al. [9], Jha et al. [20], Agarwal et al. [21], Tiwari et al. [22], entre outros.

A região Nordeste do Brasil (NEB) compreende 18,26% (1.542.000 km^2) de todo o território nacional. Com mais de 53 milhões de habitantes é uma das regiões mais afetadas pelas secas em escala mundial, e uma das áreas mais vulneráveis aos impactos das alterações climáticas. O NEB é formado por nove estados brasileiros que formam o Polígono das Secas, cuja população é profundamente afetada pelas consequências ambientais, econômicas e sociais das secas recorrentes [23]. Entre eles está o estado de Pernambuco, caracterizado pelo clima tropical e a diversidade de condições climáticas, com predominância de altas temperaturas ao longo do ano. Com base nas projeções regionais de mudanças climáticas, espera-se que a região seja afetada pelo déficit de chuvas e aumento da aridez na segunda metade do século XXI [24]. A variabilidade espacial e temporal da precipitação no NEB foi extensivamente estudada para a região seca do interior, enquanto a compreensão dos padrões de precipitação das partes leste e sul permanece incompleta.

Neste trabalho, temos como objetivo estudar a variabilidade espacial do regime de preciptação no estado de Pernambuco. Utilizaremos o método das redes complexas para identificar as conexões espaciais e as localizações vizinhas dentro das redes geradas. Os índices das redes serão usados para comparar as regiões com diferentes condições climáticas (Zona da Mata, Agreste e Sertão).

Esperamos que os resultados dessas análises possam fornecer novas informações sobre a variação espacial do regime de chuva no estado de Pernambuco, incluindo a relação com fatores naturais e antrópicos, como condições climáticas, cobertura vegetal, entre outros.

A dissertação está dividida nos seguintes capítulos. O Capítulo 2 contém os objetivos geral e específicos. O Capítulo 3 aborda a revisão da literatura sobre o fenômeno estudado e a fundamentação teórica das redes complexas. No Capítulo 4 são descritos os dados utilizados para a análise e a metodologia empregada. Os resultados e a discussão são apresentados no Capítulo 5. As conclusões finais e a proposta para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

Capítulo 2

Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Estudar variabilidade e conexões espaciais do regime de precipitação em Pernambuco utilizando redes complexas.

2.2 Objetivos Específicos

Estabelecer relações entre os resultados baseados na teoria de redes complexas e as propriedades do clima, em Pernambuco, comparando Zona da Mata, Agreste e Sertão.

Examinar as relações entre índices da rede e limiar de coeficiente Pearson.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

3.1 Ciclo Hidrológico

A água é um recurso natural renovável essencial à vida e ao desenvolvimento social e econômico dos países [1]. Sua distribuição ao longo do planeta Terra ocorre de forma constante desde o surgimento da humanidade, podendo ser encontrada em três principais reservatórios: nos continentes, nos oceanos e na atmosfera. Nas formas sólida e líquida, a água cobre cerca de 2/3 da superfície terrestre, já na forma gasosa, constitui até 4% do volume atmosférico, com maior concentração nas regiões tropicais e nas camadas mais baixas da atmosfera [25].

A Hidrologia é a ciência que estuda a ocorrência, circulação e distribuição da água na superfície terrestre, as propriedades físicas e químicas, bem como sua interação com o meio ambiente [1]. O melhor entendimento dos processos físicos que controlam a distribuição e o movimento da água se dão através de sua descrição como Ciclo Hidrológico, definido por Tucci [1] como o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície da Terra e a atmosfera estimulado pela energia solar em associação com a gravidade e a rotação terrestre. Esse fenômeno é constituído por uma sucessão de processos naturais pelos quais a água inicia o seu caminho indo de um estágio inicial até retornar à posição primitiva. O Ciclo Hidrológico pode ser dividido em 7 etapas, quais sejam: precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo, transpiração e evaporação.

A precipitação ocorre quando o vapor de água presente na atmosfera, submetido a condições meteorológcas, se une formando microgotículas que, condensadas, permanecem suspensas no ar até terem tamanho e peso suficientes para precipitar sob a forma de chuva, neve ou granizo, sendo a primeira a forma de ocorrência mais comum. A precipitação pode ocorrer diretamente sobre um corpo de água ou deslocar-se sobre o solo a partir do ponto de impacto até um curso de água, ou infiltrar.

Antes de atingir o solo, parte da água precipitada, seja na forma de chuva ou de neve, sofre interceptação pela vegetação, atingindo folhas e caules e ficando retida até evaporar ou alcançar a superfície através da ação dos ventos ou graças a excedência da capacidade de retenção da vegetação. O processo de interceptação depende fortemente das características das precipitações, da densidade da vegetação, da estrutura e arquitetura do dossel e do comportamento fisiológico anual das plantas [1].

A água que chega até a superfície pode evaporar, penetrar no solo ou escoar sobre a terra. Quando a intensidade da precipitação não satura a superfície do solo, ocorre a infiltração, processo de penetração da água nas camadas mais próximas à superfície terrestre, por meio da ação da gravidade, provocando a umidade do solo graças a retenção da mesma. A importância dessa etapa no Ciclo Hidrológico se dá em razão da sua responsabilidade pelo abastecimento de aquíferos, bem como da influência direta no escoamento superficial e consequente erosão hídrica [26].

Quando o solo está saturado pela intensidade da precipitação, bem como quando a vegetação atinge o seu nível de retenção, ocorre o escoamento superficial. Nessa fase, a água se desloca sobre a superífice terrestre, sob efeito da gravidade, formando pequenos filetes que, juntos, configuram-se em cursos de água que originam os riachos e rios, até atingirem os oceanos [1].

O escoamento subterrâneo acontece quando parte da precipitação que infiltra no solo atinge lentamente os aquíferos subterrâneos, localizados nas camadas abaixo do solo saturado. Esse tipo de escoamento é responsável por manter os cursos de água alimentados durante períodos de estiagem.

Parte da água que fica armazenada no solo por meio da infiltração é utilizada pela vegetação, que a absorve através das raízes e a devolve para a atmosfera na forma de vapor de água por meio das folhas em um processo chamado de transpiração.

Antes de atingir o solo, parte da precipitação passa pelo fenômeno da evaporação, quando há a mudança da água do estado líquido para o gasoso graças à ação de raios solares e aos processos de difusão molecular e turbulenta. Esse processo ocorre também em superfícies isentas de vegetação, bem como nos lagos, rios, mares e oceanos, aonde a água evapora e retorna a atmosfera, completando o ciclo hidrológico.

3.1.1 Precipitação

Entende-se por precipitação toda a água proveniente da atmosfera que atinge a superfície terrestre sob a forma de chuva, neblina, granizo, neve, entre outras, diferentes apenas no estado em que a água se encontra, sendo a primeira delas a mais importante nos estudos em hidrologia. Esse fenômeno é responsável por alimentar a fase terrestre do ciclo hidrológico nos processos de infiltração, escoamento superficial e subterrâneo, transpiração, evaporação e outros [27].

A totalidade, duração e dristribuição espaço-temporal são as principais características da precipitação, aonde os dados hidrológicos obtidos são tratados de maneira estatística [1]. Sua descrição é de suma importância nos projetos de agricultura, na mensuração de reservatórios de água, na criação de planos de proteção e conservação do solo e em atividades esportivas de lazer [28].

