



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI - UFCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO
REGIONAL SUSTENTÁVEL

JOSÉ REGINALDO MEDEIROS FEITOSA

**ESTUDO COMPARATIVO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO DO
SATÉLITE TRMM E POSTOS PLUVIOMÉTRICOS NO ESTADO
DO CEARÁ**

**CRATO - CE
2019**

JOSÉ REGINALDO MEDEIROS FEITOSA

**ESTUDO COMPARATIVO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO DO SATÉLITE
TRMM E POSTOS PLUVIOMÉTRICOS NO ESTADO DO CEARÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável do Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade da Universidade Federal do Cariri, como requisito para obtenção do título de mestre em Desenvolvimento Regional Sustentável.

Orientador: Prof. PhD. Carlos Wagner Oliveira

**CRATO - CE
2019**

Dados Internacionais de Catalogação na
Publicação Universidade Federal do Cariri
Sistema de Bibliotecas

F311e Feitosa, José Reginaldo Medeiros.
Estudo comparativo dos dados de precipitação do satélite TRMM e postos
pluviométricos no estado do Ceará / José Reginaldo Medeiros Feitosa. – 2019. 76 f.; enc.;
30 cm. (Inclui Bibliografia p. 67-76).

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Cariri, Centro de Ciências Agrárias e
Biodiversidade, Mestrado em Desenvolvimento Regional Sustentável, Crato,
2019.

Orientação: Prof. PhD. Carlos Wagner Oliveira.

1. Sustentabilidade. 2. Recursos Hídricos. 3. Sensoriamento Remoto. I. Título.

CDD 551.69098131

Bibliotecário: João Bosco Dumont do Nascimento – CRB 3/1355

JOSÉ REGINALDO MEDEIROS FEITOSA

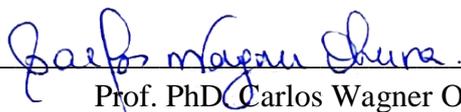
**ESTUDO COMPARATIVO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO DO SATÉLITE
TRMM E POSTOS PLUVIOMÉTRICOS NO ESTADO DO CEARÁ.**

Linha de Pesquisa: Desenvolvimento Regional Sustentável

Sublinha de pesquisa: Sensoriamento Remoto e Monitoramento Ambiental

Data de Aprovação: 22/03/2019

Banca Examinadora:



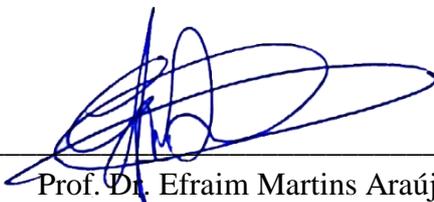
Prof. PhD Carlos Wagner Oliveira
(Orientador / UFCA)



Prof. Dr. Paulo Renato Alves Firmino
(Membro interno / UFCA)



Profa. Dra. Ana Célia Maia Meireles
(Membro interno / UFCA)



Prof. Dr. Efraim Martins Araújo
(Membro externo / IFCE)

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste trabalho contou com o apoio de pessoas às quais serei sempre grato e expressarei meus agradecimentos.

À minha mãe Maria Lúcia e minhas irmãs Adriana, Luciana, Eugênia e Germana que sempre me deram total apoio e sábias palavras.

À minha esposa Marina, a quem sou grato pelo nosso laço afetivo e no companheirismo que temos um pelo outro.

Ao meu orientador Prof. Carlos Wagner, pela sua dedicação, tempo e assistência prestados durante todo o processo de construção deste trabalho e em especial aos professores Ana Célia Maia Meireles, Paulo Renato Alves Firmino da UFCA e dos professores Eliakim Martins Araújo e Efraim Martins Araújo do IFCE.

A todo o corpo docente do Mestrado Desenvolvimento Regional Sustentável, por me apresentar novos conceitos e conhecimento que levarei comigo para o resto da vida.

Aos meus colegas de PRODER que me proporcionaram novas amizades e boa convivência: Ademar, Alana, Julliana, Camila, Luíza, Lídia, Aparecida, Paulo, Sheilla, Thaís, Ângela e especialmente ao amigo Jair Paulino, por sua generosidade em ajudar todos ao seu redor, são demonstrações de um ser humano justo, sábio e sensato.

E finalmente um muito obrigado a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo auxílio da bolsa durante boa parte do mestrado.

“No começo pensei que estivesse lutando para salvar as seringueiras, depois pensei que estava lutando para salvar a Floresta Amazônica. Agora, percebo que estou lutando pela humanidade”.

CHICO MENDES

RESUMO

O Nordeste do Brasil é caracterizado pelo clima semiárido e pela irregularidade das chuvas ao longo do tempo, que comprometem a produção agrícola, o abastecimento público e outros setores. Neste sentido, pesquisas que promovam o Desenvolvimento Sustentável aliadas ao conhecimento científico, tornam-se essenciais para o enfrentamento das adversidades climáticas, como também dá subsídios para a implementação de políticas públicas voltadas para a sustentabilidade. Esta pesquisa teve por objetivo, comparar dados de chuva das estações pluviométricas da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), com as estimativas de precipitação do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), para o período de 1 de janeiro de 1998 a 31 de dezembro de 2017, para todo o estado do Ceará. Na primeira parte da pesquisa, foi analisada a densidade dos pluviômetros estudados, de acordo com as recomendações da *World Meteorological Organization* (WMO), e na segunda etapa, os dados de ambas as fontes foram comparados por meio do Pixel a Ponto, Ponto a Pixel, e Pixel a Pixel, juntamente com o auxílio do interpolador Inverso do Peso da Distância. A terceira etapa as comparações foram submetidas as métricas de acurácia o Erro Médio Absoluto (EMA), a Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQU), o Percentual bias (Pbias) e o Coeficiente de correlação (r). Os resultados das análises indicaram que a quantidade de postos pluviométricos no Ceará está abaixo do recomendado pela WMO. Quanto aos dados estimados de precipitação do TRMM, no geral, se apresentaram próximos do observados em solo, sendo a comparação pixel a pixel apresentou os menores erros e a maior correlação.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Recursos Hídricos, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

The Northeastern Brazil is characterized by semi-arid climate and irregular rainfall over time, which compromise agricultural production, public supply and other sectors. In this sense, research that promotes Sustainable Development together with scientific knowledge becomes essential for coping with climatic adversities, as well as providing subsidies for the implementation of public policies aimed at sustainability. The objective of this research was to compare rainfall data from rainfall stations of the And Rainfall Measuring Mission (TRMM), for the period from January 1, 1998 to December 31, 2017, for the entire state of Ceará. In the first part of the research, the density of the studied pluviometers was analyzed, according to the recommendations of the World Meteorological Organization (WMO), and in the second stage, data from both sources were compared through Pixel a Ponto, Ponto a Pixel, and Pixel to Pixel, along with the aid of the Inverse Weight of Distance interpolator. The third step of the comparisons were submitted to the Absolute Mean Error (EMA), Mean Square Error Root (REMQ), Percent bias (Pbias) and Correlation Coefficient (r) metrics. The results of the analyzes indicated that the number of pluviometric stations in Ceará is below that recommended by the WMO. Concerning the estimated TRMM precipitation data, in general, they were close to that observed in soil, and the comparison between pixel and pixel presented the smallest errors and the highest correlation.

Keywords: Sustainability, Water Resources, Remote Sensing.

Lista de Figuras

Figura 1 - Pluviômetro tipo Ville de Paris, modelo padrão para medição de chuva em vários países.....	24
Figura 2 - Faixas do espectro eletromagnético captados por sensores ópticos.....	27
Figura 3 - Exemplo de imagem com sensor de luz visível (esquerda) e imagem por radiação eletromagnética (direita), nesse último caso há um realce dos diferentes objetos da superfície.....	28
Figura 4 - Radar meteorológico Quixeramobim.....	29
Figura 5 - Instrumentos a bordo TRRM.....	30
Figura 6 - Plano orbital do TRRM.....	31
Figura 7 - Campo de observação do TRRM.....	31
Figura 8 - Esquema de funcionamento dos sensores do TRRM.....	32
Figura 9 - Mapa de Localização do Estado Ceará.....	35
Figura 10 - Mapa da Geomorfológico do Ceará.....	36
Figura 11 - Mapa Climático do Estado Ceará.....	37
Figura 12 - Mapa dos postos pluviométricos utilizados na pesquisa.....	40
Figura 13 - Mosaico de pixels do TRMM com valores mensais utilizados na pesquisa, 01/2004.....	41
Figura 14 - Distribuição espacial dos postos pluviométricos em relação aos pixels do TRMM, 02/2004.....	44
Figura 15 - Distribuição de postos pluviométricos por região fisiográfica do Ceará.....	48
Figura 16 - Distribuição de postos pluviométricos por polígonos de Thiessen.....	49
Figura 17 - Densidade de postos pluviométricos por polígonos de Thiessen.....	50
Figura 18 - Mapa do resultado do EMA para as comparações A, B, C e D.....	52
Figura 19 - Mapa do resultado do REMQ para as comparações A, B, C e D.....	54
Figura 20 - Mapa dos valores do Pbias para as comparações A, B, C e D.....	56
Figura 21 - Mapa com a correlação entre pluviometria observada e estimada para as comparações A, B, C e D.....	58

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Seleção dos postos pluviométricos.....	39
Tabela 2 - Densidade mínima de estações pluviométricas (Km ² /estação) recomendado pela de WMO.....	47
Tabela 3 - Densidade de estações pluviométricas para as regiões fisiográficas do Ceará de acordo com as recomendações da WMO.....	49
Tabela 4 - Densidade de estações pluviométricas para as regiões fisiográficas do Ceará com polígonos de Thiessen.....	50
Tabela 5 - Demonstra valores obtidos com EMA.....	52
Tabela 6 - Demonstra valores obtidos com REMQ.....	54
Tabela 7 - Demonstra valores obtidos com PBIAS.....	56
Tabela 8 - Demonstra valores da correlação (r)	58
Tabela 9 - Resumo dos resultados para todas as comparações.....	60

Lista de Quadros

Quadro 1 - Esquema do TMPA e suas etapas para gerar os produtos 3B42_V7 e 3B43_V7.....	34
Quadro 2 - Diagrama dos métodos Comparativos.....	43

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Gráfico de box-plot do EMA com as comparações entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.....	53
Gráfico 2 – Gráfico de box-plot da REMQ com as comparações entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.....	54
Gráfico 3 – Gráfico de box-plot do Pbias com as comparações entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.....	56
Gráfico 4 – Gráfico de box-plot da correlação (r) das comparações entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.....	58
Gráfico 5 – Gráfico de dispersão linear da média da comparação A entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.....	65
Gráfico 6 – Gráfico de dispersão linear da média da comparação B entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.....	66
Gráfico 7 – Gráfico de dispersão linear da média da comparação C entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.....	67
Gráfico 8 – Gráfico de dispersão linear da média da comparação D entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.....	67

Lista de Siglas e Abreviaturas

CERES	Sistema de Energia Radiante de Nuvens e da Terra (em inglês, <i>Clouds and Earth's Radiant Energy System</i>)
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
EMA	Erro Médio Absoluto
ESA	European Space Agency
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GOES	Satélite Ambiental Operacional Geoestacionário (em inglês, <i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>)
GPCC	Centro de Climatologia e Precipitação Global (em inglês, <i>Global Precipitation Climatology Centre</i>)
GPM	Medição de Precipitação Global (em inglês, <i>Global Precipitation Measurement</i>)
GUI	Interface Gráfica do Usuário (em inglês <i>Graphic User Interface</i>)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverso do Peso da Distância (inglês <i>Inverse Distance Weighted</i>)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
IR	Infravermelho (em inglês, <i>Infra-red</i>)
JAXA	Agência Aeroespacial Japonesa de Exploração (em inglês, <i>Japan Aerospace and Exploration Agency</i>)
LIS	Sensor de Relâmpagos (em inglês, <i>Lightning Imaging Sensor</i>)
MW	Microondas (em inglês, <i>Microwave</i>)
NASA	Administração Nacional Espacial Aeronautica (em inglês, <i>National Aeronautic and Space Administration</i>)
NASDA	Agência Nacional de Desenvolvimento Aeroespacial do Japão (em inglês <i>National Aero Space Development Agency</i>)
PR	Radar de Precipitação (em inglês, <i>Precipitation Radar</i>)
QGIS	Quantum GIS
REM	Radiação Eletromagnética

REMQ	Raiz do Erro Médio Quadrático
SR	Sensoriamento Remoto
TMI	Radar Microondas do TRMM (em inglês, <i>TRMM Microwave Imager</i>)
TMPA	Análise de Precipitação por Múltiplos Satélites (em inglês, <i>TRMM's Multi-satellite Precipitation Analysis</i>)
TRMM	Missão de Medição de Chuvas Tropicais (em inglês, <i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>)
UECE	Universidade Estadual do Ceará
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (em inglês <i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>)
UV	Ultravioleta
VIRS	Sistema Radiômetro Visível e Infravermelho (em inglês, <i>Visible and Infrared Radiometer System</i>)
VIS	Sensor de Luz Visível (<i>Visible Light Sensor</i>)
WMO	Organização Meteorológica Mundial (em inglês <i>World Meteorological Organization</i>)

Lista de Símbolos

Σ - Soma

n – número de dados analisados

i – intervalo de tempo

E -Pluviometria estimada

O - Pluviometria observada

\bar{E} - Média da pluviometria estimada

\bar{O} - Média da pluviometria observada

$\sqrt{\quad}$ - Raiz quadrada

Sumário

1 – INTRODUÇÃO	17
2 - OBJETIVOS.....	20
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 – Desenvolvimento Sustentável, Educação Ambiental e Inovação Tecnológica.....	21
3.2 – Pluviometria	24
3.3 – Sensoriamento Remoto.....	26
3.4 – O Satélite TRMM	31
3.5 – O TMPA e o Produto 3B43_V7.....	35
4 – MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1 – Área do Estudo	37
4.1.1 – Aspectos Geomorfológicos	38
4.1.2 - Aspectos Climáticos.....	39
4.2 – Visão Geral da Metodologia	40
4.3 Precipitação Observada (Pluviômetros)	41
4.4 Precipitação Estimada (TRMM)	42
4.5 – Densidade de Postos Pluviométricos no Estado do Ceará	43
4.6 - Metodologias de Comparação	44
4.6 - Interpolação	45
4.7 - Métricas de Acurácia	47
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
5.1 - Rede Pluviométrica Mínima	50
5.2 –Espacialização do Dados e Avaliação Estatística.....	55
5.2.1 - Erro Médio Absoluto – EMA.....	55
5.2.2 – Raiz do Erro Médio Quadrático – REMQ.....	57
5.2.3 – Pbias	60
5.2.3 – Correlação (r).....	62
5.2.4 - Resumo das métricas entre as comparações	64
5.2.5 – Comparação Através de Gráfico de Dispersão.....	65
6 – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
7 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1 – INTRODUÇÃO

O ponto de partida para a construção desta pesquisa, inicia-se pela busca de compreender melhor o clima do Ceará, especialmente quanto as chuvas. Para tanto, fez-se uso de imagens de satélite para quantificação das precipitações, procurando melhorar os dados de chuva justamente no momento em que a região passa por dos períodos de maior estiagem.

O estudo do clima é de fundamental importância para entender dinâmica atmosférica terrestre, tendo em vista que auxilia no “planejamento estratégico dos recursos hídricos, subsidiando estudos associados ao balanço hídrico, controle de inundações, irrigação de culturas, modelagem hidrológica, monitoramento de seca e de geada e caracterização climatológica” (LOUZADA, 2016).

A busca por um modelo de desenvolvimento sustentável demanda também por conhecer a disponibilidade de água em todo seu ciclo hidrológico. Todavia a ausência de informações hídricas impossibilita que políticas públicas e a gestão correta dos recursos naturais sejam geridos com eficiência, principalmente em países em desenvolvimento. Assim sendo, é necessário que sejam aplicados mecanismos de gestão, sendo que para isso, primeiramente é preciso mensurar todos os recursos com boa resolução temporal e espacialidade.

O modelo de medição de chuva padrão têm sido pela a utilização de pluviômetros e/ou pluviógrafos, apesar de serem precisos, “cobrem pequenas áreas, sendo necessária a existência de uma densa rede pluviométrica para que haja monitoramento detalhado em grandes áreas” (COLLISCHONN, 2006; FENSTERSEIFER, 2013).

Em outros contextos ocorre a ausência da rede pluviométrica, em função dos altos custos técnicos para realização das leituras, sendo que “as estações meteorológicas convencionais fornecem registros pontuais, frequentemente sujeitos a falhas que limitam o uso dessas informações e, contribuindo com a baixa densidade de pluviômetros, e a distribuição irregular dos pluviômetros, não permite capturar a variabilidade espacial das chuvas, gerando incertezas nos resultados de diversos estudos aplicados no país” (SILVA-FUZZO; ROCHA, 2016).

Perante essas questões que dificultam a obtenção de dados pluviométricos, é imprescindível a adoção de novas fontes de informações que permitam obter dados confiáveis e com suficiente densidade espacial. Sendo assim, a utilização de sensores remotos na estimativa de precipitação vem mostrando ser uma alternativa importante para se contrapor a tais problemas (NÓBREGA et al., 2008), dentro das possibilidades financeiras e técnicas dos governos, de instituições de pesquisa e demais órgãos da sociedade.

Dentre os métodos de medição das chuvas por sensoriamento remoto, o satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), lançado em 1997, permite obter dados de precipitação pluvial e resolução temporal em escala mensal e diária desde o ano 1998 (PEREIRA et al., 2013). O TRMM é formado por diversos produtos de estimativas de chuvas, cujo objetivo é o melhoramento da medição da precipitação tropical por sensoriamento remoto (SODRÉ et al., 2013; AIRES et al., 2016).

A rede de postos pluviométricos no estado do Ceará, é gerenciada pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) que conta com cerca de 850 postos¹, um número considerado elevado, porém foi verificado durante o decorrer desta pesquisa que muitos postos têm ausência de dados ou não estão em seu funcionamento pleno para uma representação adequada da espacialidade das chuvas em todo o estado.