A chuva é a principal forma de manifestação da precipitação no ciclo hidrológico, interferindo diretamente na vida humana por ser o meio mais importante de suprimento hídrico, pela capacidade de caracterização do clima de determinada região [29], bem como no rendimento das culturas e na construção civil [30]. Segundo Pinto [31], de todas as etapas do ciclo hidrológico, a precipitação pluviométrica (chuva) é a mais fácil de ser mensurada e a que mais contribui para a vazão dos rios.

Mecanismos de formação das precipitações

As nuvens são aerossóis em suspensão na atmosfera constituídos de ar, vapor e gotículas de água nos estados líquido e/ou sólido. Esses constituintes são responsáveis pela formação de um reservatório de água que, ao sofrer condensação, permite a ocorrência de precipitações [1].

O processo de formação da precipitação ocorre quando o ar úmido localizado nas camadas mais baixas da atmosfera é aquecido através da condução, tornando-se mais leve que os demais. O ar em temperaturas elevadas sobe, fazendo com que sua pressão diminua e, consequentemente, sofra resfriamento. Esse fenômeno é chamado de ascensão adiabática e é a partir dele que o ar resfriado alcança o ponto de saturação, capacidade máxima de umidade que pode conter. Em seguida, o vapor d'água presente na atmosfera condensa-se na forma de gotículas que se mantêm em suspensão, como nuvens ou nevoeiros, até possuirem massa suficiente para vencer a resistência do ar, originando a precipitação [32].

Para que haja precipitação, é necessário que as gotículas suspensas cresçam o suficiente para atingir um peso capaz de vencer as forças que as sustentam na atmosfera, fazendo com que precipitem. Esse processo ocorre a partir de *núcleos de condensação* (partículas de poeira, sais, ácidos, entre outros) que permitem que as gotículas de água se unam entre si.

O mecanismo de crescimento das partículas de nuvens por meio da condensação não é rápido o suficiente para que ocorra a precipitação, por esse motivo, existem duas maneiras pelas quais essas partículas podem crescer mais rapidamente. A primeira delas é através do processo de *colisão-coalescência*, quando o aumento do tamanho das gotículas de nuvens se dá a partir da colisão entres elas, graças aos diversos deslocamentos sofridos por meio de movimentos turbulentos do ar, forças elétricas e movimento Browniano. Quando as gotas alcançam um tamanho suficiente para vencer a resistência do ar, durante o trajeto em direção à superfície terrestre, as gotas maiores caem rapidamente e se chocam com as menores, que se movem de maneira mais lenta, agregando-se umas as outras e

gerando uma gota grande o suficiente para atingir o solo sem que evapore durante o trajeto [33]. O processo de crescimento de gotas através da *colisão-coalescência* ocorre em nuvens quentes, ou seja, que possuem temperatura superior a 0ºC e são formadas através da condesação do vapor de água [34].

A segunda maneira de crescimento de partículas de nuvens é através do processo de *Bergeron-Findeisen*, ocorrido em nuvens frias, ou seja, que possuem temperaturas abaixo de 0ºC. Nesse tipo de nuvem coexistem os estados sólido e líquido da água na forma de cristais de gelo e gotículas, respectivamente. Nesse sentido, o vapor de água condensa sobre os cristais de gelo, fazendo com que cresçam o suficiente para romper a resistência do ar e precipitar. Isso acontece porque a pressão de vapor saturado é, para temperaturas iguais e abaixo de 0ºC, menor para o gelo e maior para a água sobrefundida (resfriada abaixo do seu ponto de fusão, mas que permanece no estado líquido). Durante a precipitação, os cristais de gelo podem aumentar de tamanho ao colidirem com gotículas de água sobrefundidas que congelam sobre eles. A esse processo dá-se o nome de *acreção*. O granizo é um exemplo da ocorrência desse fenômeno. Também é possível que cristais cresçam a partir da colisão com outros, dando origem a cristais maiores. Esse processo é chamado de *agregação* e tem os flocos de neve como exemplo [33].

3.1.2 Classificações das Precipitações

O mecanismo de ascenção das massas de ar úmido é fundamental para a formação das precipitações em formato de chuvas, classificadas de acordo com as condições que produzem esse movimento em três tipos principais: convectivas, orográficas e frontais (ou ciclônicas) [35].

Precipitações Convectivas

Típicas das regiões tropicais, as precipitações convectivas ocorrem quando há um aquecimento desigual da superfície terrestre, possibilitando a criação de camadas de ar com diferentes densidades que se mantêm em equilíbrio instável. Uma vez perturbado esse equilíbrio, seja por qualquer motivo (vento, superaquecimento), ocorre uma ascensão brusca do ar menos denso, sendo capaz de atingir grandes altitudes, alcançando o seu nível de condensação com formação de nuvens, e muitas vezes, precipitações. As chuvas convectivas são caracterizadas pela alta intensidade e a curta duração, além de serem concentradas em pequenas áreas. Precipitações desse tipo são capazes de provocar importantes inundações em pequenas bacias. Ocorrem comumente em regiões equatoriais, aonde os ventos são fracos e os movimentos de ar são verticais, podendo também ocorrer em regiões de clima temperado graças ao verão, ocasionando violentas tempestades [1]. No Brasil, esse tipo de precipitação é predominante especialmente nas regiões tropicais. Já na região sul, sua ocorrência é maior durante o verão [36].

Precipitações Orográficas

As precipitações orográficas ocorrem em regiões onde há a presença de grandes barreiras naturais, como montanhas e cordilheiras, que impedem a passagem de massas de ar quente e úmido, obrigando-as a subir para níveis mais altos da atmosfera. No percurso para maiores altitudes, o ar sofre um resfriamento gradativo, provocando condensação e consequente formação de nuvens que precipitam [36]. São chuvas de baixa intensidade, grande duração e que cobrem pequenas áreas. Quando as massas de ar conseguem ultrapassar as barreiras naturais, há a eminência de uma *sombra pluviométrica* do lado oposto da barreira, dando origem a áreas secas ou semi-áridas causadas pela ausênca de umidade no ar, descarregada no lado da barreira onde houve precipitação.

Precipitações Frontais ou Ciclônicas

São oriundas da interação entre massas de ar quente e frias. Nas regiões de convergências na atmosfera, o ar quente e úmido é violentamente impulsionado para cima, resfriando e condensando, de forma a produzir chuva. Esses tipos de precipitações têm como característica a grande duração, de forma a atingir áreas extensas com uma intensidade média. Podem vir acompanhadas de fortes ventos com circulação ciclônica, além de serem capazes de produzir cheias em grandes bacias [1].

Na natureza, podemos observar diversas formas de precipitação: **Chuvisco (neblina ou garoa)**, caractetizado como uma precipitação muito fina e de intensidade baixa; **Chuva**, precipitação em forma líquida e de maior ocorrência na atmosfera; **Neve**, precipitação na forma de cristais de gelo que coalescem durante a queda, formando blocos de diversos tamanhos; **Saraiva**, precipitação sob a forma de pequenas pedras de gelo arredondadas com cerca de 5 mm de diâmetro; **Granizo**, pedras de gelo com formatos variáveis e iguais ou superiores a 5 mm; **Orvalho**, o resfriamento noturno permite que o vapor de água condense sob os objetos expostos ao ar, que amanhecem cobertos por gotículas de água; **Geada**, semelhante a formação do orvalho, no entanto, há a deposição de cristais de gelo sob os objetos expostos ao ar, graças a temperaturas inferiores a 0 ºC [1].

3.1.3 Precipitação na Região Nordeste do Brasil

O Nordeste do Brasil (NEB) é caracterizado por uma importante variabilidade climática marcada pela presença dos climas litorâneo úmido, tropical e, em sua maioria, tropical semiárido, somada a irregularidade dos regimes anuais de precipitação, relacionados a diversos sistemas atmosféricos de inúmeras escalas que, ao interagirem com vários mecanismos físicos, são responsáveis pela distribuição de chuva nessa região [37].

Silva, Oliveira e Oliveira [38] argumentam que os determinantes da distribuição dos elementos climáticos no NEB estão relacionados à sua localização geográfica, ao relevo,

à natureza da superfície e aos sistemas de pressão que operam na região. Dessa forma, os mecanismos dinâmicos geradores de chuvas na região podem ser divididos em: mecanismos de grande escala, que respondem por 30% a 80% da precipitação observada, dependendo da localização, e mecanismos de meso e microescalas, que compreendem a quantidade total observada. Entre os mecanismos de grande escala, os sistemas frontais e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) são os mais proeminentes.

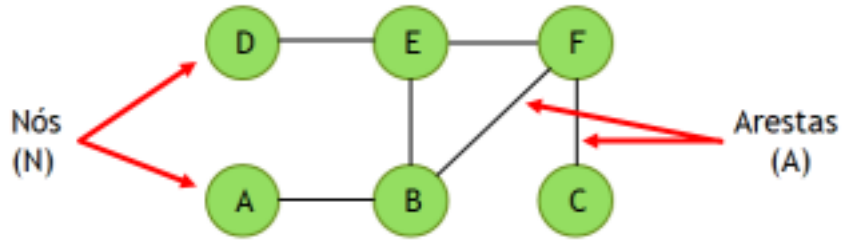
O Nordeste do Brasil está localizado próximo à fronteira entre duas zonas de convergência tropical de grande escala: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), ao norte, e o Sistema Monçônico da América do Sul (SMAS), centrado a oeste. A precipitação no Nordeste do Brasil é altamente sazonal e sensível a anomalias na extensão de qualquer um desses fenômenos [39]. A principal estação de chuvas ocorre em fevereiro, março e abril (FMA), quando a ZCIT do Atlântico atinge sua posição mais ao sul e cobre diretamente o Nordeste do Brasil, fundindo-se com o SMAS perto da foz do Amazonas, enquanto o SMAS recua para o norte [40]. A variabilidade climática interanual no Nordeste do Brasil é bastante pronunciada, e os modelos climáticos sugerem que a região será afetada por mais déficits de chuva e aumento da aridez na segunda metade do século XXI [24]. A variabilidade interanual, com precipitação excessiva e secas severas, está relacionada ao El Niño-Oscilação Sul (ENSO) no Oceano Indo-Pacífico equatorial e ao gradiente meridional da temperatura da superfície do mar (TSM) sobre o Atlântico tropical. A fase positiva do El Niño do ENSO e a fase negativa do gradiente TSM levam à diminuição da precipitação no Nordeste do Brasil, enquanto, durante a fase negativa do La Niña do ENSO e a fase positiva do gradiente TSM, a precipitação está acima da média [40]. Em anos de ENSO em que as anomalias pré-existentes da TSM amplificam o impacto direto do ENSO, a região pode sofrer secas extremas [41] que podem causar sérias consequências ambientais, econômicas e sociais [23, 42]

3.2 Redes Complexas

Caracterizadas como um método de estudo interdisciplinar que abrange várias áreas de conhecimento, como matemática, biologia, física, ciência da computação, entre outras, as Redes Complexas (RCs) são inicialmente estudadas por volta de 1930, quando emergem como um instrumento sociológico para a análise do comportamento da sociedade e a relação entre os indivíduos [43]. Esse campo de estudo relativamente jovem e multidisciplinar surge com o objetivo de compreender a estrutura e as funções das redes [9], denominadas complexas devido às propriedades organizacionais do mundo real serem muito robustas e distintas das redes ditas aleatórias. Dessa forma, o avanço da tecnologia da informação e comunicação, bem como a utilização de computadores para análises de grandes quantidades de dados, permitiu que os estudos de redes passsassem a

considerar propriedades estatísticas em larga-escala, possibilitando pesquisas envolvendo até bilhões de dados [43].

O termo Redes Complexas faz referência à representação estrutural de características e elementos por meio de grafos compostos por um conjunto de vértices (ou nós) conectados entre si através de arestas (ou links), estabelecendo algum tipo de relação entre eles. Matematicamente, uma rede pode ser representada como $G = V, E$, onde V é um conjunto N de nós $(V_1, V_2, ..., V_N)$ e E é um conjunto de n links. Na figura abaixo apresentamos a forma mais simples de uma rede, constituída de um conjunto de nós (N=6) conectados por links (ou arestas) (n=6), ambos idênticos. No caso das redes naturais e sociais, a complexidade é muito maior.



Nem todo grafo pode ser considerado uma rede complexa, haja vista a necessidade de possuir características específicas que não estão presentes em grafos simples. Dessa maneira, apresentaremos a seguir as principais medidas que caracterizam uma Rede Complexa.

3.2.1 Medidas de Redes Complexas

As Redes Complexas possuem propriedades que permitem que os aspectos mais diversos de uma rede sejam analisados e utilizados para inúmeros fins, como propriedades de agrupamento, topologia, adjacência, centralidade e entropia, representadas por diferentes medidas, como o coenficiente de agrupamento, distribuição de graus, comprimento médio do caminho mais curto, centralidade de grau, entre outros. Nesta subseção, apresentaremos uma breve descrição de algumas dessas medidas.

Coeficiente de Agrupamento

A tendência dos agrupamentos de uma rede são quantificados pelo coeficiente de agrupamento, uma das propriedades mais fundamentais das redes, sendo, basicamente, uma medida de densidade local [44]. Para calcular o coeficiente de agrupamento, suponhamos um nó i em uma rede que possui k_i links que conectam o nó i a k_i outros nós. Esses k_i nós são os vizinhos do nó i, e podem ser identificados com base em critérios como correlação entre o nó i e os demais nós da rede. Se os vizinhos do nó i original fazem parte de um conjunto, então haveria $k_i(k_i$ - $1)/2$ entre eles. Com isso, o coeficiente de

agrupamento do nó i é calculado como a razão entre o número E_i de links que atualmente existem entre estes k_i nós e o número total $k_i(k_i$ - $1)/2$.

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \tag{3.1}$$

Esse procedimento é repetido para todo e qualquer nó da rede. A média dos coeficientes de agrupamento C_i's de todos os nós individuais é o coeficiente de agrupamento de toda a rede C.

$$C = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} C_i \tag{3.2}$$

A partir do coeficiente de agrupamento, seja de nós individuais ou de toda a rede, é possível obter informações importantes sobre o tipo de rede analisada. Por exemplo, um coeficiente de agrupamento alto (próximo de 1,0) indica uma rede regular. Já um coeficiente de agrupamento muito baixo (próximo de 0,0) indica uma rede aleatória [45].

Distribuição de Graus

Os diferentes nós de uma rede podem ter diferentes números de links. A quantidade de links que se conectam a um nó é chamado de grau do nó. Desse modo, a distribuição de graus é uma função de distribuição probabilística, ou seja, que determina a probabilidade de um determinado nó ter um grau fixo [43]. Essa distribuição indica, de maneira confiável, o tipo de rede em análise [46].