Diante disso, esta pesquisa se propôs a comparar e avaliar a qualidade das estimativas de chuva geradas a partir do satélite TRMM, produto 3B43_V7, na área que compreende o estado do Ceará num período correspondente a 20 anos, entre 1 de janeiro de 1998² a 31 de dezembro de 2017, aplicando diferentes métodos de comparação e aplicando testes estatísticos, considerando a grande quantidade de metodologias empregadas em outras pesquisas sobre a mesma temática.

Ao passarem pelos processos de comparação e avaliação, os dados de estimativas de precipitação derivada dos sensores remotos, podem se tornar informações complementares às coletadas em solo e até mesmo suprir a carência de dados de

¹ Disponível no site da FUNCEME para séries históricas de chuvas.

² Iniciou-se a pesquisa a partir de 1 de janeiro de 1998, para coincidir com o início das atividades do TRMM.

precipitação em determinadas regiões onde o monitoramento é precário ou inexistente (BERNARDI, 2016).

Assim, torna-se necessária uma avaliação dessas estimativas do TRMM no estado do Ceará, pois se os dados forem concordantes irá contribuir no entendimento da distribuição espacial e quantidade das chuvas. Com a evolução das tecnologias utilizadas para estimar a precipitação por sensoriamento remoto, aliado as técnicas de correção, torna-se cada vez mais viável a utilização dessas informações em colaboração mútua com as medições tradicionais em busca de melhores resultados.

2 - OBJETIVOS

Geral:

Comparar os dados de precipitação estimada pelo satélite TRMM com a precipitação observada nos postos pluviométricos da FUNCEME para o estado do Ceará.

Objetivos específicos:

- Avaliar a densidade demográfica dos postos pluviométricos da FUNCEME no estado do Ceará, em relação as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (do inglês *World Meteorological Organization - WMO*);
- Analisar a qualidade das estimativas do TRMM em relação aos dados pluviométricos da FUNCEME no estado do Ceará;
- Comparar os métodos propostos nesta pesquisa e sugerir a melhor metodologia de comparação para estimativas de precipitações.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção foi dedicada as bases teóricas em que o presente trabalho se embasa, abordando os conceitos referentes ao desenvolvimento sustentável, técnicas de medições pluviométricas, sensoriamento remoto e ao TRMM e seus produtos. Além disso, debaterá questões inerentes ao educação ambiental e inovação tecnológica.

3.1 – Desenvolvimento Sustentável, Educação Ambiental e Inovação Tecnológica

Embora seja inegável que o avanço tecnológico e o progresso da ciência trouxeram enormes benefícios a humanidade, o mesmo não vem ocorrendo com o meio ambiente, ao tempo em que, o uso desenfreado dos recursos naturais para atender a uma demanda do consumo em massa, degradou os mais variados ecossistemas e conseqüentemente está afetando negativamente a vida em todo planeta.

A partir das décadas de 60 e início da década de 70 do século XX, esse modelo econômico passou a ser bastante criticado por ambientalistas, intelectuais e pela comunidade acadêmica, que perceberam que o consumo excessivo dos recursos naturais, tornaria a vida no planeta insustentável num futuro relativamente próximo.

Dentre as principais contribuições daquela época, destacam-se a obra Primavera Silenciosa (em inglês *Silent Spring, 1962*), de Rachel Carson (2010)³, que alerta para os efeitos nocivos do uso de pesticidas na agricultura; o Clube de Roma, que em foi criado 1968 e incluía políticos, cientistas e intelectuais; e a Conferência da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) em Estocolmo em 1972, primeiro grande encontro internacional para a discutir os problemas ambientais. Foi nesta conferência que surgiu a ideia de ecodesenvolvimento, que serviria de inspiração para o conceito de desenvolvimento sustentável que viria a ser proposto posteriormente. Sobre este momento Casagrande (2004) descreve, “desde então, o modelo econômico vigente e seus negativos impactos sociais e ambientais vem sendo apontados por especialistas atuantes em diversas áreas. No notório relato dos anos 70, dos cientistas que compunham o Clube de Roma, a relação entre consumo desenfreado dos

³ Publicada no Brasil pela editora Gaia (última edição publicada em 2010).

recursos naturais, crescimento demográfico e degradação ambiental era denunciada no próprio título do trabalho: Os Limites do Crescimento (*The Limits to Growth*, 1972).

O conceito de Desenvolvimento Sustentável, só foi definido pela Comissão de Brundtland que apresentou o relatório Nosso Futuro Comum (em inglês *Our Common Future*, 1987), onde o termo desenvolvimento sustentável foi expressado pela primeira vez tal qual é utilizado atualmente (SANTOS, 2011). Este relatório define da seguinte maneira: Desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras de atenderem as suas próprias necessidades. A partir de então o significado de crescimento no que diz respeito ao âmbito econômico, passou a ter conotação diferente de desenvolvimento.

Portanto, a ideia de progresso associado ao crescimento econômico, que no sistema capitalista materializa-se na acumulação de bens materiais, vai de encontro aos limites do planeta quanto ao fornecimento de recursos que subsidiam a produção e o consumo (ARAÚJO et al., 2014). Isso porque não há como separar os prejuízos ambientais dos prejuízos sociais, um exemplo recente foi o rompimento das barragens de Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019, onde a empresa que explora a mineração na região, priorizou o crescimento do seu capital financeiro, quando deveria priorizar o equilíbrio da sua atividade aliado a segurança e bem-estar social e ambiental.

De fato, a sustentabilidade só ocorrerá quando ações sistêmicas forem capazes de transformar os modelos tecno-econômicos atuais, em resoluções que promovam a real qualidade de vida as atuais e futuras gerações, respeitando nossas diversidades culturais e potencializando nossas características regionais. Necessita-se colocar o direito a um ambiente saudável no mesmo nível de direito ao acesso a renda, saúde, habitação, educação e lazer⁴ (CASAGRANDE, 2004).

Diante desse paradoxo entre o consumo em massa e a capacidade limitada do meio ambiente de fornecer recursos, a humanidade deve aceitar o desafio de construir um novo modelo de desenvolvimento. Mas qual desenvolvimento seria esse, que permita atender às necessidades humanas e ao mesmo tempo que fosse ambientalmente viável?

⁴ O autor faz referência ao Art. 255 da Constituição Federal de 1988, que foi influenciada pelo conceito de desenvolvimento sustentável da Comissão de *Brundtland* um ano antes.

Urge, portanto, encontrar um modelo alternativo de desenvolvimento que melhor atenda aos anseios da sociedade por um mundo melhor para todos e sustentável ao longo do tempo (ARAÚJO et al., 2014). A criação desse novo modelo de sustentabilidade inevitavelmente passará por duas frentes, a primeira sendo pela vertente da Educação Ambiental e a segunda por inovação de tecnologias alternativas.

Primeiramente, a Educação Ambiental tem papel fundamental em promover a compreensão da inter-relação que existe entre a economia, a política, a sociedade e meio ambiente, de modo que facilite a inclusão de novas formas de conduta dos indivíduos, tornando-os capazes de pensar e agir em prol de alternativas e soluções para os problemas ambientais.

A educação ambiental é uma ferramenta de transformação da sociedade, não apenas em espectadores de uma realidade alheia e distante, mas atores de uma realidade presente, onde todos tenham plenas condições de igualdade de recursos ambientais. A formação de indivíduos conscientes através da Educação Ambiental, possibilitará que no futuro a maioria dos consumidores prefiram por produtos na qual o processo de fabricação causou menos danos ao meio ambiente.

“A Educação Ambiental, ao buscar valores que conduzam a uma convivência harmoniosa com o ambiente e as demais espécies que habitam o planeta, oportuniza numa análise crítica do princípio antropocêntrico, que tem levado, muitas vezes, à destruição inconsequente dos recursos naturais e de várias espécies. É preciso considerar que a natureza não é fonte inesgotável de recursos, suas reservas são finitas e devem ser utilizadas de maneira racional, evitando o desperdício e considerando a reciclagem como processo vital” (RECH, pag. 121 e 122, 2014).

Em contrapartida, a inovação tecnológica seria esse elemento mobilizador para essa mudança, não apenas em relação as questões técnico-científicas, mas à medida que busca aperfeiçoar os processos produtivos, criará uma ponte de diálogo entre setor produtivo e sociedade. Para Pinsk e Kruglianskas (2017), sobre o contexto das inovações tecnológicas orientadas para a sustentabilidade: “demandará disponibilidade de capital de risco, e deverá contar com a liderança das empresas, suportadas por políticas públicas condizentes com os desafios impostos pelas mudanças climáticas, e desenvolvimento de uma nova economia de baixo carbono”.

Segundo Guerra et al. (2016) o desafio, neste momento, é criar condições para que atividades inovadoras atendam as demandas dos diferentes setores da sociedade e fortaleçam a competitividade internacional das empresas. Parece que se observa um reconhecimento crescente de que a sustentabilidade ambiental constitui a força condicionante da transformação da ciência e da tecnologia neste século.

Percebe-se, portanto, que a sustentabilidade depende da adoção de várias práticas e envolve dilemas que se esbarram no consumo consciente, conflitos de interesses, ética e legalidade, que precisam ser mensurados. A sustentabilidade requer uma presença crescente da ciência e da tecnologia na produção de alimentos, na melhoria das condições de saúde, na exploração e preservação de recursos naturais, na agregação de valor à produção industrial, na redução da desigualdade social e do desequilíbrio regional, no desenvolvimento de tecnologias sociais (GUERRA et al., 2016).

Assim sendo, esta pesquisa objetiva dar uma valiosa contribuição sobre dados de precipitação no estado do Ceará, uma vez que a região tem sofrido por uma das maiores secas da sua história, é fundamental conhecer o clima do semiárido, onde os dados pluviométricos são utilizados para a validação de modelos climáticos, previsão do tempo, balanço hídrico e por políticas públicas, portanto, a confiabilidade das estimativas de precipitação torna-se de suma importância (SILVA et al., 2013).

3.2 – Pluviometria

Sabendo que a precipitação é considerada uma das variáveis de grande importância para a região tropical e também uma das mais difíceis de serem observadas com acurácia (AZEVEDO, 2015). Logo, é fundamental conhecer o clima do semiárido, uma vez que, os dados pluviométricos são utilizados para a validação de modelos numéricos de previsão de tempo, previsões climáticas, balanço hídrico e políticas públicas, por tanto, “a confiabilidade das estimativas de precipitação torna-se de suma importância” (SILVA et al., 2013).

Pluviometria é a técnica utilizada para medir em milímetros (mm) a água que precipita em forma de chuva. O termo pluviômetro é composto por duas palavras “*pluvia*” que é de origem latina e significa chuva, e “metro” que é de origem grega e que significa medir.

Não existem referências históricas suficientes sobre as técnicas que eram utilizadas para medir a chuva no passado, o que existe são apenas alguns registros da Grécia Antiga por volta de 500 a. c., quanto a criação de um aparelho para medir a chuva é creditada a um inventor coreano chamado *Jang Yeong-sil*, por volta de 1439, onde “as informações coletadas pelo dispositivo teriam sido usadas para determinar o imposto com base na estimativa da safra de um fazendeiro para o ano” (KOETSIER, et al. 2012), enquanto no ocidente o primeiro registro da utilização de um aparelho medidor de chuva, data de 1662 na Inglaterra, finalmente sendo padronizado aos moldes atuais em 1800, o chamado Pluviômetro do tipo Ville de Paris (Figura 1).

Figura 1: Pluviômetro tipo Ville de Paris, modelo padrão para medição de chuva em vários países.



(Fonte: INPE)

Já em 1940, o Birô do Clima dos Estados Unidos (inglês *US Weather Bureau*) cria uma rede de postos de observação do tempo em diferentes lugares dos Estados Unidos e ali começa a realizar as leituras diárias dos pluviômetros, uma prática que se espalhou pelo mundo e continua até hoje. Para tanto, necessita-se de uma rede de postos, instalados

em locais estratégicos em relação a facilidade de acesso e deslocamento e ainda de técnicos treinados para efetuar as leituras.

Apesar dessa técnica ser praticamente o padrão de medição adotado em muitos países, ela também está susceptível a erros, tendo em vista que a precipitação pode apresentar grande variação espacial e temporal, sendo que os postos pluviométricos se referem a medidas pontuais. Além disso, existem erros e incertezas associados ao monitoramento pluviométrico, haja vista que variáveis como obstáculos e o próprio vento podem influenciar nas medições dos equipamentos (BERNARDI, 2016). Outras falhas de medidas podem ser provocadas por: erros de leitura, perdas por evaporação antes da coleta, obstrução do funil por folhas, insetos, ninhos, ou mesmo defeito no equipamento. Contudo, mesmo havendo erros associados ao modelo convencional de medição das chuvas, os pluviômetros e pluviógrafos compõem ainda a maior fonte de informações relacionadas a essa variável meteorológica.

Existem ainda os pluviômetros automáticos, que além de medir a precipitação, possui um sistema automático que ao acumular uma certa quantia de água, o mecanismo despeja a água coletada e emite um pulso elétrico que registra o volume precipitado. Dentre as principais vantagens do pluviômetro automático são: coleta dados em tempo real, maior precisão nos registros, não necessita se deslocar o local e nem de funcionários para realização das leituras, gera um arquivo com histórico de registros. Porém a grande desvantagem desse sistema é o elevado valor agregado de instalação e manutenção.

3.3 – Sensoriamento Remoto

Para sanar a problemática da carência de dados pluviométricos no que tange a temporalidade e sua espacialização, diversos meios para obtenção de dados climatológicos vêm sendo desenvolvidos e empregados. Nessa perspectiva destacam-se os radares e sensores orbitais (SILVA, et al. 2016).

O termo Sensoriamento Remoto foi proposto nos primeiros anos da década de 1960 e se difundiu em virtude da Guerra Fria entre Estados Unidos e a antiga União Soviética que se rivalizavam pela tecnologia aeroespacial, que ficou conhecido como a “Corrida Espacial”.

Existem diversas definições para o Sensoriamento Remoto (SR), sobre esse tema (MENEZES e ALMEIDA, 2012) definem o “Sensoriamento Remoto é a ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres”.

O SR busca estudar o ambiente terrestre por intermédio dos registros das imagens captadas por sensores, essas imagens são processadas e analisadas por sistemas computacionais que permitem a interpretação de diferentes objetos terrestres. Essa análise é feita a partir da comparação entre as intensidades de radiação eletromagnética absorvidas/refletidas pelas substâncias presentes nesses objetos da superfície terrestre (CONCEIÇÃO e COSTA, 2013).

As vantagens no uso do sensoriamento remoto “consistem no fato de que os sensores a bordo de satélites acabam fornecendo informações rápidas e precisas” (PEREIRA et al., 2013) e o baixo custo para qualquer lugar do mundo. A partir disso, a utilização de produtos provenientes dos satélites tem se tornado cada vez mais essencial em diversas áreas de pesquisa.

Com avanços tecnológicos e aperfeiçoamentos nos sensores, o SR se tornou uma das tecnologias de coleta de dados que mais obtiveram êxitos quanto ao levantamento e monitoramento dos eventos terrestres em escala global. Hoje, as imagens são largamente obtidas por satélites com missões específicas de observação da terra (VERAS, 2013).

Com o uso do SR e suas combinações, é possível registrar variáveis de grande interesse: previsões de tempo, estudos de fenômenos oceânicos, detecção e monitoramento de desastres naturais, queimadas, desmatamento, estimativas de safras agrícolas e estimativas de precipitação pluviométrica, são algumas das aplicações dos produtos de sensoriamento remoto em nível orbital (FLORENZANO 2011). Ressalta-se, que em muitos casos, estes dados requerem um pós-tratamento para aumentar a sua eficácia antes da aplicação prática ou em modelos.

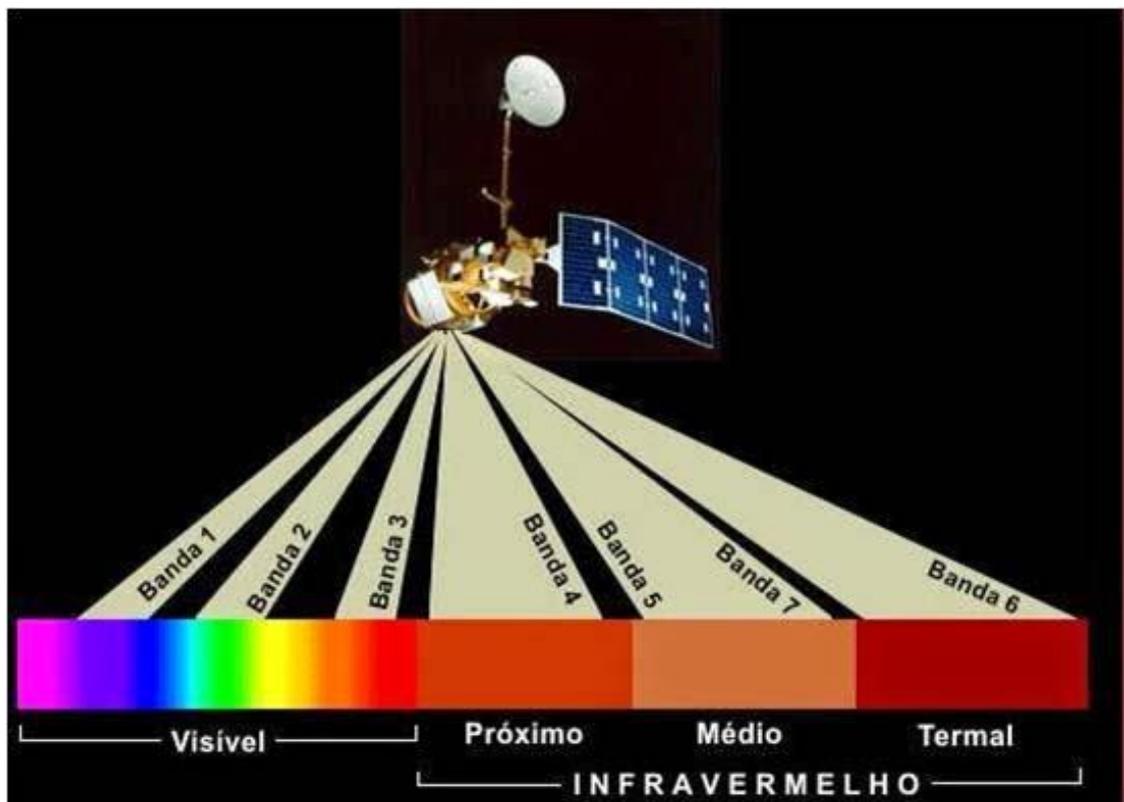
Os tipos de sensores que comumente equipam satélites meteorológicos e são utilizados para captação de imagens são: o Ultravioleta (UV), a Luz Visível (VIS), o Infravermelho (IR) e as Micro-ondas (MW), estes sensores tem a capacidade de medir a

radiação eletromagnética, que constitui o denominado espectro eletromagnético (Figura 2). Eles são compostos geralmente por uma associação de espelhos e lentes, destinados à concentração da radiação eletromagnética proveniente da superfície terrestre sobre o detector (SANTOS, 2013).