Em uma rede aleatória, como os links são distribuídos aleatoriamente, grande parte dos nós tem aproximadamente o mesmo grau médio $\overline{k}$ da rede. Dessa maneira, a distribuição de graus nas redes aleatórias segue a distribuição de Poisson com pico $P(\overline{k})$, dada por:

$$p(k) = \frac{e^{-\overline{k}}\overline{k}^{k}}{k!} \tag{3.3}$$

A depender das propriedades das redes, a distribuição de graus pode ser Gaussiana, Exponencial ou Lei de Potência, em que $p(k) \sim k^{-\gamma}$ para uma constante γ qualquer [43]. A esse último tipo de rede, dá-se o nome de Rede Livre de Escala.

Comprimento Médio do Caminho Mais Curto

O comprimento médio do caminho mais curto (L) entre dois nós (i,j) é o menor número de links dentre todos os possíveis links que conectam esses nós. Se o par de nós não estiver conectado, o valor de L será infinito. O comprimento médio do caminho mais curto de um par de nós de uma rede é dado por

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{ij} d_{ij} \tag{3.4}$$

aonde N é o número de nós da rede e $d_{i,j}$ é a menor distância entre os nós i e j, ou seja, o número de arestas percorridas do menor caminho para ir de i até j [47]. Essa medida de rede tem grande importância no que diz respeito ao transporte de informações e comunicação dentro de uma rede [48]. Comprimentos médios de caminhos curtos caracterizam uma transferência rápida e econômica, portanto eficiente, como é o caso da redes do tipo regulares que possuem alto coeficiente de agrupamento (são estáveis). Em contrapartida, comprimentos médios de caminhos longos caracterizam uma tranferência lenta e dispendiosa, portanto ineficiente, como ocorre com as redes aleatórias cujo coeficiente de agrupamento é baixo (são instáveis). Quando uma rede apresenta um comprimento médio de caminho curto e um alto coeficiente de agrupamento ela é tida com estável e eficiente, como é o caso das redes de mundo pequeno [45].

Capítulo 4

Dados e Metodologia

4.1 Área de estudo

O estado de Pernambuco está localizado na parte oriental do Nordeste do Brasil, entre os paralelos 7º15'45"S e 9º28'18"S e os meridianos 34º48'33"W e 41º19'54"W, conforme mostrado na Figura 4.1. Faz fronteira com os estados de Alagoas e Bahia (sul), Piauí (oeste), Paraíba e Ceará (norte) e o Oceano Atlântico a leste. A zona úmida da Mata Atlântica (Zona da Mata) se estende por cerca de 70 km do mar até a cadeia montanhosa da Borborema. A maior região semiárida (Sertão) está localizada a oeste da cadeia da Borborema e a zona de transição subúmida (Agreste) está localizada entre a Zona da Mata e o Sertão. A cobertura vegetal varia de pequenos fragmentos de Mata Atlântica (principalmente no topo de morros baixos (50-100 m de altura) que são cercados por campos de cana-de-açúcar em elevações mais baixas na Zona da Mata da região costeira) até um bioma semiárido Caatinga (dominado por floresta tropical seca, pastagens e campos agrícolas de culturas de subsistência - milho, feijão e mandioca), na região do Sertão. No Agreste, que representa uma zona de transição, a Mata Atlântica se mistura com a Caatinga [49, 50]. Na área costeira, o clima é tropical úmido com forte gradiente pluviométrico de leste a oeste (de 1500 a 700 mm), com estação chuvosa entre maio e julho e intensa estação seca entre setembro e dezembro. Na região do Sertão, o clima é semiárido com menos de 500 mm de precipitação anual. A estação chuvosa é curta, concentrada de fevereiro a abril, e um período seco dura nove meses [51]. Devido à variabilidade climática, Pernambuco sofre secas recorrentes, no Sertão, e inundações na região costeira.

4.2 Dados

Os dados do satélite usados neste trabalho foram obtidos do Rainfall Measuring Mission (TRMM) da NASA em https://gpm.nasa.gov/missions/trmm. Os dados no inter-

Figura 4.1: Posição do Estado de Pernambuco no Brasil, com as três regiões: Zona da Mata, Agreste e Sertão.

valo geográfico -7,20, -9,50 latitude e -34,80, -41,60 longitude, com uma resolução espacial de 25^{o} ($25km$) e resolução temporal de 3 horas foram baixados para o período de 1998 a 2020. Em seguida as células de grade individuais sobrepondo o estado de Pernambuco foram extraídas gerando séries temporais de precipitação diária. Entre 181 células de grade, 25 pertencem à Zona da Mata, 41 ao Agreste e 115 ao Sertão. O mapa do estado de Pernambuco com grade TRMM é exibido na Figura 4.2.

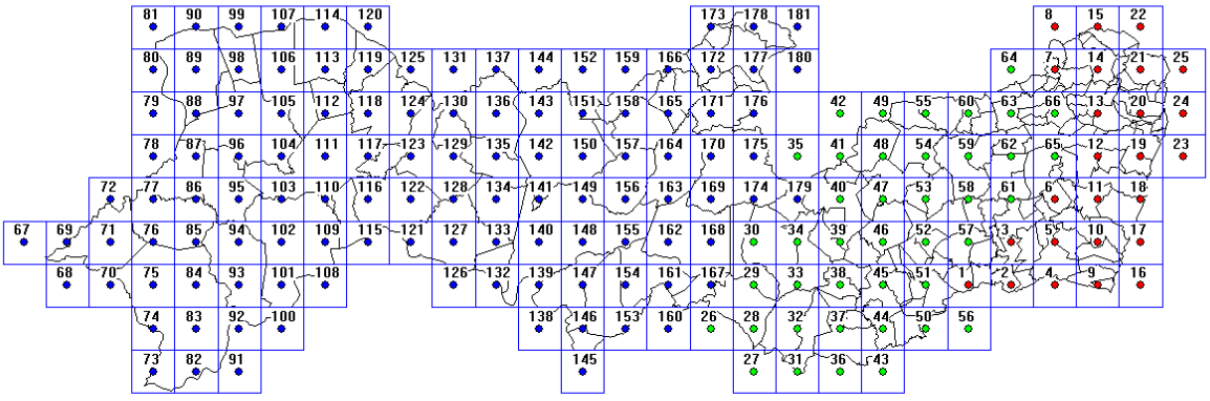


Figura 4.2: Estado de Pernambuco com grade TRMM: Vermelho (Zona da Mata), Verde (Agreste), Azul (Sertão).

4.3 Metodologia

1. Filtrar os dados TRMM para Zona da Mata, Agreste e Sertão;

2. Construir as séries temporais diárias para cada célula da grade;
3. Calcular o coeficiente de Pearson entre cada par das séries;
4. Construir as redes utilizando o coeficiente Pearson com limiares T = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 e 0.8;
5. Para cada rede construída no passo (4), calcular Grau de vértice e Coeficiente de agrupamento dos vértices da rede;
6. Apresentar os resultados obtidos em passo (5) no mapa de Pernambuco;
7. Calcular Grau de vértice global para todo o estado e para as regiões da Zona da Mata, Agreste e Sertão;
8. Calcular Coeficiente de agrupamento global para todo o estado e para as regiões da Zona da Mata, Agreste e Sertão;
9. Comparar Grau de vértice e Coeficiente de agrupamento para diferentes limiares de coeficiente Pearson;
10. Comparar os resultados para a Zona da Mata, Agreste e Sertão.