Para captação de imagens esses sensores se utilizam basicamente de três artifícios que a radiação eletromagnética passa ao incidir sobre um objeto na superfície terrestre, sendo:

- Transmissão: é a proporção entre radiação transmitida e incidente é denominada transmitância;
- Absorção: é a proporção entre radiação absorvida e incidente é denominada absorptância;
- Reflexão: é a proporção entre radiação refletida e incidente é chamada de reflectância.

Figura 2: Faixas do espectro eletromagnético captados por sensores ópticos.



(Fonte: INPE)

Os objetos alvos do SR são definidos pelo fato que diferentes materiais, têm diferentes reflectâncias na banda do espectro eletromagnético. Quando as respostas espectrais de vários alvos são conhecidas, é possível determinar a natureza de um alvo desconhecido através da comparação da resposta espectral deste com dados de referência (COLLISCHONN, 2006). Esses satélites que utilizam a Radiação Eletromagnética (REM) da luz solar que foi refletida sobre o objeto são chamados de sensores passivos, uma desvantagem dos sensores passivos é que eles não conseguem captar informações quando não há luz solar ou quando a presença de nuvens ofusque seu alvo.

Em contrapartida sensores ativos utilizam REM artificial, que são emitidas por radares instalados nos próprios satélites. Estes instrumentos emitem ondas que quando atingem seu alvo, são refletidas de volta ao satélite, fazendo assim a leitura desse retorno. Essa análise é feita a partir da comparação entre as intensidades de radiação eletromagnética absorvidas/refletidas pelas substâncias presentes nesses objetos da superfície terrestre (CONCEIÇÃO e COSTAS, 2013). A vantagem dos sensores ativos, é que as ondas produzidas por seus instrumentos atravessam as nuvens, podendo ser operados sob qualquer condição atmosférica, também podem ser operados sem a necessidade da luz solar estar incidindo sobre o objeto alvo. Uma desvantagem é que o processo de interação com os alvos não capta tão detalhadamente quanto os sensores passivos (Figura 3).

Figura 3: Exemplo de imagem com sensor de luz visível (esquerda) e imagem por radiação eletromagnética (direita), nesse último caso há um realce dos diferentes objetos da superfície.



(Fonte: ESA / Sentinel 2 user's guide)

Existe uma infinidade de satélites orbitando a Terra com diferentes finalidades, entre eles estão os satélites meteorológicos como PERSSIAN, NOAA ACQUA, TRMM,

GOES e GPM. Estes satélites transportam a bordo sofisticados e sensíveis instrumentos capazes de detecção e medição da radiação emitida ou refletida por alvos existentes em terra, nos oceanos, ou pelas nuvens e camadas da atmosfera, tem propiciado uma vasta gama de dados e informações relacionados ao meio ambiente ALVALÁ et al. (2006).

Outra forma de medição de chuva e que por vezes é pouco mencionada, é através da utilização de radares meteorológicos terrestres, que possibilita a medição de volume de água com alto nível de detalhe espacialmente, entretanto, os dados desta tecnologia apresentam algumas incertezas, pois as medidas são feitas de forma indireta através de ondas de rádio.

Os radares meteorológicos são sensores remotos utilizados principalmente para mapear a distribuição espacial da precipitação, descrever a natureza das partículas de nuvens e determinar o movimento de sistemas precipitantes. Seu uso como instrumento de apoio à meteorologia e hidrologia tem sido crescente, principalmente nas regiões onde a variabilidade espaço-temporal da distribuição de chuva é alta, tal qual observada no Estado do Ceará (FUNCEME, 2018), conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4: Radar meteorológico Quixeramobim.



(Fonte: FUNCEME)

O Ceará possui dois radares meteorológicos em operação, pertencentes a FUNCEME, sendo um Radar Fortaleza, instalado na UECE, Campus do Itaperi com

alcance de 120 km e o segundo o Radar Quixeramobim, localizado estrategicamente na região central do estado com alcance de 450 km, cobrindo toda área do Ceará.

Os radares terrestres são considerados uma importante ferramenta para a previsão de chuva a curto prazo, podendo ser agregado a outros tipos de dados, como detecção de relâmpagos, pluviômetros automáticos, estações totais robotizadas, estações hidrológicas, entre outros.

3.4 – O Satélite TRMM

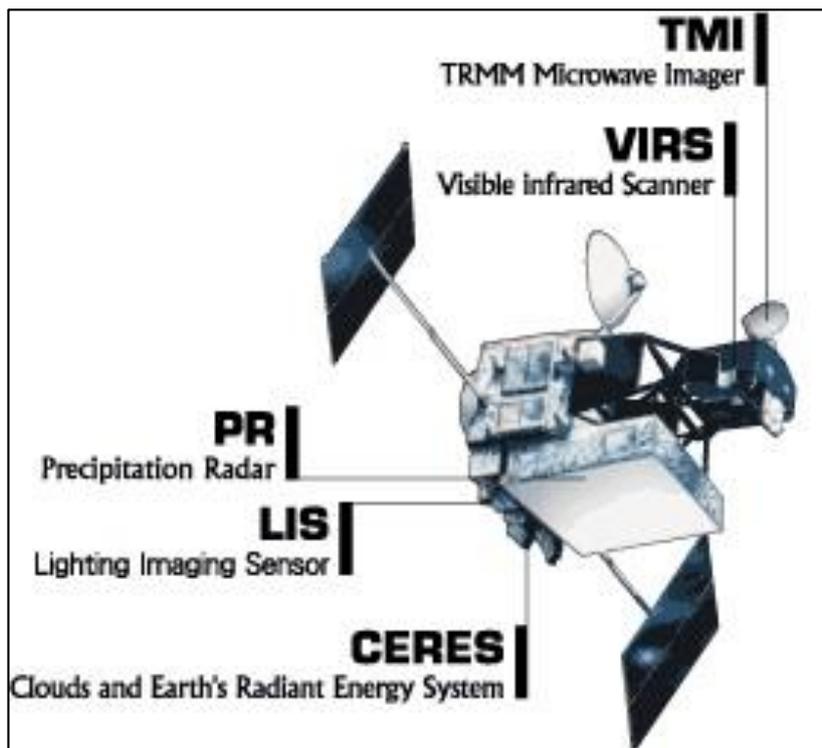
Considerado um avanço na área SR e um dos principais instrumentos orbitais para análise de precipitação, o satélite TRMM, é fruto da parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) (CAMPOS, 2017), tem como intuito, o monitoramento das chuvas tropicais e outros eventos climáticos de influência global.

Seus sensores foram especialmente projetados para quantificação de chuvas, mapeamento 3D de nuvens, direção do ventos e identificação de assinaturas fotoluminosas geradas por relâmpagos. Juntamente, seus instrumentos de medição fazem a varredura diretamente na nuvem, obtendo informações como temperatura, velocidade dos ventos, altitude e humidade, para vários fins diferentes, sendo uma delas para estimar a quantidade de chuva em mm.

Os instrumentos a bordo do TRMM (Figura 5) são:

- Imageador de Micro-ondas (*Microwave Imager - TMI*);
- Radar de Precipitação (*Precipitation Radar - PR*);
- Radiômetro no Visível e no Infravermelho (*Visible and InfraRed Scanner - VIRS*);
- Sensor de Imageamento de luz (*Lightning Imaging Sensor - LIS*);
- e o Sensor de Energia Radiante da Superfície Terrestre e das Nuvens (*Clouds and Earth Radiant Energy System - CERES*), que falhou após oito meses de operação.

Figura 5: Instrumentos a bordo TRMM.



(Fonte: NASA/TRMM)

O satélite possui órbita não-heliossíncrona, é excepcionalmente baixa (era de 350 km, a partir de 2001 passou para cerca de 403 km) em relação aos outros satélites atmosféricos, dessa forma o seu período de translação é bastante curto, somente 90 minutos, permitindo resolução temporal comparativamente alta (Figura 6). O TRMM tem a capacidade de amostragem de resolução espacial de aproximadamente 25 x 25 km por pixel (SILVA-FUZZO, 2016).

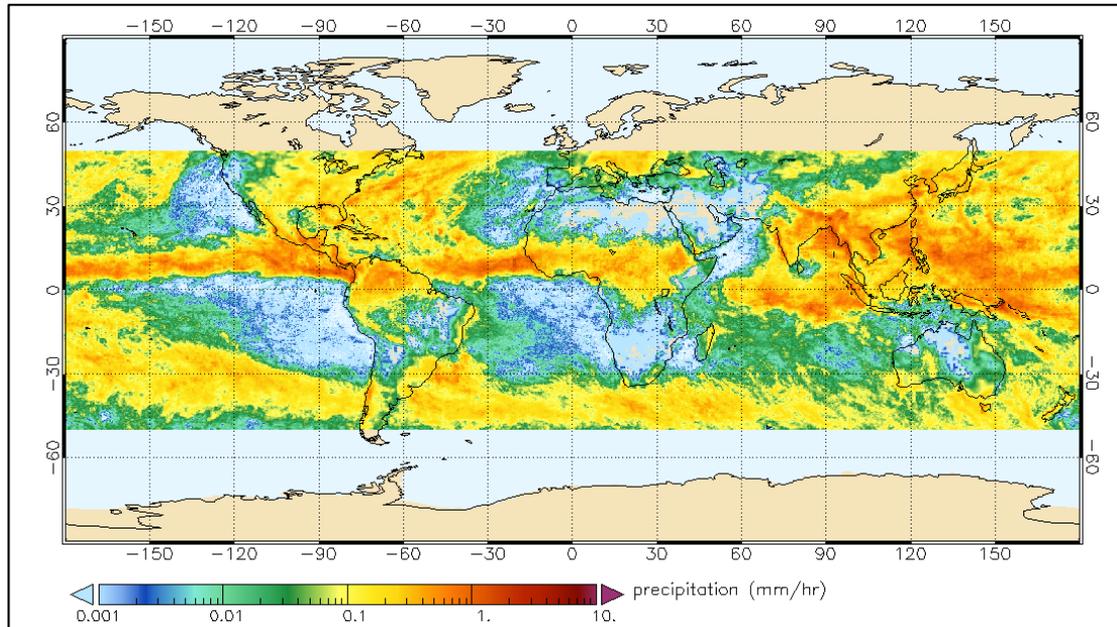
Figura 6: Plano orbital do TRMM.



(Fonte: NASA/TRMM)

O TRMM foi projetado com objetivo de monitorar e estudar a precipitação nos trópicos, entre as latitudes 50°N e 50°S, além de fornecer estimativas diárias e mensais de precipitação (Figura 7). Esta missão fornece estimativas diárias a cada três horas (produto 3B42_V7) e mensais (produto 3B43_V7) com uma resolução de 25 x 25 km (NASA, 2014).

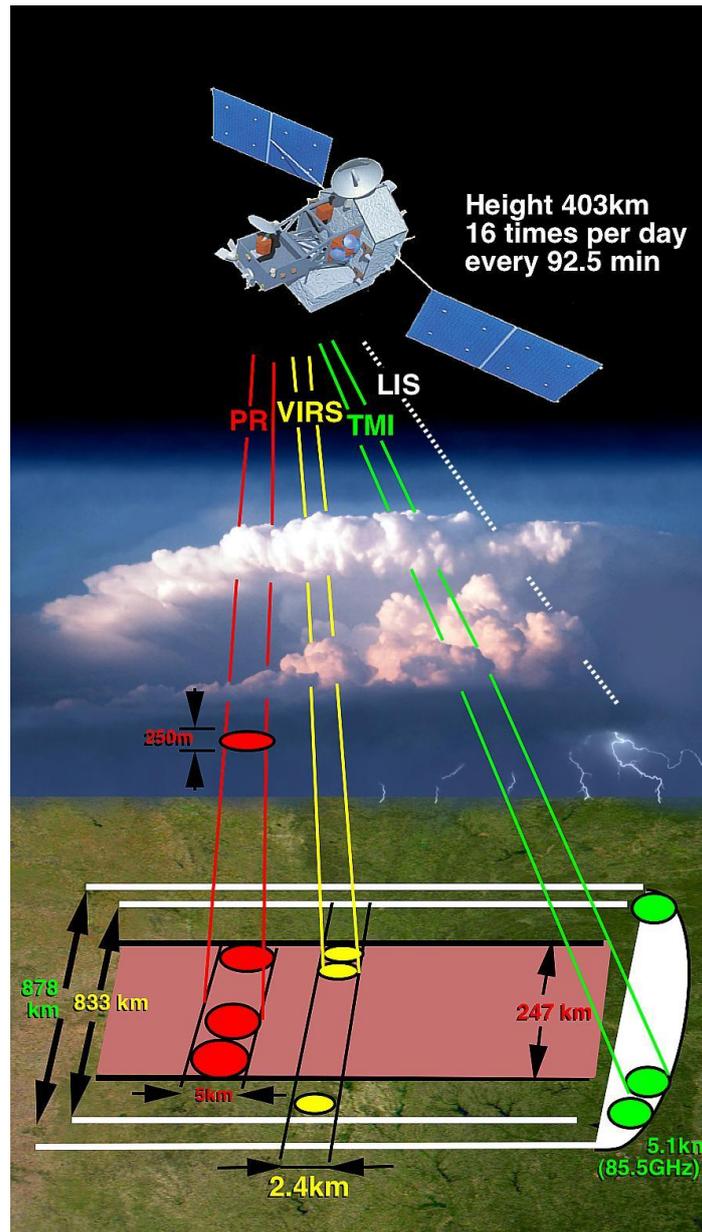
Figura 7: Campo de observação do TRMM.



(Fonte: NASA/TRMM)

As leituras dos instrumentos do TRMM (Figura 8), combinadas com informações de outras fontes de dados e alinhados a sofisticado algoritmo geram dois produtos principais, sendo respectivamente o 3B42_V7 com estimativas de 3 em 3 horas e o 3B43_V7 para estimativas acumuladas mensalmente, esse procedimento de combinação de dados é chamado de Análise de Precipitação por Múltiplos Satélites (do inglês *Tropical Multisatellite Precipitation Analysis - TMPA*).

Figura 8: Esquema de funcionamento dos sensores do TRMM.



(Fonte: NASA/TRMM)

A missão do TRMM continuou até outubro de 2014 quando paralisou por falta de combustível, chegando assim ao seu fim em junho de 2015 quando o satélite reentrou na atmosfera terrestre caindo sobre Oceano Índico Sul.. Atualmente os produtos do TRMM foram sucedidos pelos dados dos satélites da missão de Medição de Precipitação Global (em inglês *Global Precipitation Measurement – GPM*), seu sucessor tanto em instrumentos mais sensíveis e precisos, quanto na cobertura que agora passou a ser global.

3.5 – O TMPA e o Produto 3B43_V7

O TMPA foi projetado para combinar estimativas de precipitação de diversos satélites por meio de uma série de algoritmos (Quadro 1). Quando possível também são combinadas precipitações observadas em solo, a fim de gerar melhores estimativas BERNARDI (2016).

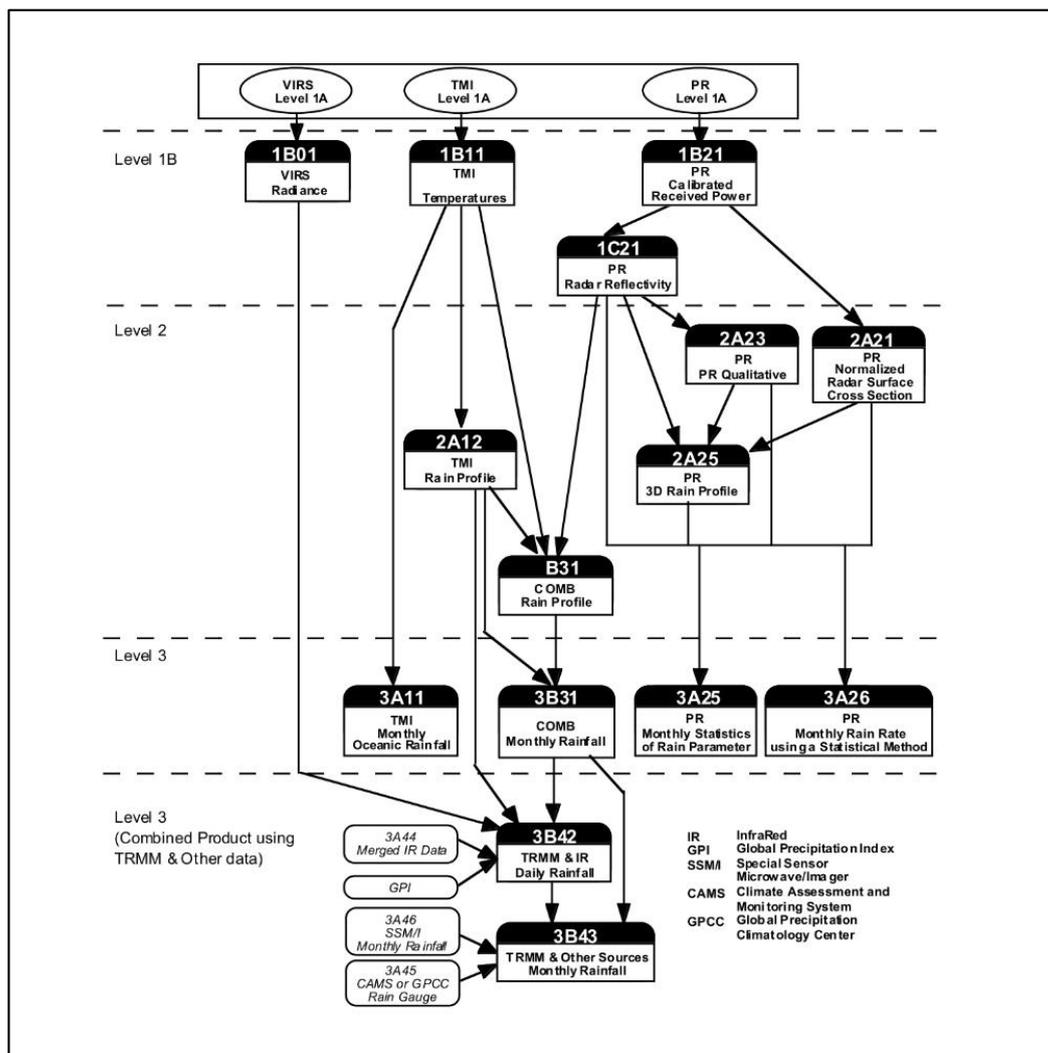
Os produtos do TRMM são compostos por dados coletados por seus diferentes sensores e combinados de variadas fontes, inclusive sensores de outros satélites, sendo então conhecidos como TMPA, que por sua vez, resultam no 3B42_V7 e 3B43_V7.

O produto 3B42_V7, é uma estimativa de precipitação gerada a cada 3 horas pelo seu algoritmo apresenta espaçamento horizontal de 25 x 25 km e frequência de 3 horas. A estimativa 3B42_V7 é feita em duas fases. Na primeira, o algoritmo combina a precipitação estimada pelo TMI e o perfil de precipitação do PR, que gera o produto que é chamado de 3B31, em seguida, o 3B31 é usado para corrigir as estimativas de precipitação feitas através do satélite GOES, que é dada a cada 3 horas, (ROCHA, 2015) gerando o produto final 3B42_V7.

Já o produto 3B43_V7, objeto desta pesquisa, é uma estimativa de precipitação mensal que combina dados do satélite sobre áreas continentais e oceânicas, tem a vantagem de cobrir tanto em áreas continentais quanto em áreas oceânicas, o que não é possível com os dados do Centro de Climatologia Global por Precipitação (em inglês *Global Precipitation Climatology Centre – GPCC*) (FLEMING et al, 2011).

O produto 3B43_V7, deriva de dois outros produtos: a estimativa com frequência de 3 horas do algoritmo 3B42_V6 e a precipitação observada por pluviômetros do projeto GPCC (MENG et al., 2014). O produto TRMM 3B42_V6, por sua vez, realiza duas operações para efetuar a estimativa de precipitação. Na primeira etapa o algoritmo combina a precipitação estimada pelo TMI, que é um sensor de microondas passivo projetado para fornecer informações quantitativas de precipitação, com o perfil de precipitação do PR, instrumento que fornece mapas tridimensionais da estrutura da precipitação (POMBO e OLIVEIRA, 2015).

Quadro 1: Esquema do TMPA e suas etapas para gerar os produtos 3B42_V7 e 3B43_V7.



(fonte: NASDA, 2001)

Ainda em relação aos dados 3B43_V7, diversos autores concluíram que as estimativas apresentam boa similaridade com os dados observados, sendo utilizados para observar a variabilidade da precipitação em diversos lugares do mundo. Resta saber se com a proposta metodológica desta pesquisa, esses dados terão ainda uma boa correlação para no Estado do Ceará.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

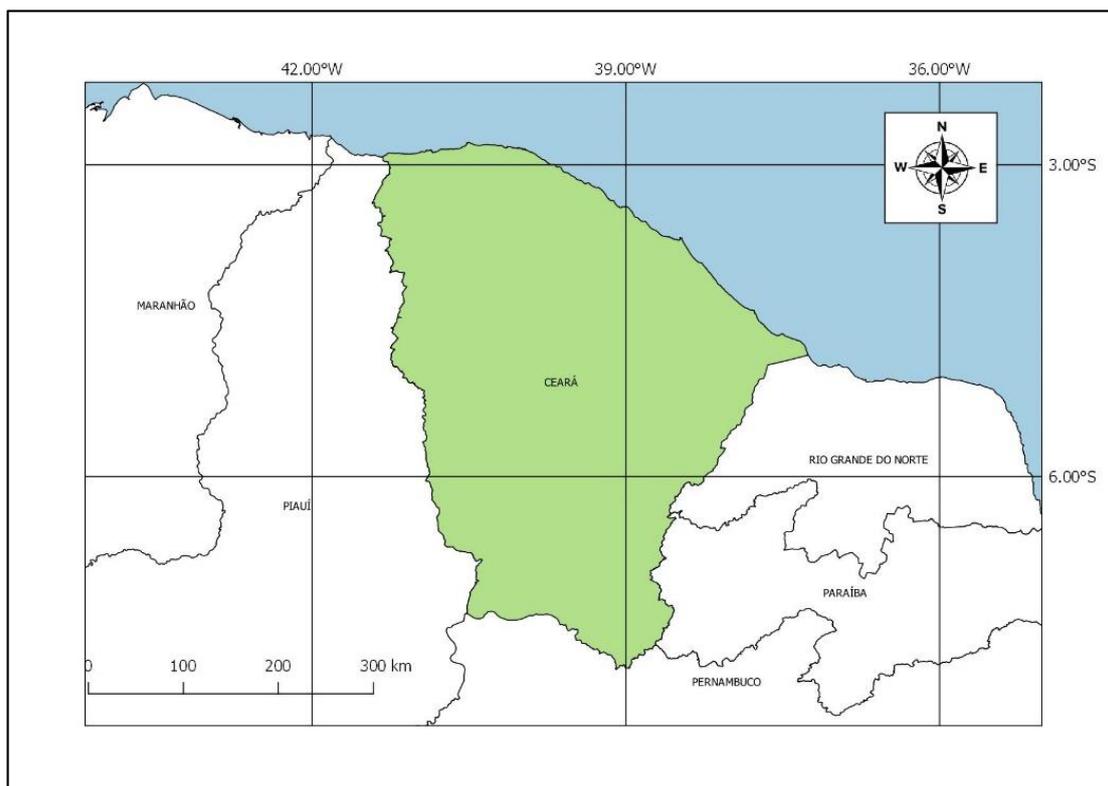
Neste capítulo será apresentado as características da área de estudo, bem como todos procedimentos adotados em todas as etapas de manipulação e processamento dos dados de ambas as fontes.

4.1 – Área do Estudo

A área de pesquisa corresponde ao Estado do Ceará, localizado entre as latitudes $02^{\circ}47' S$ e $07^{\circ}51' S$ e as longitudes $37^{\circ}14' O$ e $41^{\circ}24' O$, conforme Figura 9.

O estado do Ceará é pertencente a uma das 27 unidades federativas do Brasil, está situado na Região Nordeste limitando-se a norte com o Oceano Atlântico, ao sul com o Estado de Pernambuco; a leste com os Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba e a oeste com o Estado do Piauí. A área total é de $148.926,472 \text{ km}^2$ e a população encontra-se espalhada por 184 municípios, sendo estimada em de 9.075.649 habitantes, conforme dados estimados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), em seu site.

Figura 9: Mapa de Localização do Estado Ceará.



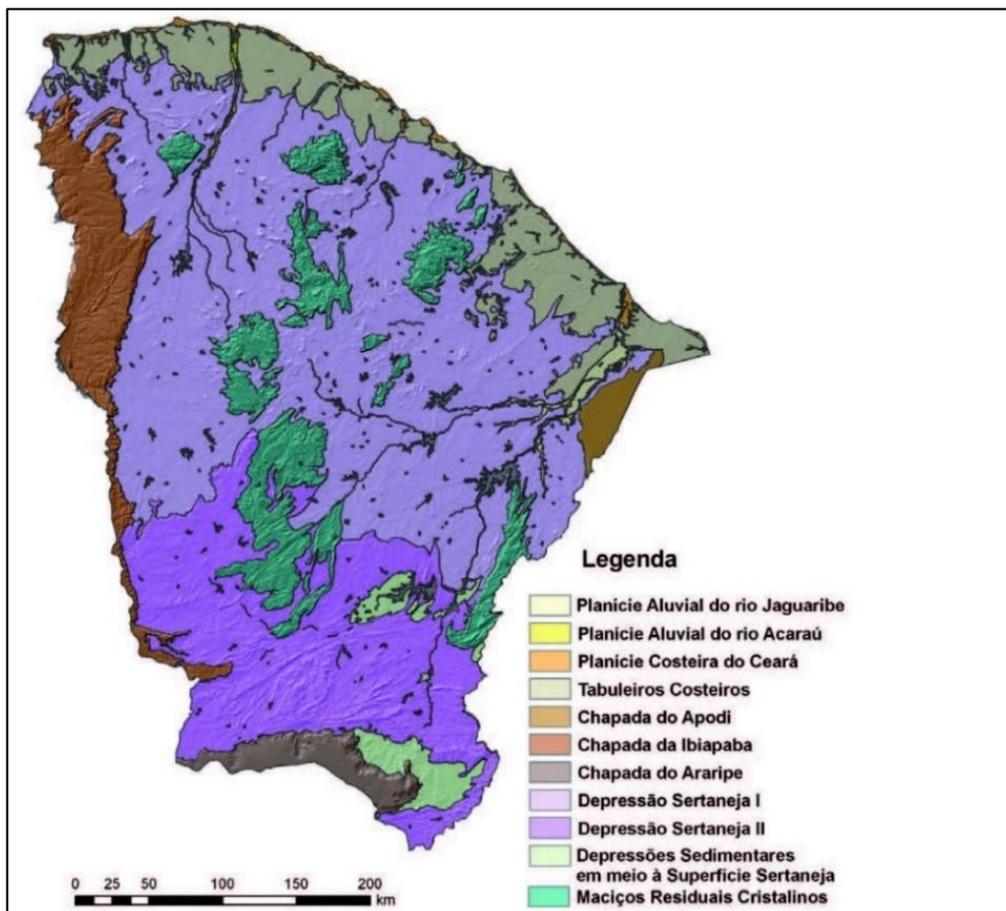
(Fonte: MMA, adaptado pelo autor, 2018)

4.1.1 – Aspectos Geomorfológicos

O Ceará é rodeado por formações de relevo relativamente altas de serras e chapadas, sendo a oeste delimitado pela Serra da Ibiapaba; a leste, parcialmente, pela Chapada do Apodi; ao sul, pela Chapada do Araripe; e na área central é composta pela Depressão Sertaneja e pelos maciços, com destaque para o Maciço do Baturité e Serra da Meruoca (Figura 10).

Segundo BRANDÃO et al. (2014), a diversidade geológica do Ceará se distingue em dois domínios geológicos: rochas sedimentares e rochas cristalinas (Figura 10). As rochas sedimentares são encontradas nas chapadas e no litoral e são as mais importantes como aquífero com excelentes condições de armazenamento e fornecimento d'água. Já as rochas cristalinas são encontradas na Depressão Sertaneja, com permeabilidade muito baixa e tem baixo potencial hídrico, o que contribui para os efeitos do clima semiárido na região.

Figura 10: Mapa da Geomorfológico do Ceará.



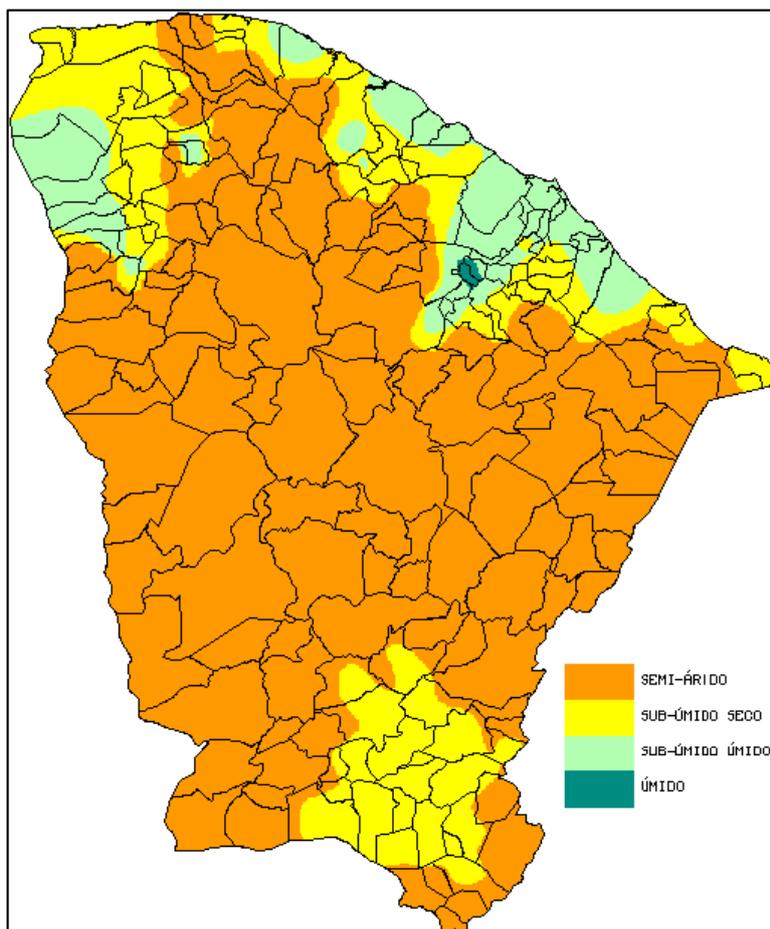
(Fonte: CPRM, 2014)

Os solos cristalinos, via de regra, tem como características a pouca profundidade, a deficiência hídrica e a vulnerabilidade a erosão, demandando ações planejadas com vista ao uso sustentável (BRANDÃO et al., 2014). A diversidade geológica incide, igualmente sobre a grande diversidade de solos e como tal, interferem no quadro fitoecológico local e nas potencialidades dos recursos naturais disponíveis.

4.1.2 - Aspectos Climáticos

O clima do Ceará é predominantemente semiárido e tropical-seco, onde as regiões mais áridas, também chamada de Sertão Cearense, se localizam na Depressão Sertaneja, com pluviosidades que, podem ser menores que 500 mm/ano, mas também podem se aproximar de 1.000 mm/ano em outras áreas caracterizadas pelo clima semiárido brando, a exemplo de algumas áreas da Chapada do Araripe, Serra da Ibiapaba, Maciço do Baturité e na faixa litorânea conforme Figura 11 (FUNCEME, 2014).

Figura 11: Mapa Climático do Estado Ceará.



(Fonte: FUNCEME, 2014)

Ainda sobre o clima, cerca de 90% do território do Ceará está submetido à influência da semiaridez, envolvendo ao todo ou em parte 150 municípios, com exceção das regiões de chapada e dos maciços que estão submetidos a climas mais amenos (IPECE, 2011). O clima do Ceará ocorre muito semelhante em todas as regiões do estado, sendo o período chuvoso entre os meses de dezembro a abril, as regiões de chapadas apresentam a vegetação de cerradão e floresta tropical, e as pluviosidades são mais altas, superando os 1.000 mm (SANTOS, 2013). Essas áreas contêm mananciais que banham os sopés dessas regiões, tornando-os propícios à atividade agrícola.

4.2 – Visão Geral da Metodologia

De modo geral, esta pesquisa consiste de duas etapas, inicialmente foi comparada a densidade de postos pluviométricos analisados nesta pesquisa com as recomendações da *World Meteorological Organization* (WMO) e em seguida foi feita uma análise comparativa entre as precipitações observadas nas estações pluviométricas da FUNCEME no estado do Ceará, com as precipitações estimadas pelo satélite TRMM, através do produto 3B43_V7. Embora teoricamente simples, a pesquisa necessitou que fosse realizado uma série de etapas de manipulação e processamento dos dados de ambas as fontes.

Os dados de precipitação que foram utilizados, são provenientes da rede de postos pluviométricos da FUNCEME, que disponibiliza os dados em seu site. Para esta pesquisa foi considerado o período de 20 anos, entre 1 de janeiro de 1998 a 31 de dezembro de 2017, de forma a abranger período comum ao início das estimativas do TRMM.

Enquanto os dados do TRMM foram utilizados os pixels provenientes do produto 3B43_V7, que corresponde as estimativas mensais de precipitação, com resolução espacial de 0,25° de latitude e 0,25° de longitude respectivamente, também no mesmo período dos 20 anos já citado. Os dados foram obtidos a partir do endereço eletrônico GIOVANNI da NASA⁵.

Para análise, interpolação, comparação e espacialização dos dados de precipitação foi utilizado o software livre QGIS 2.18. Para aplicação dos testes estatísticos, foi

⁵ Os endereços eletrônicos onde foram disponibilizam os dados para download, encontram-se nas Referências deste estudo.

utilizado o software livre de estatística Rstudio 1.0.153, uma interface gráfica ao usuário (em inglês *Graphical User Interface - GUI*) para o R, além do programa de planilha eletrônica Microsoft Excel 2013.