4.4 Software

Os dados de grau de vértice local e coeficiente de agrupamento local para cada nó da rede e para cada limiar de coeficiente Pearson foram calculados utilizando o software ShowMap desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada – PPBEA, UFRPE.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

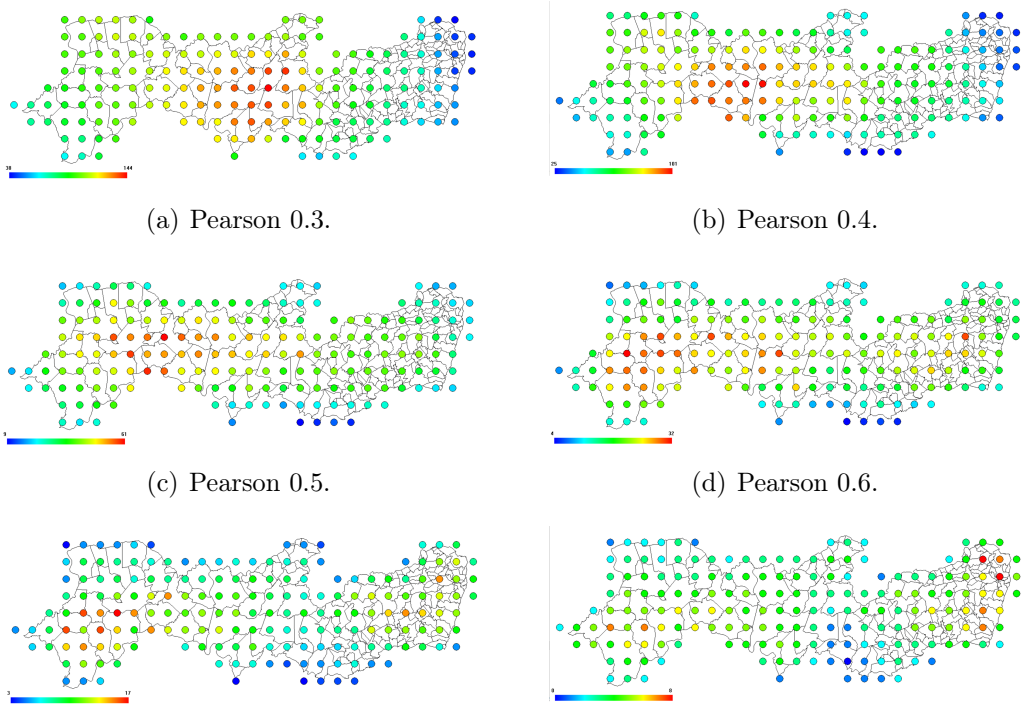
Os dados de precipitação obtidos no presente trabalho foram dispostos para as regiões da Zona da Mata, Agreste e Sertão do estado de Pernambuco, utilizando séries temporais de precipitação diária extraídas das células de grade individuais obtidas do TRMM. As redes de precipitação foram construídas a partir da definição de diferentes limiares de correlação de Pearson (T = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 e 0.8), ferramenta estatística que quantifica a correlação linear entre duas variáveis. Neste caso, o coeficiente de Pearson mede a correlação linear entre as séries temporais, indicando a força e a direção da relação entre a precipitação em diferentes locais, ou seja, de diferentes células da grade. O valor do coeficiente de Pearson varia de -1 a 1, onde valores próximos a 1 indicam uma forte correlação positiva, valores próximos a -1 indicam uma forte correlação negativa e valores próximos a 0 indicam pouca ou nenhuma correlação. Os limiares (T) definidos nos limites deste trabalho serão utilizados para definir quais pares de células estão conectados na construção das redes complexas de precipitação do estado de Pernambuco.

A distribuição espacial de grau de vértice dos nós da rede TRMM para cada limiar de Pearson é apresentada na Figura 5.1. Observa-se que: i) o grau de vértice local diminui com aumento do limiar T de coeficiente Pearson; ii) para T = 0.3, 0.4, 0.5 e 0.6, observa-se um padrão espacial (aumento de grau de vértice na direção litorânea (Zona da Mata) até o Sertão; iii) para T = 0.7 e T = 0.8, o grau de vértice é o maior na região da Zona da Mata e no sudoeste sertanejo.

As Tabelas 5.1 e 5.2 fornecem a média do grau de vértice global em todo o estado de Pernambuco e nas mesorregiões que o compõem (ambos com desvio padrão), respectivamente.

Pearson	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
Grau médio	96	62.198	36.276	19.093	9.027	3.657
Desvio padrão	23.991	18.029	11.241	6.143	3.106	1.524

Tabela 5.1: Grau de vértice global (com desvio padrão) da rede TRMM da chuva diária em Pernambuco para diferentes limiares de coeficiente Pearson.



(a) Pearson 0.3. (b) Pearson 0.4.

(c) Pearson 0.5. (d) Pearson 0.6.

(e) Pearson 0.7. (f) Pearson 0.8.

Figura 5.1: Grau do vértice da rede TRMM de chuva diária em Pernambuco. As redes são construídas utilizando o coeficiente Pearson com limiares T = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 e 0.8.

Os dados obtidos na Tabela 5.1 revelam valores relativamente altos para o grau de vértice médio global (96 a 62.198), com alto desvio padrão (23.991 a 18.029), para limiares de Pearson T = 0.3 a 0.4. Isso sugere que para limiares de Pearson baixos, a média de precipitações é alta, assim como a variabilidade nesse intervalo, revelando uma alta dispersão de dados. Para limiares de Pearson T = 0.5 a 0.6, é possível observar uma diminuição gradual do grau de vértice médio (36.276 a 19.093) e no desvio padrão (11.241 a 6.143), indicando que, com o aumento dos limiares, o número de conexões entre os nós diminui, assim com a variabilidade (Figura 5.1c,d), gerando valores intemediários de média e desvio padrão de grau de vértice. Por fim, o grau de vértice médio (9.027 a 3.657) e o desvio padrão (3.106 a 1.524) mostraram-se muito baixos para limiares de Pearson T = 0.7 a 0.8. Isso indica que a rede conta com poucas conexões entre os nós e baixa variabilidade (Figura 5.1e,f), gerando os baixos valores de média e desvio padrão de grau de vértice.

No que diz respeito à análise do grau de vértice médio e desvio padrão para as mesorregiões do estado de Pernambuco (Zona da Mata, Agreste e Sertão), os dados dispostos na Tabela 5.2 revelam que o grau médio e o desvio padrão da Zona da Mata são os mais baixo dentre as mesorregiões analisadas quando comparamos os limiares de Pearson T = 0.3 a 0.6. À medida que o limiar de Pearson aumenta, a média e o desvio padrão de grau de vértice diminuem, indicando um número menor de conexões entre nós

Pearson	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
	Zona da Mata					
Grau médio	55.36	39.32	27.12	17.52	10.36	5.04
Desvio padrão	10.567	8.355	6.854	3.837	2.48	1.611
	Agreste					
Grau médio	86.365	55.902	33.073	17.609	8.073	2.902
Desvio padrão	13.933	12.913	9.791	6.551	3.149	1.527
	Sertão					
Grau médio	108.269	69.417	39.408	19.965	9.078	3.626
Desvio padrão	16.424	16.029	11.082	6.230	3.098	1.281

Tabela 5.2: Grau de vértice global (com desvio padrão) da rede TRMM da chuva diária em Zona da Mata, Agreste e Sertão para diferentes limiares de coeficiente Pearson.