4.3 Precipitação Observada (Pluviômetros)

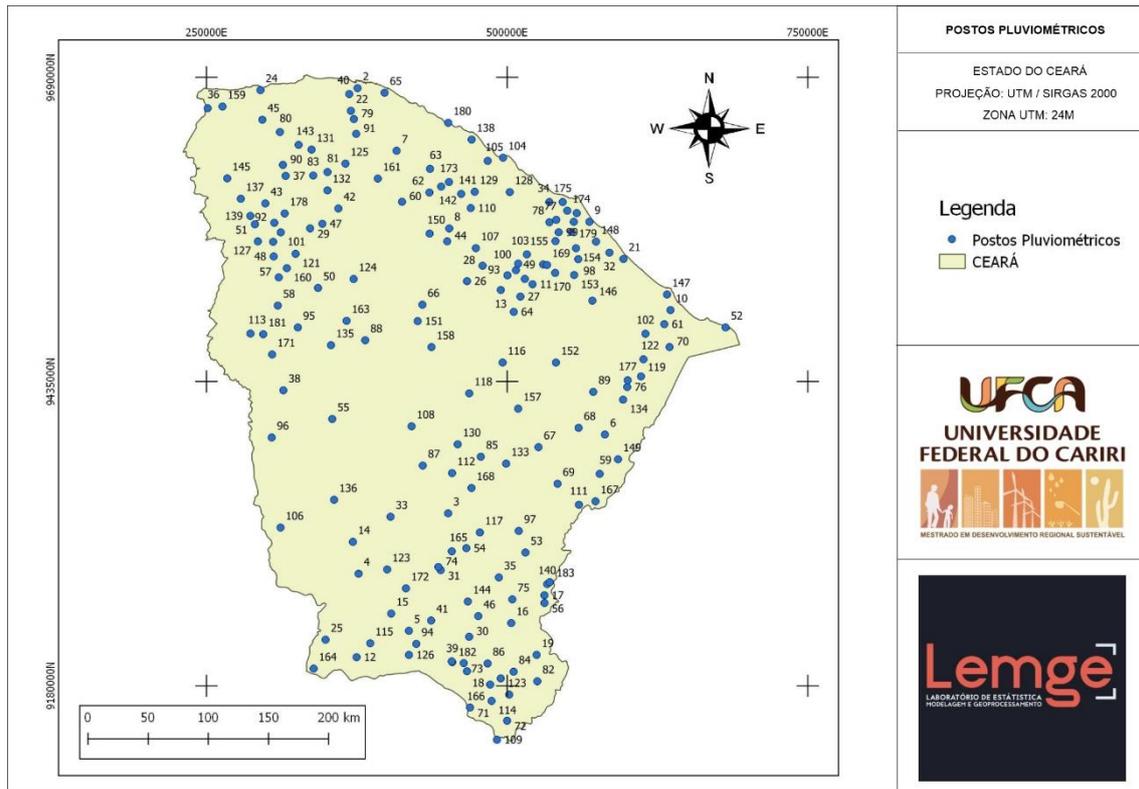
Os dados de precipitação foram obtidos a partir das séries históricas dos postos pluviométricos da FUNCEME que estão no formato txt. Já quanto a seleção dos postos, foi a partir de dois critérios, sendo o primeiro em relação ao tempo, tendo em vista que o TRMM começou a gerar seus dados partir de 1 de janeiro de 1998 e a segunda pelos postos que não apresentaram falhas e/ou descontinuidades nos dados, a fim de obter uma série histórica completa e apta ao desenvolvimento da pesquisa, a quantidade de postos está descrita na Tabela 1.

Tabela 1 – Seleção dos postos pluviométricos.

Situação do Posto Pluviométrico	Quantidade	Total (%)
Total de Postos FUNCEME	850	100%
Fora de Tempo do Período Estudado	537	63,17%
Ausência de Dados	80	9,41%
Fechados	50	5,88%
Postos utilizados na pesquisa	183	21,52%

Os 183 postos utilizados na pesquisa (Figura 12), estão espalhados por todo o estado do Ceará e são referentes aos dados diários de precipitação, para combinar com o produto 3B43_V7 que estima precipitação mensal. Os dados da FUNCEME foram organizados em acumulados mensais também.

Figura 12: Mapa dos postos pluviométricos utilizados na pesquisa.

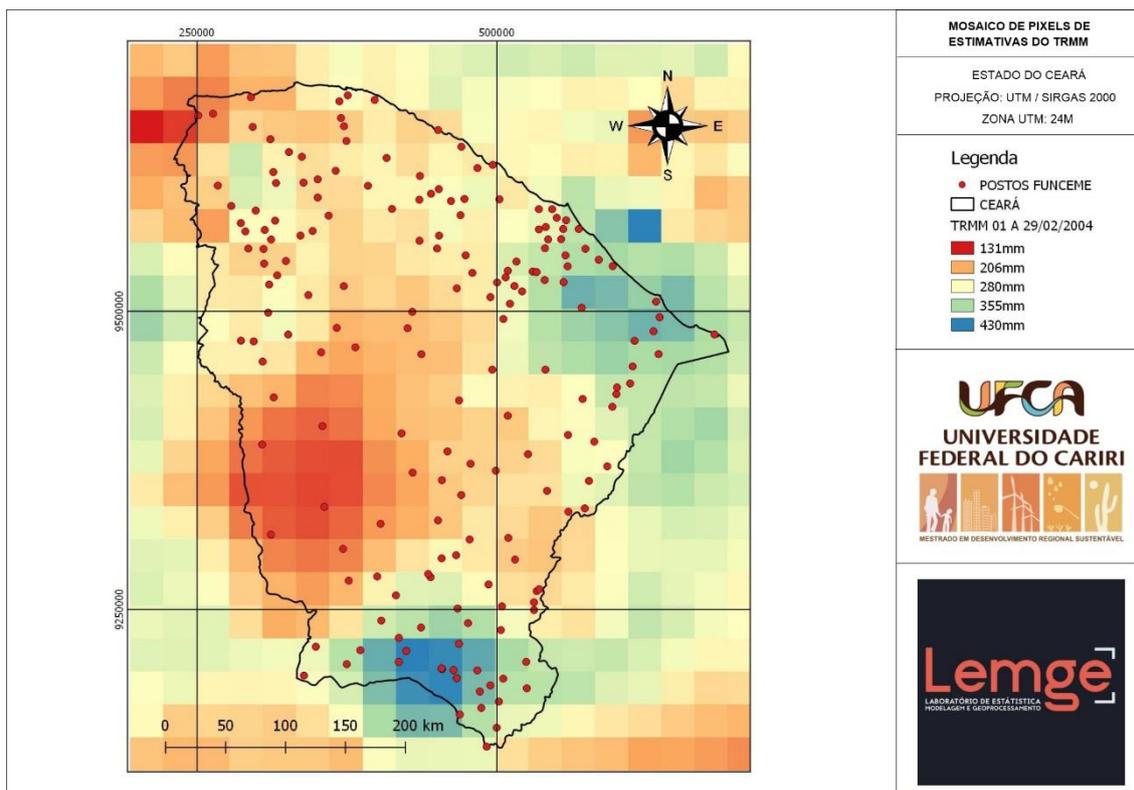


(Fonte: Feitosa, 2019)

4.4 Precipitação Estimada (TRMM)

Os dados do TRMM são disponibilizados através do produto 3B43_V7, que corresponde aos valores mensais de chuva e estão disponíveis nos formatos GeoTIFF e kml no site GIOVANNI da NASA. Para esta pesquisa foram utilizados dados no formato GeoTIFF, que correspondem a pixels na resolução espacial de 25 km por 25 km, conforme Figura 13.

Figura 13: Mosaico de pixels do TRMM com valores mensais utilizados na pesquisa, 01/2004.



(Fonte: Feitosa, 2019)

Cada mosaico do TRMM, representa os valores estimados de precipitação mensal, cada mosaico consiste de 418 pixels, sendo que posteriormente esse mosaico foi recortado para abranger somente a área do estudo.

4.5 – Densidade de Postos Pluviométricos no Estado do Ceará

A primeira etapa abordou quanto a densidade de postos pluviométricos analisados nesta pesquisa, com as recomendações estabelecidas pela *World Meteorological Organization* (WMO), que determina a quantidade mínima de postos pluviométricos para uma determinada área fisiográfica. Para tanto, utilizou-se um mapa geomorfológico do Ceará a partir do repositório do CPRM e que possui as principais unidades fisiográficas do Estado. Também foi utilizado o Método de Thiessen, que faz o uso polígonos para determinar uma área de influência para cada posto pluviométrico e compará-lo com as recomendações da WMO. Tal método foi desenvolvido pelo meteorologista americano Alfred H. Thiessen, que aplicou a teoria do diagrama de Voronoi para o cálculo da precipitação média na região de estudo (MARCIANO et al., 2018).

4.6 - Metodologias de Comparação

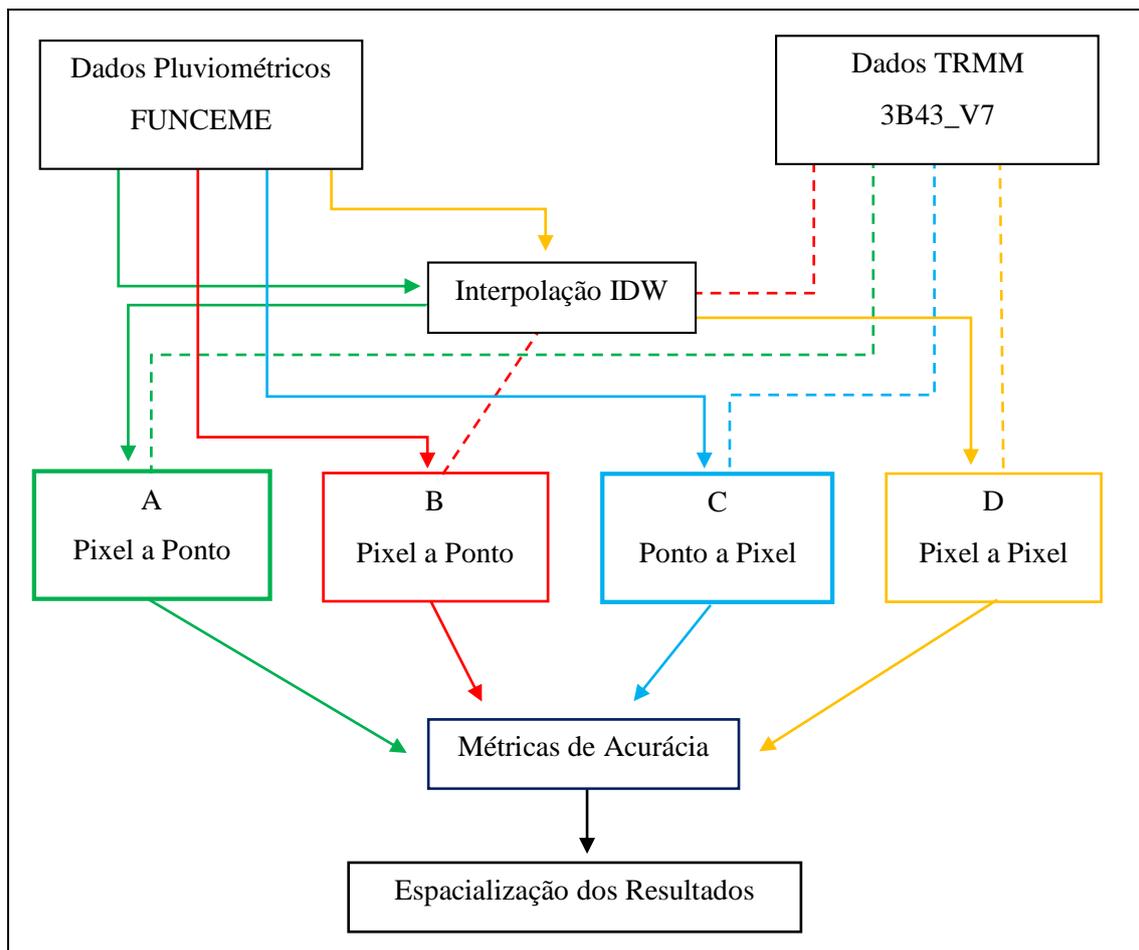
A precipitação em si é uma informação pontual e localizada, enquanto o TRMM mede a chuva média num determinado pixel (25 x 25 km), por sua vez, o posto pluviométrico mensura um dado localizado, podendo haver diferenças consideráveis de um posto próximo a outro. Diante dessa situação, a literatura especializada tem aplicado diversas metodologias para comparar dados obtidos por sensoriamento remoto e dados terrestres, não existindo um modelo padronizado de verificação dos dados estimados por satélite.

Por tanto, para efeito desta pesquisa, foram adotados 4 métodos de comparação (Quadro 2) entre os dados estimados e observados, e que se basearam em outros trabalhos nessa área de pesquisa, sendo:

- **Comparação A (pixel a ponto):** os dados estações pluviométricas, foram interpolados no método Inverso do Peso da Distância (inglês *Inverse Distance Weighted – IDW*) e comparados com a série do TRMM cujo centro de pixel está mais próximo do pluviômetro. Essa maneira de comparar as estimativas do satélite é vantajosa pois não altera nenhum dos componentes da comparação do dado monitorado e a estimativa. Exemplos de trabalhos que utilizaram essa mesma metodologia: Liu e Peter (2013) em bacias hidrográficas do Taiwan; Almeida et al. (2015), no estado do Amazonas; Bernardi (2016), no estado do Rio Grande do Sul e Soares (2016) para o estado da Paraíba.
- **Comparação B (pixel a ponto):** essa comparação segue o mesmo modelo realizado na A, sendo que neste caso quem foi interpolado (IDW) foram os dados do TRMM. Dessa maneira, as estimativas do satélite foram comparadas com as séries das estações pluviométricas, conforme Chen et al., (2013).
- **Comparação C (ponto a pixel):** neste caso os dados foram comparados sem passar por nenhum tipo de processamento, diretamente como são baixados, conforme trabalhos de Massagli et al., (2011), para a bacia hidrográfica do Rio Ji-Paraná – Rondônia; Pombo e Oliveira (2015) em Angola; Silva et al., (2016) para a Região do Alto Rio Paraíba e Soares (2016) no estado da Paraíba.

- **Comparação D (pixel a pixel):** nesta comparação, os dados oriundos dos pluviômetros foram interpolados (IDW) para uma grade de mesmas dimensões das estimativas do TRMM, de modo que a sobreposição do pixel e a grade interpolada tivessem o mesmo tamanho, como mostrado nos trabalhos de Pereira et al. (2013); Moraes e Ferreira (2015) no estado do Goiás e Melo et al. (2015) em todo Brasil.

Quadro 2: Diagrama dos métodos Comparativos.



(Fonte: Feitosa, 2019)

4.6 - Interpolação

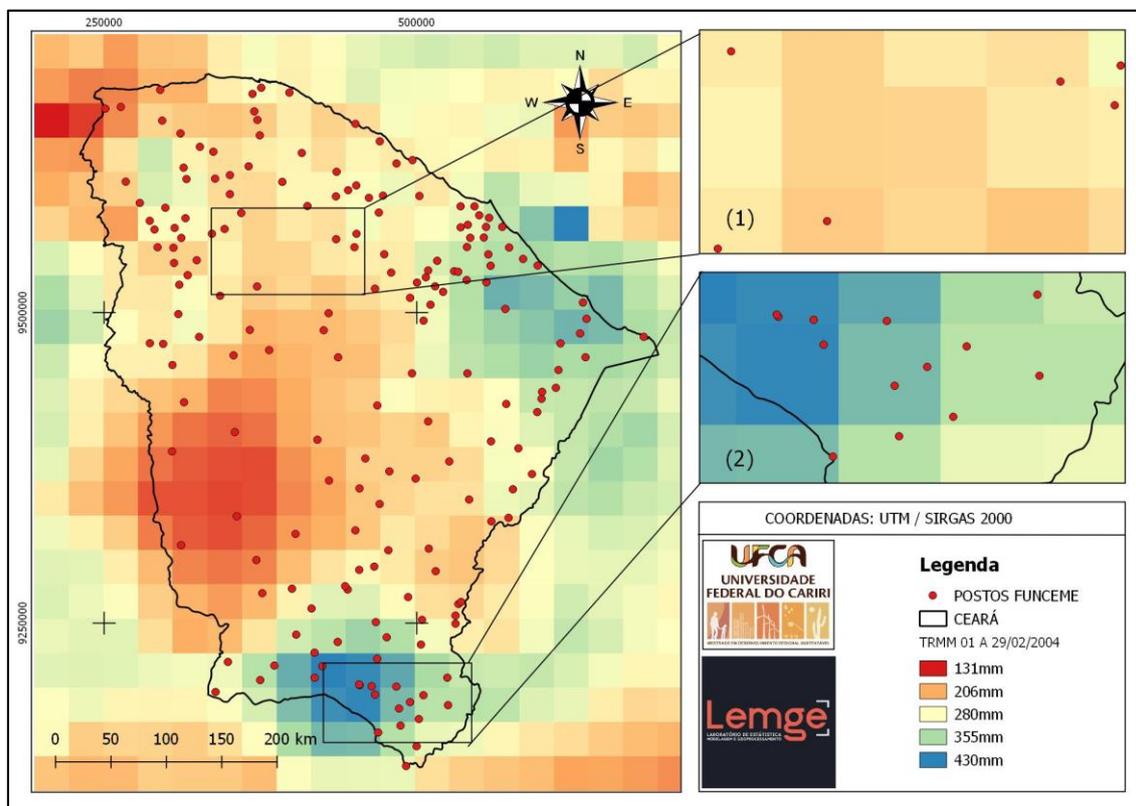
A interpolação é uma ferramenta frequentemente utilizada em pesquisas de sensoriamento remoto, pois devido ao número reduzido e muitas vezes insuficientes de dados na variabilidade espacial, a ferramenta acaba melhorando a dispersão dos valores

localizados e fornece uma boa representatividade espacial aos eventos de chuva. (GREGO et al., 2017).

No contexto desta pesquisa (Figura 14), foram detectadas 2 situações nos testes preliminares:

- 1) A ocorrência de regiões com ausência de postos pluviométricos (cenário 1), onde se encontram os valores dos pixels;
- 2) A presença de vários postos pluviométricos no mesmo pixel, essa situação seria ideal, pois indicaria uma representação espacial perfeita da precipitação, porém dificilmente tal situação acontece de fato.

Figura 14: Distribuição espacial dos postos pluviométricos em relação aos pixels do TRMM, 02/2004.



(Fonte: Feitosa, 2019)

Neste caso, os dados de precipitação podem ser corrigidos por meio da interpolação, para representar espacialmente melhor a distribuição da chuva. Na realidade, a questão da interpolação pode ser encarada como uma correção da distribuição espacial das medições dos pluviômetros através de dados estimados por satélite, como do

contrário, ou seja, uma correção das estimativas de satélite baseadas em medições de campo (COLLISCHONN, 2006).

Para isso, utilizou uma adaptação dos métodos utilizados por Santos (2011), Silva *et al.* (2016) e efetuando uma combinação entre estimativas de satélite com medições reais, através do interpolador Inverso do Peso da Distância (no inglês *Inverse Weight of Distance – IDW*).

A interpolação usando a Ponderação pelo Inverso da Distância (IDW) é baseada na distância ponderada de pontos amostrais, ou seja, a superfície interpolada por esse método é criada com base na utilização de um coeficiente de ponderação que controla a estimativa de valores dos pontos amostrais da base espacial (SILVA *et al.*, 2016).

Esse método se baseia na dependência espacial, isto é, quanto mais próximo um dado estiver do outro, maior será a correlação desse dado com seus vizinhos. Dessa forma atribui-se maior peso para os indivíduos mais próximos do que para os mais distantes do ponto a ser interpolado.

4.7 - Métricas de Acurácia

Além das comparações descritas acima, foram utilizadas 2 medidas que quantificam o erro associado às estimativas de chuva. A primeira foi o Erro Médio Absoluto (EMA), Equação 1, que corresponde à média das diferenças absolutas entre os valores observados e estimados:

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n |Ei - Oi|}{n} \quad (1)$$

E a segunda foi a Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ), Equação 2, que é a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre os dados de precipitação estimadas pelo satélite e as obtidas pelos pluviômetros:

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ei - Oi)^2}{n}} \quad (2)$$

O percentual do Bias que em português se diz viés, foi utilizado para medir a tendência média dos dados simulados (maiores ou menores que os valores observados), e pode ser calculado através da Equação 3:

$$Pbias = \sum_{i=1}^n \frac{(E_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \cdot 100 \quad (3)$$

Além disso, foi estimado o coeficiente de correlação (r) equação 4, que mede o grau da correlação entre os valores das estimativas de chuva do satélite com os observados. O coeficiente de correlação, reflete a extensão de uma relação linear entre dois conjuntos de dados, que varia entre -1, 0 e 1. Para isto será necessário aplicar o método através da Equação 4:

$$r = \frac{(E - \bar{E}) \cdot (O - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (4)$$

Onde:

E_i : corresponde o valor estimado pelo satélite no intervalo de tempo i ;

O_i : é valor observado em superfície no intervalo de tempo i ;

n : é número de dados analisados;

\bar{E} : é valor médio estimado pelo satélite e por fim,

\bar{O} : é valor médio observado em superfície.

Tais medidas de desempenho foram aplicadas às séries temporais com dados mensais, ao longo de vinte anos visando avaliar a eficácia das estimativas do TRMM.

Existe uma quantidade considerável de pesquisas envolvendo dados do TRMM e que contribuiriam de forma direta e indireta a viabilidade desta pesquisa, haja vista que os resultados quando comparados aos dados observados se comportam de maneira diferente em cada região. Entre eles destacam-se: Collischonn (2006), na bacia do rio São Francisco; Nóbrega et al. (2008) para sub-bacia da Amazônia Ocidental; Silva-Fuzzo & Rocha (2016), para o estado do Paraná; Bernardi (2016), para o estado do rio Grande do

Sul; Soares et al. (2016) para o estado da Paraíba; Aires et al. (2016) para a bacia hidrográfica do rio Paraopeba – MG; Almeida (2017), na região hidrográfica do rio Itapemirim – ES; Campos (2017), por divisão regional do Brasil e Gasparini et al. (2017) para o estado do Espírito Santo.

Contudo, nota-se que há um leque de métodos utilizados para avaliação da qualidade de estimativas, alguns com foco em análises pontuais, outros em comparações espaciais, alguns fazendo uso de interpoladores e outros mantendo os dados intactos. Logo, deve-se ter a cautela em definir o método dependendo do objetivo da análise.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Rede Pluviométrica Mínima

A precipitação é a principal forma de entrada de água em uma bacia hidrográfica, fornecendo subsídios para a quantificação do abastecimento de água, irrigação, controle de inundação, erosão do solo, etc. (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Portanto o correto monitoramento das chuvas com um número de estações pluviométricas recomendadas e adequadamente espalhadas na área é de suma importância para a rede hidrometeorológica (MELATI; MARCUZZO, 2015).

De acordo com as recomendações da WMO (2008), à densidade mínima de redes pluviométricas e pluviográficas, proporciona uma estrutura básica para evitar deficiências na exploração e desenvolvimento dos recursos hídricos, levando em conta o grau de desenvolvimento econômico e as necessidades ambientais de cada país. Ou seja, possibilita atender as demandas de informações para usos específicos da água.

Este conceito de densidade da rede pluviométrica, tem como objetivo orientar a quantidade mínima de estações recomendada considerando as condições socioeconômicas, físicas e climáticas de cada região. Na Tabela 2 tem-se a densidade mínima de postos depende do tipo de estação e do tipo de região fisiográfica, sugerida pela WMO.

Tabela 2 – Densidade mínima de posto pluviométrico (km²/estação) recomendada pela de WMO (2008).

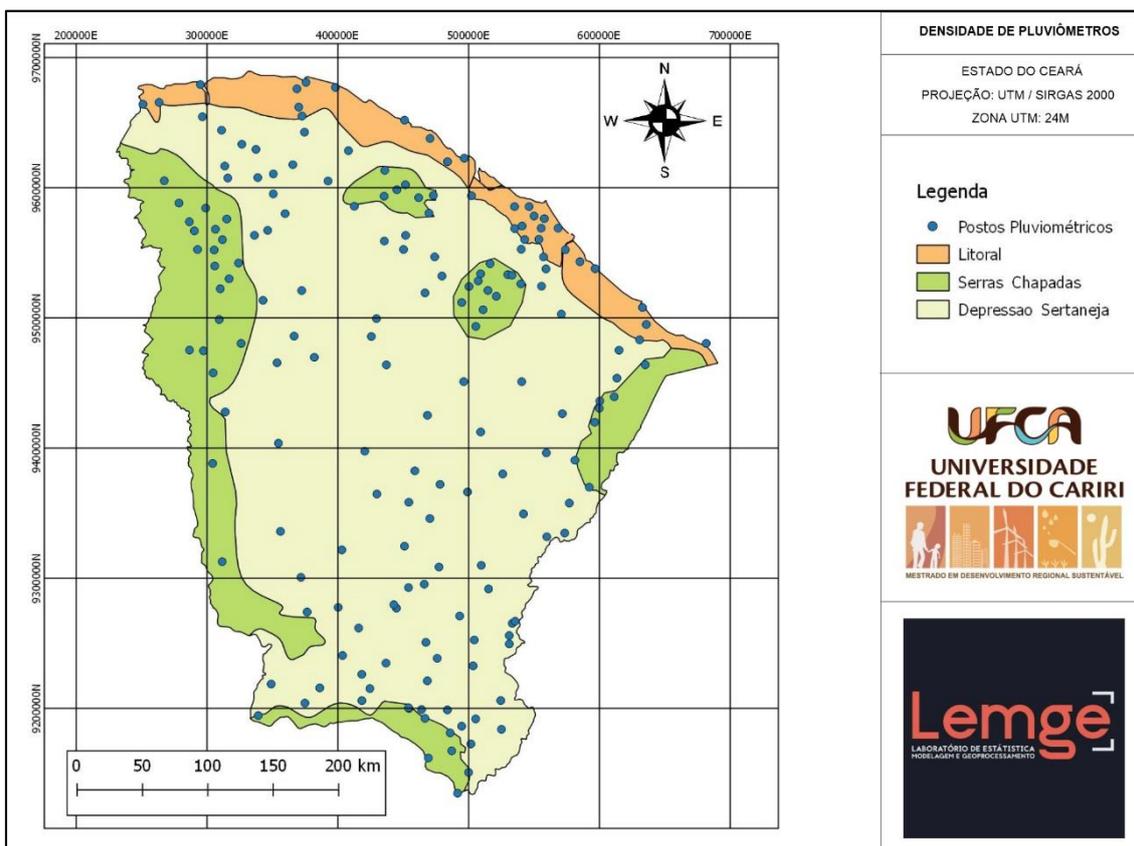
Unidade Fisiográfica	Pluviômetro (Km²/posto pluviométrico)
Zonas costeiras	900
Zonas montanhosas	250
Planícies interiores	575
Morros	575
Pequenas ilhas (inferior a 500 km ²)	25
Zonas polares e áridas	10.000

Como a região objeto desta pesquisa corresponde ao estado do Ceará, ela foi enquadrada em 3 unidades fisiográficas distintas, segundo o seu relevo, clima e as

recomendações da WMO, ficando da seguinte forma: a região litorânea equivale as zonas costeiras, as chapadas, serras e maciços residuais equivalem as zonas montanhosas e morros e a depressão sertaneja equivale as planícies interiores.

Para análise da densidade pluviométrica na área estudada, o procedimento adotado no programa com Sistema de Informação Geográfica (SIG), criador e gerenciador de mapas utilizado (QGIS, versão 2.18), foi o de análise da distribuição espacial das estações espalhada no estado do Ceará (Figura 15) onde se buscou analisar critérios para disposição espacial da atual rede em relação cada unidade fisiográfica.

Figura 15: Distribuição de postos pluviométricos por região fisiográfica do Ceará.



(Fonte: CPRM, adaptado pelo autor, 2019)

A partir do mapa de distribuição observa-se a quantidade de postos por área de cada região definida para o Estado. Quantificando esses postos por região, verifica-se 31 postos instalados na região do Litoral, 56 para Chapadas e Sertão e 96 para depressão Sertaneja, conforme apresentado na Tabela 3. Comparando esses valores com os valores recomendados pela WMO, verifica-se que para o Litoral a quantidade instalada supera a

recomendada, no entanto para as demais regiões há uma deficiência de cobertura, sendo esta deficiência de 65 para as Serras e Chapadas e 92 postos na Depressão Sertaneja.

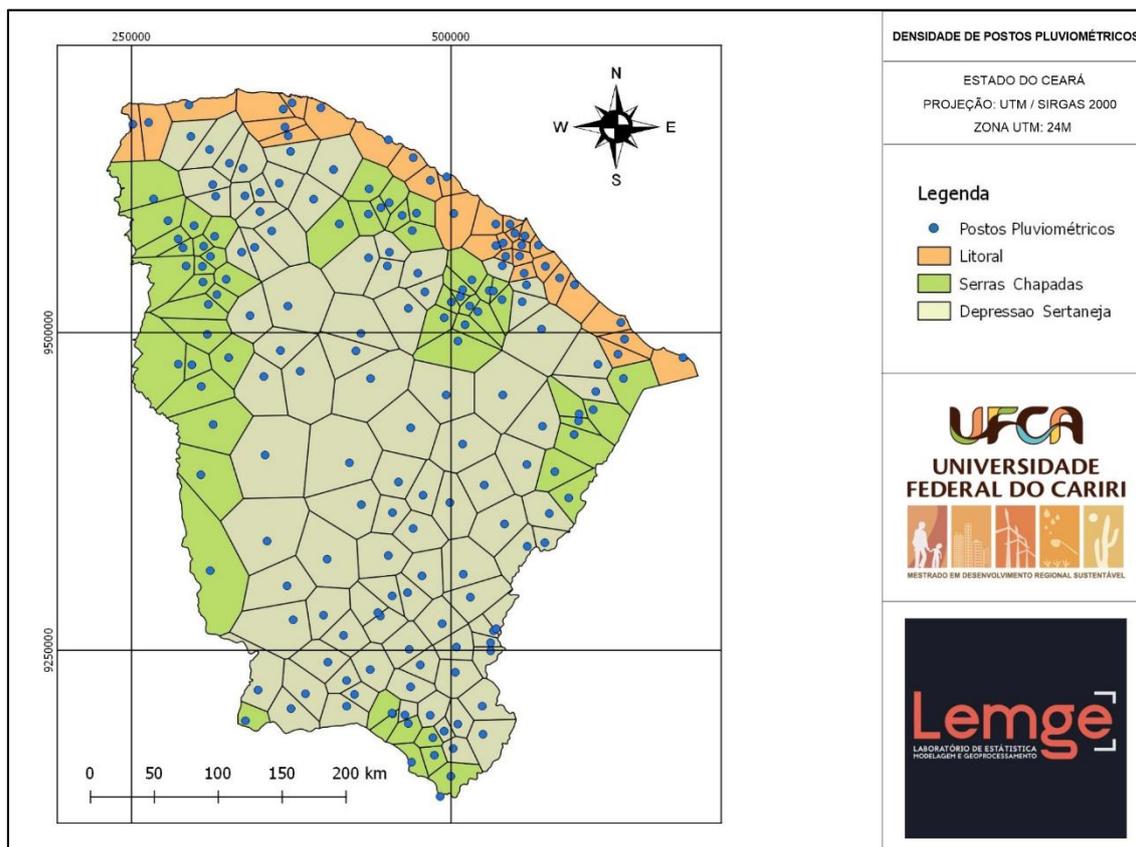
Pelo que foi verificado nesta análise, a rede pluviométrica deve ser ampliada o quanto antes, pois apresentou quantidade deficitária de 50 postos pluviométrico nas regiões de Serras e Chapadas e de 98 postos na região da Depressão Sertaneja, conforme pode ser observado na Tabela 3. Desse modo, a rede pluviométrica carece de ser melhor dimensionada para proporcionar um número mínimo de postos que evitem falhas nas séries históricas e distribuição espacial adequada para a gestão dos recursos hídricos.

Tabela 3 – Densidade de postos pluviométricos para as regiões fisiográficas do Ceará de acordo com as recomendações da WMO.

Unidade Fisiográfica	Área Km²	Pluviômetros Instalados	Recomendação WMO (Km²)	Deficiência de Pluviômetros
Litoral	10.540,25	31	12	0
Chapadas e Serras	30.340,24	56	121	65
Depressão Sertaneja	108.045,98	96	188	92

Outra maneira de medir a densidade de postos pluviométricos por área é através dos polígonos de Thiessen, que possibilita definir a área de influência de cada pluviômetro, medindo a área de influência de cada posto traçando uma linha com mesma distância entre os postos mais próximos, desse modo facilita ilustrar a deficiência da rede pluviométrica no estado de Ceará, vide Figura 16.

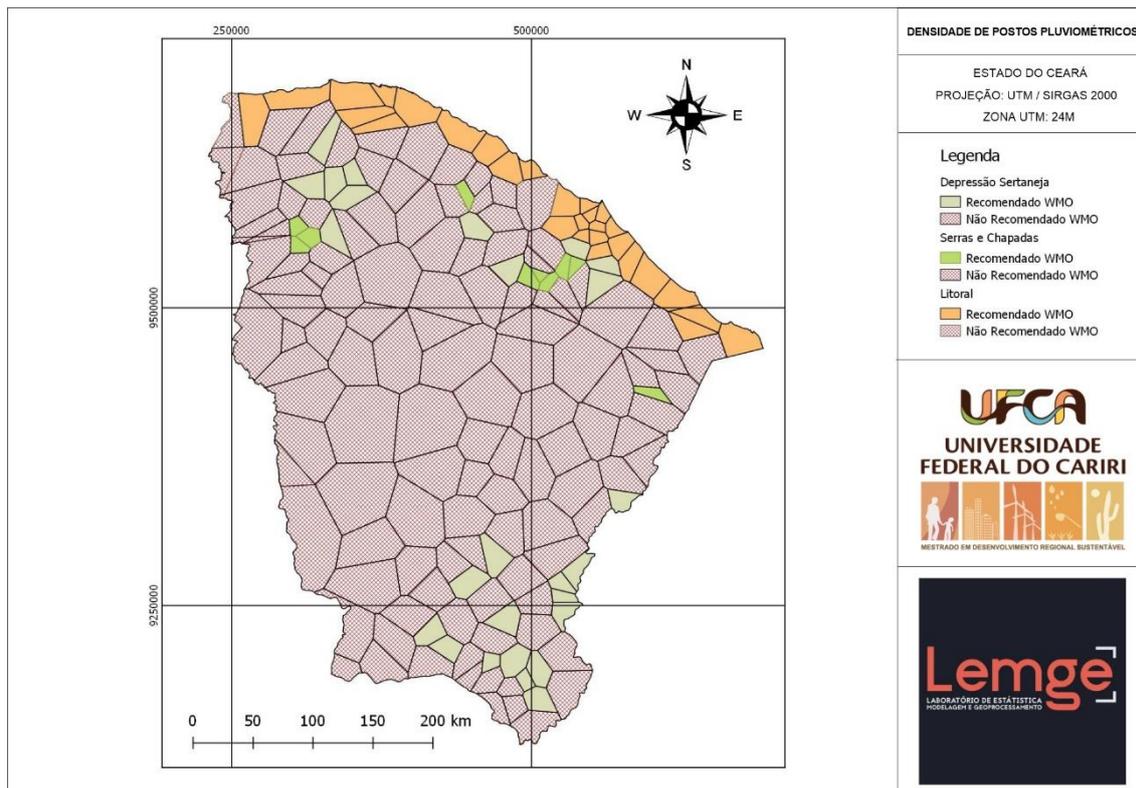
Figura 16: Distribuição de postos pluviométricos por polígonos de Thiessen.



(Fonte: Feitosa, 2019)

A partir dessa distribuição pelos polígonos de Thiessen (Figura 16), determinou-se a densidade de postos para cada região (Figura 17). A densidade de postos pluviométricos apresentada pelos polígonos de Thiessen, demonstrou uma carência da rede pluviométrica, onde apenas cerca de 6% das áreas de Serras e Chapadas estão com a cobertura adequada, sendo que essas regiões apresentam maiores pluviometrias, devido as suas altitudes. Na depressão sertaneja, também apresentou baixa densidade de postos pluviométricos, com apenas 8,47% de seu território com cobertura adequada, enquanto na região litorânea esse índice foi bem mais alto, com cerca de 85,49%, conforme Tabela 4.

Figura 17: Densidade de postos pluviométricos por polígonos de Thiessen.



(Fonte: Feitosa, 2019)

Sabe-se que essa discrepância de cobertura da rede pluviométrica, ocorre por diversos fatores, desde questões de ordem econômica, locais com dificuldade de acesso para instalação de novos postos pluviométricos ou mesmo por se tratar de áreas que são inabitadas. Diante disso, torna-se cada vez mais importante, que os sensores remotos realizem o trabalho de quantificar as chuvas para fim de suprirem essas lacunas deixadas pela pluviometria tradicional, e mais importante ainda são as pesquisas que visem a validação dos dados estimados pelos satélites para se ter uma noção real da qualidade dos sensores remotos.

A Tabela 4 representa a porcentagem territorial obtidos pela densidade de postos pluviométricos a partir dos polígonos de Thiessen da Figura 17.

Tabela 4 – Densidade de pluviômetros para as regiões fisiográficas do Ceará com polígonos de Thiessen.

Unidade Fisiográfica	Área Km²	Atende a WMO Km²	Não Atende a WMO Km²	Cobertura Adequada Pluviômetros
Litoral	13.586,44	11.165,68	2.420,76	82,18%
Chapadas e Serras	39.879,71	1.831,99	38.047,72	4,59%
Depressão Sertaneja	95.351,25	11.962,70	83.388,55	12,54%

Vale ressaltar que, a análise de densidade de postos pluviométricos segundo as recomendações da WMO, foi realizada no universo dos 183 postos pluviométricos da FUNCEME, objeto dessa pesquisa e que estão em pleno funcionamento. Sabendo-se que a rede hidrometeorológica nacional contendo estações pluviométricas e pluviográficas do INPE e ANA também cobrem o estado do Ceará, necessitando, portanto, de uma pesquisa mais aprofundada sobre o tema posteriormente. Além das recomendações de densidade de estações da WMO, outros critérios para escolha de um local adequado devem ser considerados, como terrenos planos, distância de obstáculos e proximidade de estradas.