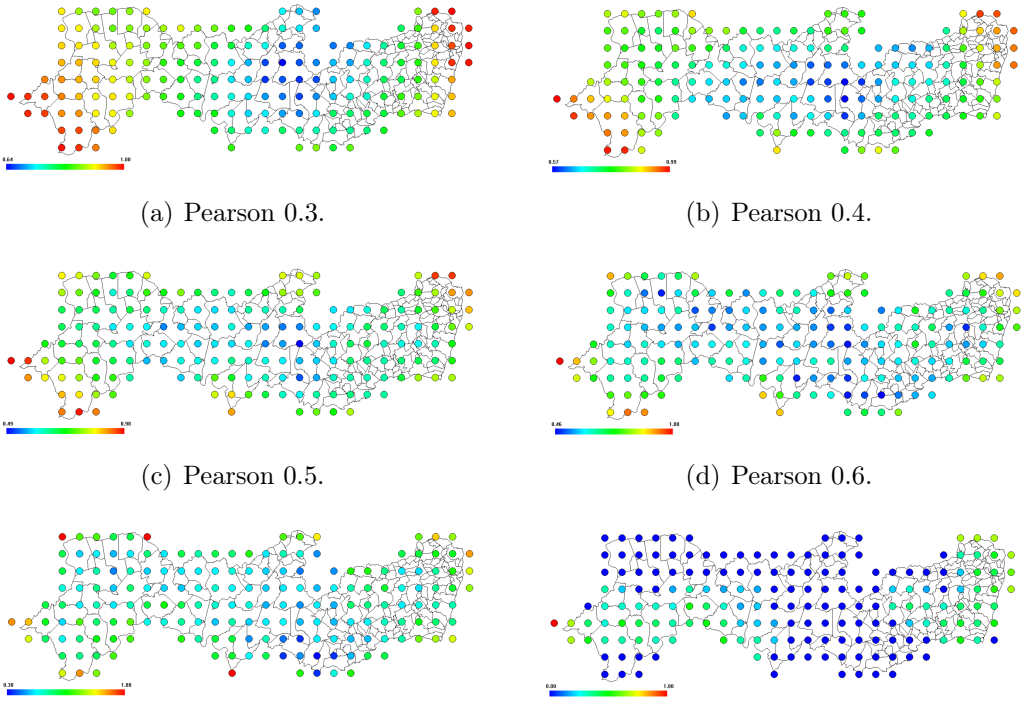
da rede, com menor variabilidade. Quando observamos os dados para limiares T = 0.7 a 0.8 podemos perceber a inversão nos padrões de grau médio e desvio padrão entre as mesorregiões, aonde a Zona da Mata passa a apresentar valores superiores de grau médio em comparação as demais, indicando uma distribuição espacial de regime de precipitação mais uniforme.

O Agreste apresenta uma grau médio intermediário em comparação com Zona da Mata e Sertão. Com uma gradativa redução do grau de vértice de 86.365 em T = 0.3 para 2.902 em T = 0.8, à medida que o limiar de coeficiente Pearson aumenta, o número de conexões entre os nós da rede diminui. Os valores de desvio padrão revelam que o nível de variabilidade diminui com o aumento dos limiares, apresentando resultados maiores do que os da Zona da Mata.

Já o Sertão é a mesorregião que apresenta os valores mais altos de grau médio e desvio padrão em limiares de Pearson mais baixos (T=0.3 a 0.6). Para limiares mais altos (T=0.7 a 0.8), o grau médio é menor do que na Zona da Mata, no entanto, é maior do que no Agreste. O regime de chuva é mais uniforme na Zona da Mata e no Sertão do que no Agreste que é uma zona de transição, e possui característcas de variabilidade anual de chuva na Zona da Mata (na região leste) e no Sertão (na região oeste), por isso é esperado que a rede seja menos conectada nesta região. Os resultados dos índices da rede para limiares maiores refletem as características climáticas em Pernambuco. Zona da Mata e Sertão têm um regime de chuva mais definido, gerando as redes mais conetadas, mas o grau médio de vértice é menor no Sertão, porque nessa região existem duas sub-regiões: Sertão Pernambucano (ao norte) e Sertao do São Francisco (ao sul), com menor quantidade anual de chuva.

A distribuição espacial de coeficiente de agrupamento de nós da rede TRMM para cada limiar de Pearson é apresentada na Figura 5.2.

As Tabelas 5.3 e 5.4 fornecem o coeficiente de agrupamento global em todo o estado de Pernambuco e nas mesorregiões que o compõem (ambos com desvio padrão), respectivamente.



(a) Pearson 0.3. (b) Pearson 0.4.

(c) Pearson 0.5. (d) Pearson 0.6.

(e) Pearson 0.7. (f) Pearson 0.8.

Figura 5.2: Coeficiente de agrupamento da rede TRMM de chuva diária em Pernambuco. As redes são construídas utilizando o coeficiente Pearson com limiares T = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 e 0.8.

Pearson	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
Coef. agrupamento	0.829	0.762	0.702	0.643	0.555	0.161
Desvio padrão	0.095	0.100	0.102	0.110	0.130	0.212

Tabela 5.3: Coeficiente de agrupamento global (com desvio padrão) da rede TRMM da chuva diária em Pernambuco para diferentes limiares de coeficiente Pearson.

A tabela 5.3 revela altos valores de coeficiente de agrupamento (0.829 a 0.762) e baixos valores de desvio padrão (0.095 a 0.100) para limiares de Pearson mais baixos (T = 0.3 a 0.4), indicando que as células da rede tendem a fazer múltiplas conexões com estrutura de agrupamento uniforme e com pequenos índices de variabilidade, o que caracteriza uma rede muito densa. Quando analisamos limiares de Pearson intermediários (T = 0.5 a 0.6), podemos perceber menores valores de coeficiente de agrupamento (0.702 a 0.643) e maiores de desvio padrão (0.102 a 0.110), ocasionando uma diminuição de conexões locais, proporcionando uma rede menos densa com algumas variações na estrutura de agrupamento. Para limiares de Pearson altos (T = 0.7 a 0.8), o coeficiente de agrupamento apresenta os menores valores (0.555 a 0.161), enquanto o desvio padrão apresenta os mais altos (0.130 a 0.212), sugerindo uma estrutura de agrupamento local baixa e com alta variabilidade, caractetizando uma rede com menor grau de uniformidade e maior dispersão.

Pearson	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
	Zona da Mata					
Coef. agrupamento	0.917	0.859	0.780	0.727	0.648	0.442
Desvio padrão	0.060	0.074	0.094	0.106	0.114	0.171
	Agreste					
Coef. agrupamento	0.760	0.704	0.653	0.597	0.488	0.071
Desvio padrão	0.051	0.064	0.054	0.070	0.097	0.123
	Sertão					
Coef. agrupamento	0.834	0.762	0.702	0.641	0.559	0.132
Desvio padrão	0.096	0.100	0.107	0.112	0.131	0.194

Tabela 5.4: Coeficiente de agrupamento global (com desvio padrão) da rede TRMM da chuva diária em Zona da Mata, Agreste e Sertão para diferentes limiares de coeficiente Pearson.