5.2 –Espacialização do Dados e Avaliação Estatística

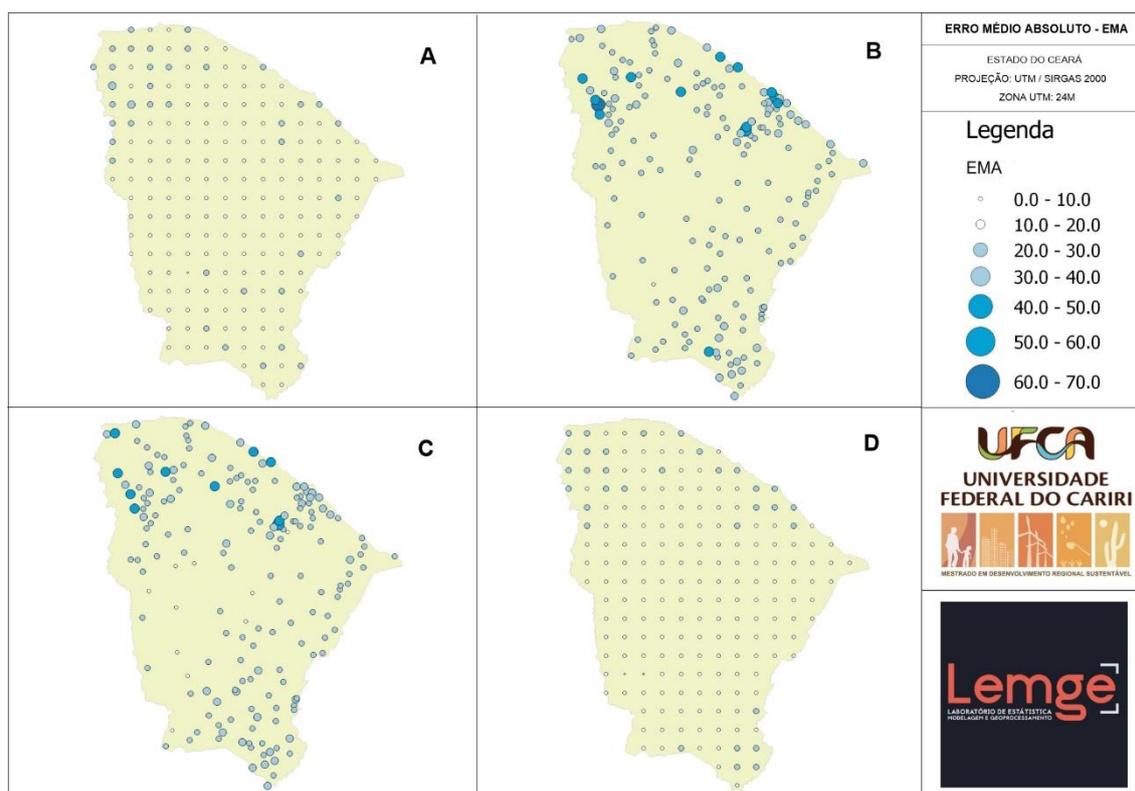
Para obtenção dos resultados, cada conjunto de dados das comparações A, B, C e D que podem ser representados tanto por pontos ou pixels, foram submetidos as métricas de comparação das equações 1, 2, 3 e 4, referente para os 20 anos da série histórica analisada nesta pesquisa.

5.2.1 - Erro Médio Absoluto – EMA

O EMA, representa a média das diferenças entre os totais de precipitação estimada e da observada nos postos pluviométricos para o período de 1998 a 2017 em mm, sendo que, quanto menor for o erro, melhor a confiabilidade do dado estimando pelo TRMM.

Na Figura 18 tem-se a média das diferenças entre os totais de precipitação estimada e da observada nos postos pluviométricos do Estado do Ceará para o período de 1998 a 2017.

Figura 18 – Mapa do resultado do EMA para as comparações A, B, C e D.



(Fonte: Feitosa, 2019)

De acordo com a Figura 18, observa-se que os menores valores médios do EMA ocorreram nas comparações D e A, tendo médias de 16,46mm e 16,88mm respectivamente, como pode ser verificado na Tabela 5.

Tabela 5 – Demonstra valores obtidos com EMA (mm).

EMA	Mínima	Máxima	Média*	CV (%)
A	9,76	34,74	16,88 B	25,96
B	18,20	65,69	29,10 C	22,40
C	14,05	61,78	28,17 C	23,12
D	9,32	29,28	16,27 B	20,71

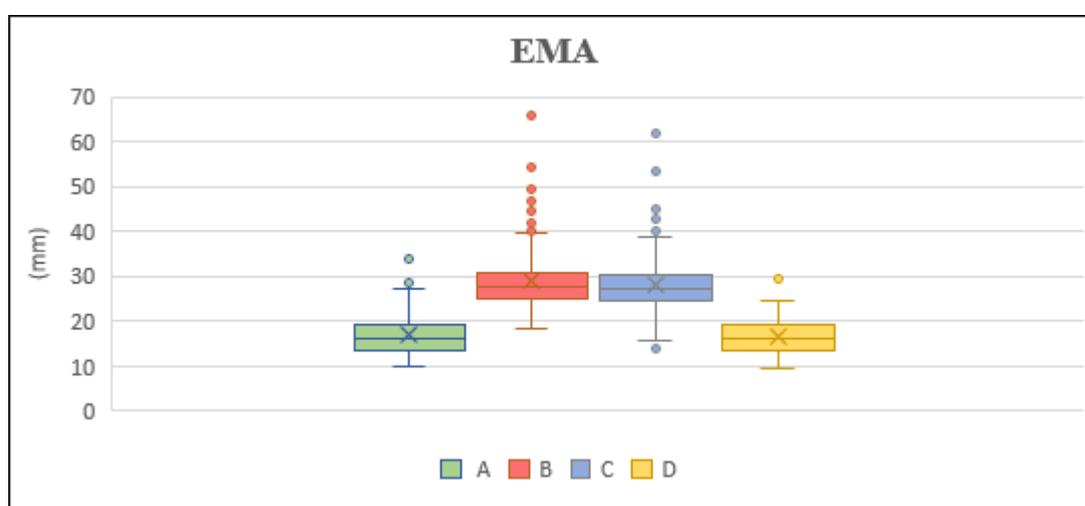
*Médias seguidas de letras iguais não se diferenciam estatisticamente para o teste de comparação das médias de Duncan, com grau de significância de 5%.

Verifica-se que a comparação D apresentou o menor erro tanto para os valores máximos e mínimos. Já as comparações B e C apresentaram maiores erros, chegando a

ter 65,69 e 61,78 mm respectivamente. Por tanto, o EMA variou entre 9,32 a 65,69 mm, sendo que as comparações A e D obtiveram resultados praticamente iguais, tendo uma diferença na média do EMA de apenas 2,5% entre elas.

De acordo com teste de comparação das médias do EMA do método de Duncan (*Duncan's Multiple Range Test, em português Teste de Alcance Múltiplo de Duncan*) com nível de significância de 5%, as médias A e D (*B) são equivalentes estatisticamente, sendo que a comparação D foi a melhor comparação, pois teve menor erro, o mesmo ocorreu entre B e C (*B) de se equivalerem estatisticamente, porém A e B não são estatisticamente equivalentes a B e C.

Gráfico 1 – Gráfico de box-plot do EMA com as comparações entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceará de 1998 a 2017.



No Gráfico 1, tem-se as comparações dos valores obtidos do TRMM e dos postos pluviométricos do Estado do Ceará. Nota-se que, apesar do Coeficiente de Variação (CV) ter demonstrado resultados para as comparações entre D e A praticamente iguais para os 20 anos de dados analisados, os valores em A apresentaram dados mais discrepantes se comparado a D, chegando a 25,96 %, enquanto D variou 20,57%. Já as comparações B e C obtiveram comportamento mais semelhantes.

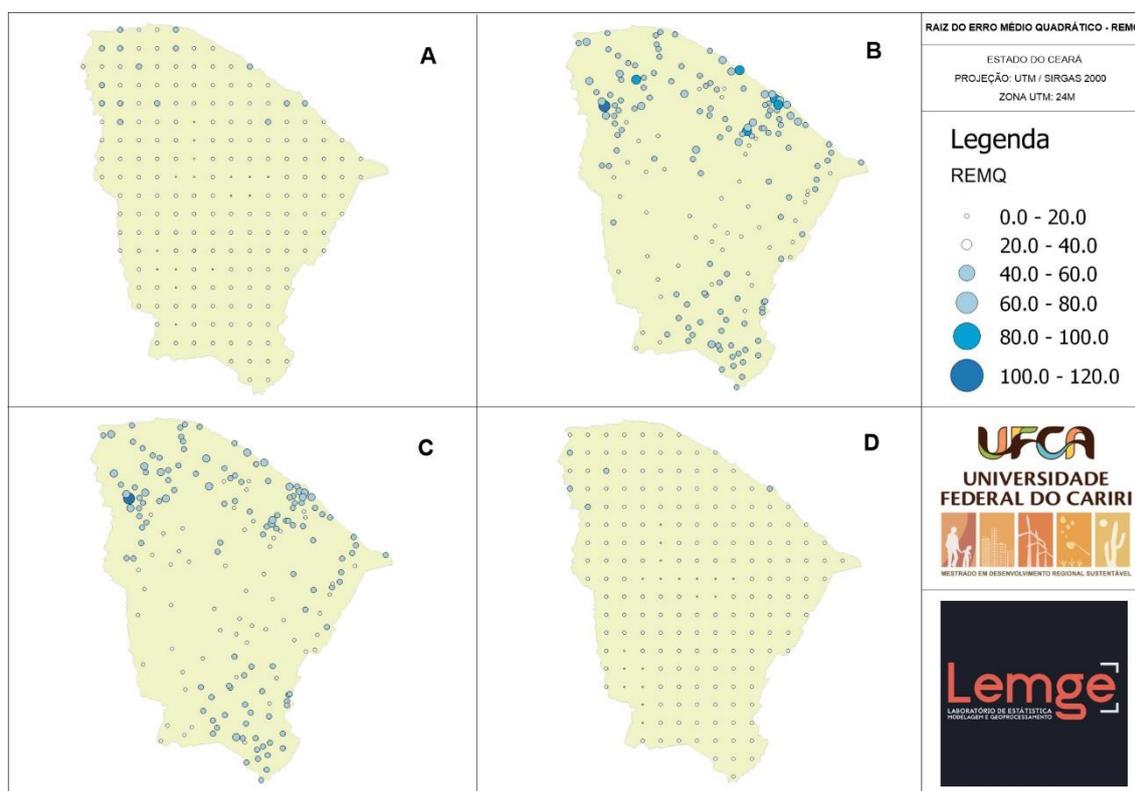
5.2.2 – Raiz do Erro Médio Quadrático – REMQ

A REMQ, do mesmo modo que o EMA, calcula a média dos quadrados dos desvios entre os valores observados e estimados, sendo compassivo a erros com valores

absolutos maiores. No entanto, fornece maiores ponderações aos pesos quanto aos erros espaciais quando comparado ao EMA.

Na Figura 19 pode-se verificar os resultados das comparações analisadas a partir do REMQ, correspondendo a acurácia das estimativas em mm, sendo relevante para analisar o grau de confiabilidade das estimativas. Nela verifica-se que as médias com maiores valores de erros estão localizados na porção norte ocidental do estado, no entorno da Serra Grande e na Região Metropolitana de Fortaleza, chegando a quase 110 mm de erro no caso da comparação B.

Figura 19 – Mapa do resultado do REMQ para as comparações A, B, C e D.



(Fonte: Feitosa, 2019)

A Tabela 6 demonstra que a REMQ variou entre 15,26 a 109,65 mm. Novamente a comparação D obteve o melhor desempenho, novamente tanto a comparação D como A tiveram resultados aproximados com 2,37% de diferença entre elas.

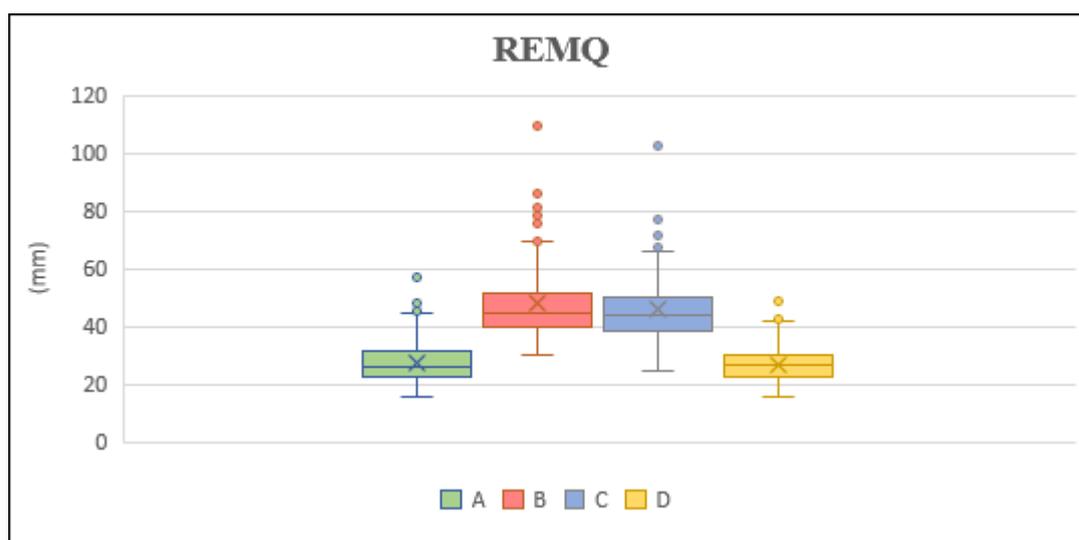
Tabela 6 – Demonstra valores obtidos com REMQ.

REMQ	Mínima	Máxima	Média*	CV (%)
A	15,70	58,19	27,52 C	27,46
B	29,71	109,65	48,14 A	25,96
C	24,35	102,17	46,07 B	24,05
D	15,26	48,44	26,43 C	21,86

*Médias seguidas de letras iguais não se diferenciam estatisticamente para o teste de comparação das médias de Duncan, com grau de significância de 5%.

No teste de comparação das médias do REMQ de *Duncan* com nível de significância de 5%, as médias A e D (*C) foram equivalentes, mas diferem da comparação B (*A) e de C (*B). A comparação D obteve menor erro associado enquanto a comparação B apresentou o maior erro.

Gráfico 2 – Gráfico de box-plot da REMQ com as comparações entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.



No Gráfico 2, pode-se visualizar melhor os resultados da REMQ, para todas as comparações, onde a linha central dentro de cada box-plot representa a média de cada comparação analisada no estudo. Nota-se que o Coeficiente de Variação (CV) foi menor na comparação D de 21,86%, enquanto as comparações A, B e C apresentaram dados mais discrepantes se comparado a D.

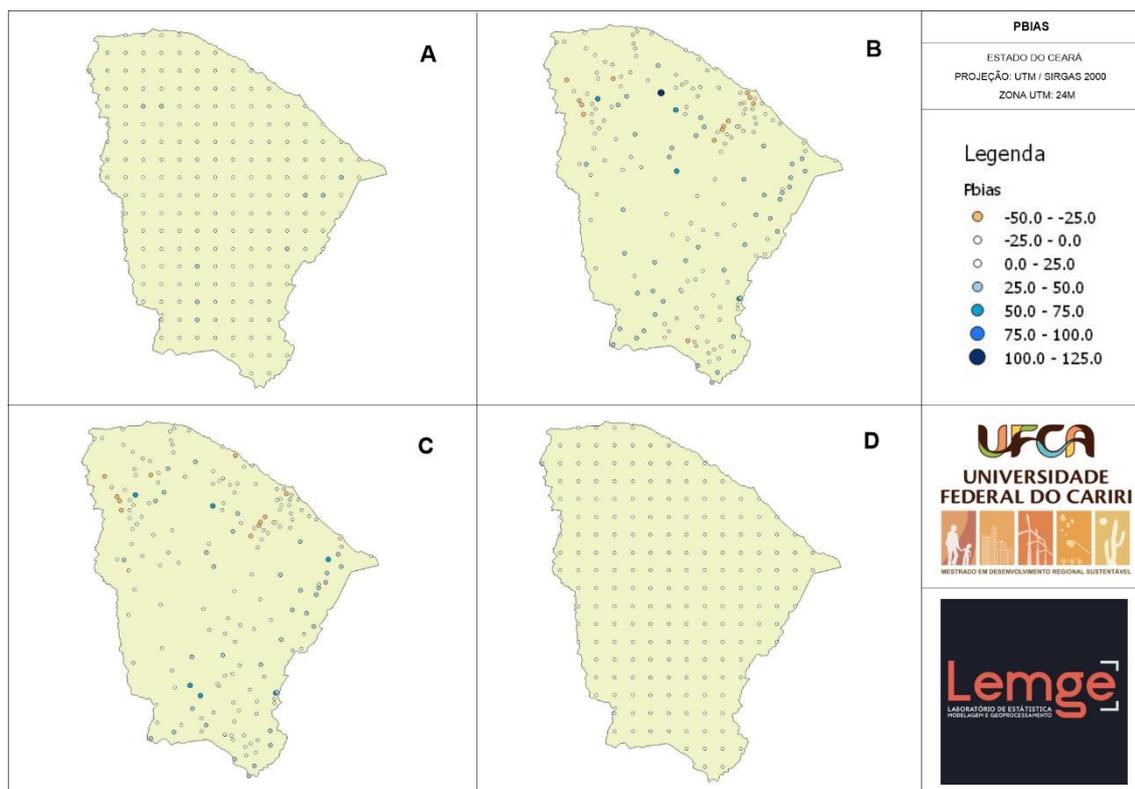
Em suma as duas métricas (EMA e a REMQ) apresentaram comportamentos parecidos na variabilidade dos erros encontrados, onde os menores valores correspondem a menor diferença entre as precipitações estimadas pelo TRMM.