Quando observamos os dados apresentados na Tabela 5.4, podemos perceber que a Zona da Mata possui os mais altos coeficientes de agrupamento e baixos valores de desvio padrão para pequenos limiares de Pearson (T=0.3 a 0.4), aonde ambas as medidas diminuem à medida que o limiar aumenta, indicando ser a mesorregião do estado de Pernambuco que apresenta a estrutura de rede mais densa em comparação com Agreste e Sertão, ou seja, a que possui o maior número das conexões locais entre as células, assim como a que apresenta baixas taxas de variabilidade na estrutura de agrupamento da rede. O Sertão evidencia valores próximos aos da Zona da Mata (embora um pouco menores) para coeficiente de agrupamento. No entanto, é a mesorregião que possui o desvio padrão mais elevado, indicando ter estrutura de densidade intermediária para alta, mas com altos índices de variabilidade. Já o Agreste é a mesorregião que apresenta o coeficiente de agrupamento mais baixo em relação as demais e níveis médios de desvio padrão, caracterizando a rede menos densa, ou seja, de menor número de conexões entre as células, e com baixa variabilidade.

Para limiares T = 0.5 a 0.6, a Zona da Mata mantem-se com o coeficiente mais alto (apesar da diminuição), portanto, a maior densidade da rede, bem como tem uma redução na variabilidade (menor desvio padrão) com o aumento do limiar de Pearson, enquanto o Sertão dispõe de um coeficiente intermediário, sugerindo uma redução na densidade da rede, mas uma manutenção do desvio padrão, se mantendo com a maior variação na estrutura de agrupamento da rede. O Agreste continua com baixo coeficiente, indicando uma maior redução na densidade da rede em comparação com as demais mesorregiões, bem como um aumento no desvio padrão, significando uma diminuição na variabilidade.

Quando o limiar de Pearson é alto (T = 0.7 a 0.8), a Zona da Mata continua apresentando o maior coeficiente de agrupamento, portanto uma alta densidade da rede. No Sertão é possível perceber uma acentuada diminuição do coeficiente, mas é o Agreste que apresenta a queda mais drástica nos índices de densidade da rede. O desvio padrão ainda é mais alto para o Sertão, sugerindo ser a mesorregião com a maior variabilidade

do estado, mesmo todas elas sofrendo aumento da variação da estrutura com o aumento do limiar de Pearson.

A análise dos dados obtidos revelam altos coeficientes de agrupamento para baixos valores de limiar de Pearson, aonde a Zona da Mata se sobressai como a mesorregião mais densa da rede, seguida pelo Sertão (densidade intermediária) e Agreste (baixa densidade), como observado na Figura 5.2. À medida que o limiar de Pearson aumenta, o coeficiente de agrupamento diminui para todas as mesorregiões. O desvio padrão sofre ampliação quando elevamos os limiares de Pearson na Zona da Mata, Agreste e Sertão, sendo esta a que apresenta a maior variablidade da rede, especialmente para altas correlações, enquanto Zona da Mata e Agreste possuem índices mais baixos de variabilidade.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho utilizou-se o método das redes complexas para investigar as conexões espaciais da precipitação diária no estado de Pernambuco. As redes foram construídas utilizando o coeficente de correlação Pearson (com limiares T = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 e 0.8) entre as séries temporais da precipitação obtidas do satélite TRMM com resolução espacial de 25km no período entre 1998 e 2020. Analisando os índices da rede (grau de vértice e coeficiente de agrupamento), pode-se concluir que: i) ambos os índices diminuem com o aumento do limiar de Pearson; ii) para limiares de Pearson T = 0.3, 0.4, 0.5 e 0.6, o índice grau de vértice global é o maior para o Sertão, enquanto para limiares altos (T = 0.7 e T = 0.8), esse índice tem maior valor para a Zona da Mata; iii) para todos os limiares, o coeficiente de agrupamento global mostrou-se possuir os maiores valores para a Zona da Mata e os menores para o Agreste. Esse índice reflete bem o regime da chuva no estado de Pernambuco: mais uniforme na Zona da Mata (com clima úmido) e menos uniforme na região de transição do Agreste (com caracteristicas climáticas de zona úmida e árida). Trabalhos futuros podem incluir outros índices da rede e outras resoluções temporais de chuva (semanal, mensal).

Referências Bibliográficas

[1] TUCCI, C. E.; BERTONI, J. C.; DA SILVEIRA, A. L.; BENETTI, A.; LANNA, A. E.; BIDONE, F.; SEMMELMAN, F.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: EDUSP, 1993.

[2] PATZ, J.; CAMPBELL-LENDRUM, D.; HOLLOWAY, T.; FOLEY, J. Impact of regional climate change on human health. nature 438: 310-317 (17 november). *Nature*, London, v. 438, p. 310–7, 12 2005.

[3] WELTZIN, J. F.; LOIK, M. E.; SCHWINNING, S.; WILLIAMS, D. G.; FAY, P. A.; HADDAD, B. M.; HARTE, J.; HUXMAN, T. E.; KNAPP, A. K.; LIN, G.; POCKMAN, W. T.; SHAW, R. M.; SMALL, E. E.; SMITH, M. D.; SMITH, S. D.; TISSUE, D. T.; ZAK, J. C. Assessing the Response of Terrestrial Ecosystems to Potential Changes in Precipitation. *BioScience*, v. 53, n. 10, p. 941–952, 2003.

[4] TRAORE, B.; CORBEELS, M.; van Wijk, M. T.; RUFINO, M. C.; GILLER, K. E. Effects of climate variability and climate change on crop production in southern mali. *European Journal of Agronomy*, v. 49, p. 115–125, 2013.

[5] DETZEL, D.; MINE, M. Modelagem de quantidades precipitadas em escala diária: Uma análise comparativa. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, p. 101–110, 07 2011.

[6] SIVAKUMAR, B. Networks: a generic theory for hydrology? *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 29, n. 3, p. 761–771, 2015.

[7] CHADWICK, R.; GOOD, P.; MARTIN, G.; ROWELL, D. Large rainfall changes consistently projected over substantial areas of tropical land. *Nature Climate Change*, v. 6, 09 2015.

[8] GEBREGIORGIS, A.; HOSSAIN, F. Making satellite precipitation data work for the developing world. *Geoscience and Remote Sensing Magazine, IEEE*, v. 2, p. 24–36, 06 2014.

[9] GADHAWE, M.; GUNTU, R.; AGARWAL, A. Network-based exploration of basin precipitation based on satellite and observed data. *The European Physical Journal Special Topics*, v. 230, 04 2021.

[10] ZIARH, G. F.; SHAHID, S.; ISMAIL, T. B.; ASADUZZAMAN, M.; DEWAN, A. Correcting bias of satellite rainfall data using physical empirical model. *Atmospheric Research*, v. 251, p. 105430, 2021.

[11] BERNARDI, E. C. S. Qualidade das estimativas de precipitação do satélite trmm no estado do rio grande do sul. *Universidade Federal de Santa Maria*, 2016.

[12] FUWAPE, I.; OGUNJO, S.; S., O.; RABIU, A. Spatial variation of deterministic chaos in mean daily temperature and rainfall over nigeria. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 130, 10 2017.

[13] KANTELHARDT, J.; KOSCIELNY-BUNDE, E.; RYBSKI, D.; BRAUN, P.; BUNDE, A.; HAVLIN, S. Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records. *J. Geophys. Res*, v. 111, 01 2006.

[14] BOERS, N.; GOSWAMI, B.; RHEINWALT, A.; BOOKHAGEN, B.; HOSKINS, B.; KURTHS, J. Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections. *Nature*, London, v. 566, 02 2019.

[15] SIVAKUMAR, B.; WOLDEMESKEL, F. M. A network-based analysis of spatial rainfall connections. *Environmental Modelling Software*, v. 69, p. 55–62, 2015.

[16] BOCCALETTI, S.; LATORA, V.; MORENO, Y.; CHAVEZ, M.; HWANG, D.-U. Complex networks: Structure and dynamics. *Physics reports*, v. 424, n. 4-5, p. 175–308, 2006.

[17] ESTRADA, E. *The Structure of Complex Networks: Theory and Applications*. Oxford University Press, 2011.

[18] MALIK, N.; BOOKHAGEN, B.; MARWAN, N.; KURTHS, J. Analysis of spatial and temporal extreme monsoonal rainfall over south asia using complex networks. *Climate Dynamics*, v. 39, p. 1–17, 08 2011.

[19] SCARSOGLIO, S.; LAIO, F.; RIDOLFI, L. Climate dynamics: A network-based approach for the analysis of global precipitation. *PLoS ONE*, v. 8, p. e71129, 08 2013.

[20] JHA, S. K.; SIVAKUMAR, B. Complex networks for rainfall modeling: Spatial connections, temporal scale, and network size. *Journal of Hydrology*, v. 554, p. 482–489, 2017.

[21] AGARWAL, A.; MARWAN, N.; MAHESWARAN, R.; OZTURK, U.; KURTHS, J.; MERZ, B. Optimal design of hydrometric station networks based on complex network analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, n. 5, p. 2235–2251, 2020.

[22] TIWARI, S.; JHA, S.; SINGH, A. Quantification of node importance in rain gauge network: influence of temporal resolution and rain gauge density. *Scientific Reports*, v. 10, p. 9761, 06 2020.

[23] MARENGO, J.; RODRIGUES TORRES, R.; ALVES, L. Drought in northeast brazil-past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, 08 2017.

[24] MARENGO, J.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over northeast brazil: present state and future projections. *Climatic Change*, v. 129, 12 2014.

[25] CAMARGO, A. A água no solo para agricultura. *O Agronômico, Campinas*, v. 57, n. 1, p. 1–2, 2005.

[26] SILVEIRA, A. D.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento no solo. *In: TUCCI, CEM . Hidrologia: ciência e aplicação*, v. 2, p. 335–372, 1993.

[27] VIEIRA, H. P. M.; LEMES, M. W.; RODRIGUES, H. M.; ROSAS, R. O.; BERTOLINO, A. V. F. A. Análise dos índices pluviométricos como subsídio a gestão dos processos de degradação ambiental: Caso da sub-bacia santo antônio do maratuã–silva jardim/rj. *Anais do VII Congresso Brasileiro de Geógrafos*, 2014.

[28] SILVA, J. C. D.; HELDWEIN, A. B.; MARTINS, F. B.; TRENTIN, G.; GRIMM, E. L. Análise de distribuição de chuva para santa maria, rs. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, p. 67–72, 2007.

[29] DE ALBUQUERQUE, L. S.; NÓBREGA, R. S.; MOREIRA, W. A. B.; MENEZES, R. S. C. A relação entre o relevo e o clima como proposição de caracterização da fisiologia da paisagem em pernambuco, brasil. *Geo UERJ*, , n. 34, p. 40942, 2019.

[30] DE MEDEIROS, M. H. F.; BATISTA, G. D. M.; RUFATO, L. T.; DE CRISTO MIRANDA, D.; GIORDANO, D. E. Análise do índice de chuva dirigida em cidades do paraná e sua importância no projeto de fachadas de edifícios. *Revista Técnico-Científica*, 2017.

[31] DE SOUSA PINTO, N. L.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. *Hidrologia básica*. Editora Blucher, 1976.

[32] DE MIRANDA, R. A. C.; DE OLIVEIRA, M. V. S.; DA SILVA, D. F. Ciclo hidrográfico planetário: abordagens e conceitos. *Geo Uerj*, v. 1, n. 21, p. 109–119, 2010.

[33] SHUTTLEWORTH, W. J. *Terrestrial hydrometeorology*. John Wiley & Sons, 2012.

[34] HOBBS, PETER VICTOR E WALLACE, J. M. *Ciência atmosférica: uma pesquisa introdutória*. imprensa acadêmica, 1977.

[35] VILLELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia aplicada*. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1975.

[36] DORNELLES, F.; COLLISCHONN, W. Hidrologia para engenharias e ciências ambientais. *São Paulo: ABRH*, p. 210, 2016.

[37] OLIVEIRA, P. D.; SANTOS E SILVA, C.; LIMA, K. C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of northeast brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 130, p. 77–90, 2017.

[38] SILVA, C. M. DOS S.; OLIVEIRA, J. V. D. C. O. L. P. M. W. H. V. Estudo climatológico de precipitação para as capitais do nordeste brasileiro. *Realize Editora*, 2017.

[39] HASTENRATH, STEFAN E HELLER, L. Dinâmica dos riscos climáticos no nordeste do brasil. *Jornal trimestral da Royal Meteorological Society*, v. 103, n. 435, p. 77–92, 1977.

[40] ROBERTSON, ANDREW W E KIRSHNER, S. E. S. P. Redução da ocorrência diária de precipitação no nordeste do brasil usando um modelo de markov oculto. *Diário do clima*, v. 17, n. 22, p. 4407–4424, 2004.

[41] GIANNINI, A E SARAVANAN, R. E. C. P. O papel de pré-condicionamento da variabilidade do atlântico tropical no desenvolvimento da teleconexão enso: Implicações para a previsão da precipitação no nordeste. *Dinâmica Climática*, v. 22, p. 839–855, 2004.

[42] MARENGO, JOSE A E GALDOS, M. V. E. C. A. E. C. A. P. E. M. F. R. E. V. M. D. S. E. A. R. C. E. A. L. M. E. M. O. L. E. B. F. Seca no nordeste do brasil: Uma revisão das opções de adaptação agrícola e política para a segurança alimentar. *Resiliência Climática e Sustentabilidade*, v. 1, n. 1, p. e17, 2022.

[43] METZ, J.; CALVO, R.; SENO, E. R. M.; ROMERO, R. A. F.; LIANG, Z. Redes complexas: conceitos e aplicações. *Repositório USP*, 2007.

[44] WATTS, D. J.; STROGATZ, S. H. Collective dynamics of 'small-world'networks. *nature*, v. 393, n. 6684, p. 440–442, 1998.

[45] SIVAKUMAR, B.; PUENTE, C. E.; MASKEY, M. L. Complex networks and hydrologic applications. *Advances in nonlinear geosciences*, p. 565–586, 2018.

[46] BARABÁSI, A.-L.; ALBERT, R. Emergence of scaling in random networks. *science*, v. 286, n. 5439, p. 509–512, 1999.

[47] STAM, CORNELIS J E REIJNEVELD, J. C. Análise teórica de grafos de redes complexas no cérebro. *Física biomédica não linear*, v. 1, p. 1–19, 2007.

[48] MIRANDA VERA, A. *Propriedades de redes complexas de telecomunicações*. 2011. Tese (Doutorado em Física) - Universidade de São Paulo, 2011.

[49] MELO SANTOS, A. M.; CAVALCANTI, D. R.; SILVA, J. M. C. D.; TABARELLI, M. Biogeographical relationships among tropical forests in north-eastern brazil. *Journal of biogeography*, v. 34, n. 3, p. 437–446, 2007.

[50] RANTA, PERTTI E BLOM, T. E. N. J. E. J. E. E. S. M. A fragmentada floresta tropical atlântica do brasil: tamanho, forma e distribuição dos fragmentos florestais. *Biodiversidade & Conservação*, v. 7, p. 385–403, 1998.

[51] ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. et al. Köppen's climate classification map for brazil. *Meteorologische zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.