5.2.3 – Pbias

O percentual de viés (PBIAS) mede a tendência de os dados estimados serem maiores ou menores que os observados. Valores positivos indicam viés de superestimação, enquanto valores negativos indicam viés de subestimação do modelo. Se o Pbias for igual a zero, significa que o valor estimado é igual ao valor observado.

Olhando a Figura 20, percebe-se que houve uma tendência de subestimação do TRMM na distribuição do Pbias para as comparações B e C, tanto na porção norte ocidental do estado, no entorno da Serra Grande, quanto no entorno da região metropolitana de Fortaleza.

Figura 20 – Mapa dos valores do Pbias para as comparações A, B, C e D.



(Fonte: Feitosa, 2019)

Na média para todos os postos, o valor do TRMM, foi positivo, indicando assim uma leve superestimativa dos valores do TRMM em relação aos dados de pluviometria coletados nas estações pluviométricas (Tabela 7).

Tabela 7 – Valores obtidos com PBIAS para os quatros métodos de comparação.

PBIAS	Mínima	Máxima	Média*	CV (%)
A	-24,32	34,15	4,21 B	299,69
B	-43,56	118,48	8,93 A	260,86
C	-41,15	125,98	10,76 A	210,10
D	-24,04	23,19	3,15 B	354,87

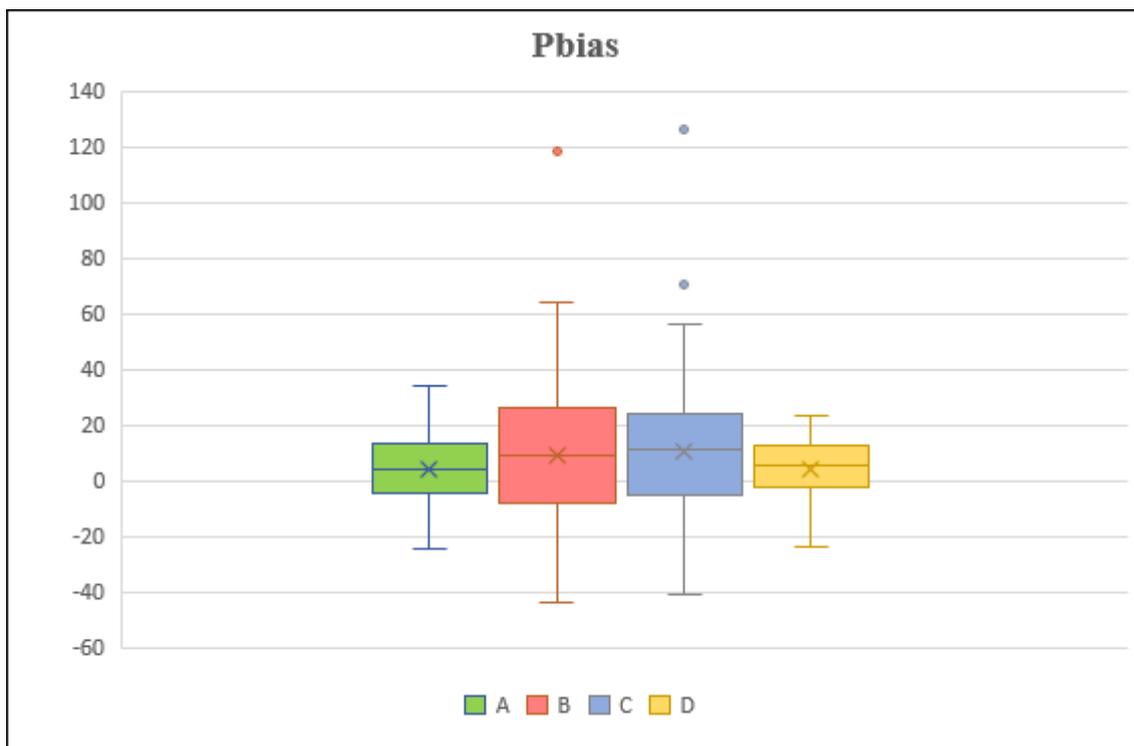
*Médias seguidas de letras iguais não se diferenciam estatisticamente para o teste de comparação das médias de Duncan, com grau de significância de 5%.

Novamente no Pbias, a comparação D obteve o menor valor médio de 3,15 e a comparação A também obteve um valor aproximado, de 4,21 demonstrando uma tendência mais aproximadas do 0 (zero). Já as comparações B e C tiveram uma variação grande entre os valores negativos e positivos, transportando assim, uma tendência maior de superestimar a precipitação estimadas, conforme demonstrado no Gráfico 3.

No teste de comparação das médias de *Duncan* com nível de significância de 5%, as médias A e D (*B) foram equivalentes, mas diferem estatisticamente das comparações B e C (*A). A comparação D obteve menor tendência na média enquanto a comparação C apresentou a maior tendência a superestimar em média.

O Coeficiente de Variação (CV) apresentado na Tabela 7, demonstrou que a comparação C teve menor variância entre os dados de precipitação estimada e observada para os 20 anos, de 210,10%, mesmo tendo a maior média dentre todas as comparações.

Gráfico 3 – Gráfico de box-plot do Pbias com as comparações entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.



No Gráfico 3 observa-se que os valores de Pbias para todas as comparações foram positivos, o que indica que os dados estimados pelo TRMM tendem a superestimar os valores observados em superfície pelos postos pluviométricos.

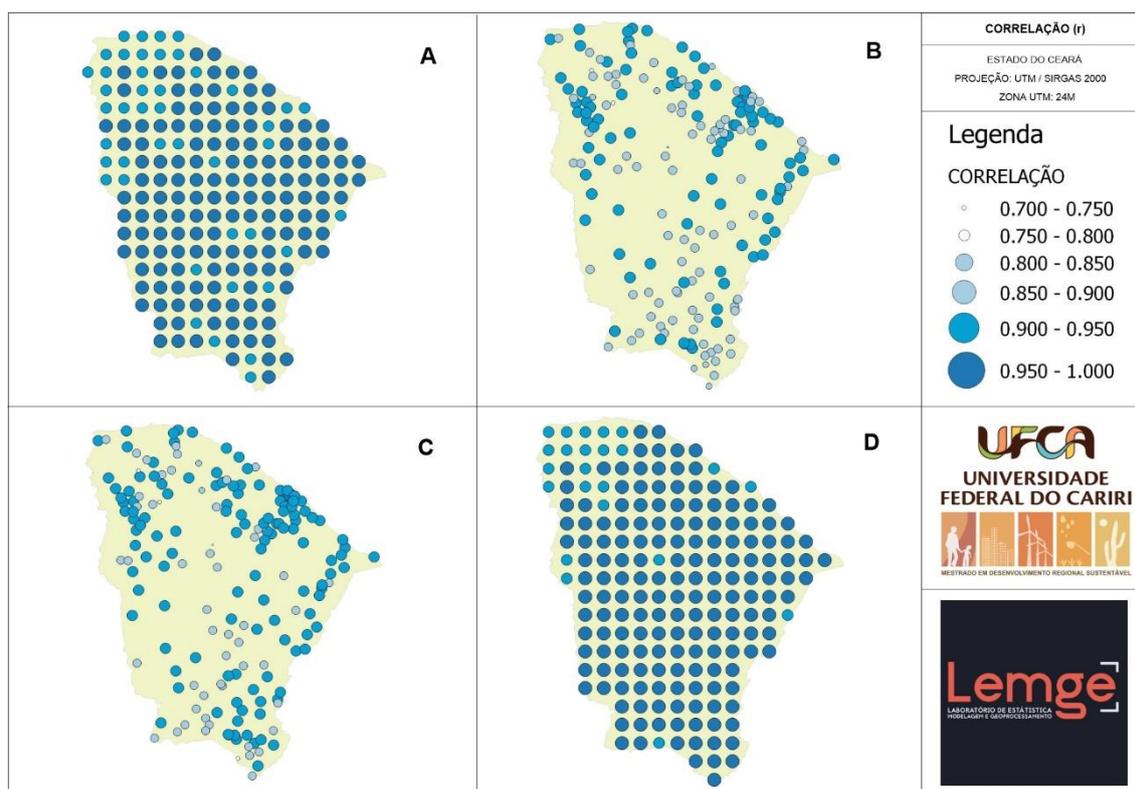
5.2.3 – Correlação (r)

Para o valor de correlação de Pearson foi considerado pequeno (até 0,25), baixo (0,26 – 0,49), moderado/médio (0,50- 0,69), alto/boa (0,70-0,89) e muito alta/ótima (de 0,90 acima), de acordo com os valores de referência descritos por Louzada (2017) e por Jonson e Gross (1997).

O coeficiente de correlação variou entre 0,89 a 0,96 entre as médias, e novamente o resultado da comparação D, se mostrou com maior a correlação entre a precipitação estimada pelo TRMM e a observada nos postos pluviométricos, apresentando assim melhor média para os valores acumulados.

Na Figura 21, tem-se os mapas com a correlação entre pluviometria observada e estimada para o Estado do Ceará utilizando os quatro métodos de comparação (Quadro 1).

Figura 21 Correlação entre pluviometria observada e estimada para as comparações A, B, C e D.



(Fonte: Feitosa, 2019)

O coeficiente de correlação variou de 0,89 a 0,96 entre as comparações analisadas, o que pode ser considerado um resultado muito satisfatório. Pode-se notar que as maiores correlações foram obtidas entre as comparações D, A e C encontrando-se numa classificação de muito alta a ótima e a comparação B classificada como alta ou boa (Tabela 8). Neste cenário pode-se dizer que tanto a comparação D como A tiveram correlações praticamente iguais, com uma diferença de 1,05%.

Tabela 8 – Demonstra valores da correlação (r).

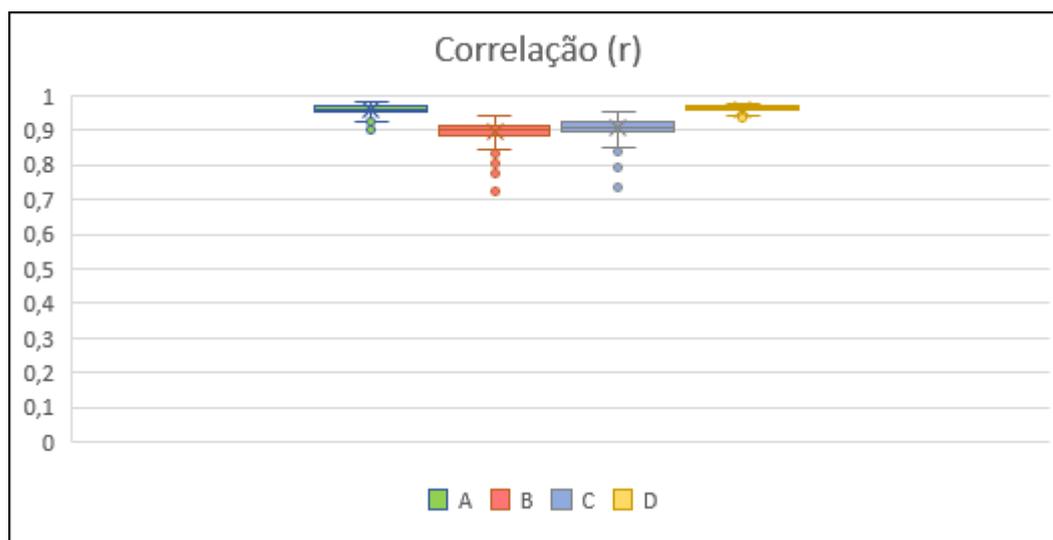
r	Mínima	Máxima	Média*	CV (%)
A	0,90	0,97	0,95 A	1,55
B	0,72	0,93	0,89 C	3,09
C	0,73	0,95	0,90 B	3,18
D	0,93	0,97	0,96 A	0,99

*Médias seguidas de letras iguais não se diferenciam estatisticamente para o teste de comparação das médias de Duncan, com grau de significância de 5%.

No teste de comparação das médias da correlação (r) do método de Duncan com nível de significância de 5%, as médias A e D (*A) são equivalentes estatisticamente, sendo que a comparação D foi a melhor comparação, pois teve maior correlação entre a precipitação observada e a estimada dentre todas as comparações, o mesmo não ocorre entre a comparação B (*C) e C (*B) que apesar de apresentarem valores de correlação aproximados, o teste de Duncan demonstrou que essas duas comparações tem diferenças estatística.

No Gráfico 4, observa-se que todas as comparações se aproximam de 1,0, sendo que as comparações D e A tem menores variações nos dados comparados. Na Tabela 8 nota-se que, apesar do Coeficiente de Variação (CV) ter demonstrado a comparação D obteve menor variação de 0,93% e A foi a comparação obteve resultado também satisfatório de 1,55% para os 20 anos de dados analisados, já os valores de B e C apresentaram dados mais discrepantes se comparado a D, chegando a 3,09 % em B, enquanto C variou 3,18%. As comparações B e C obtiveram comportamento semelhante.

Gráfico 4 – Gráfico de box-plot da correlação (r) das comparações entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.



5.2.4 - Resumo das métricas entre as comparações

De modo geral, os valores estimados com o satélite TRMM foram aproximados com os dados observados em solo pelos postos pluviométricos. Sendo a comparação D a que obteve menor erro nas métricas de acurácia, menor percentual de erro no Pbias e a

maior correlação entre todas as comparações analisadas nesta pesquisa, porém vale ressaltar que a comparação A obteve praticamente o mesmo desempenho, sendo também um modelo de comparação satisfatório.

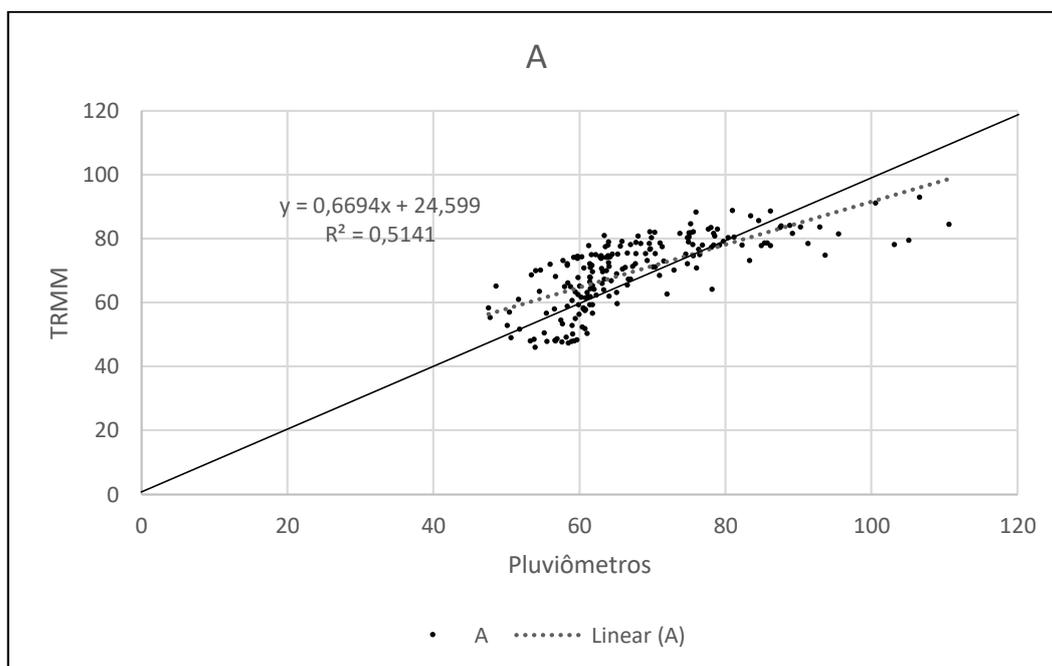
Tabela 9 – Resumo dos resultados para todas as comparações.

	A	B	C	D
EMA	16,88	29,10	28,17	16,27
REMQ	27,52	48,14	46,07	26,43
PBIAS	4,21	8,93	10,76	3,15
r	0,95	0,89	0,90	0,96

5.2.5 – Comparação Através de Gráfico de Dispersão

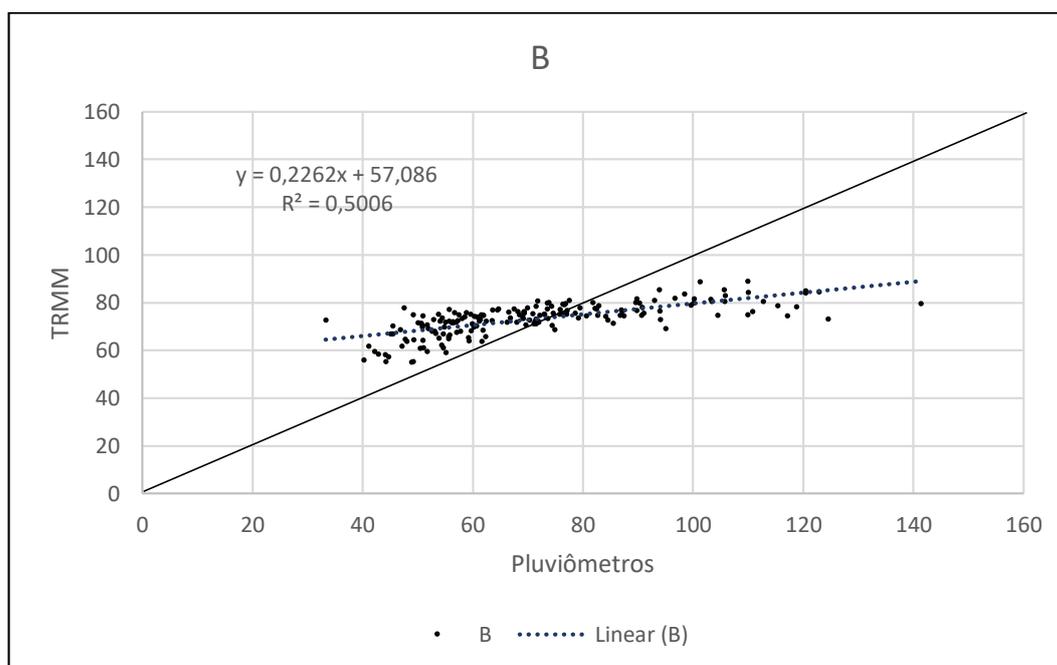
Outra maneira de representar a proximidade ou não entre os dados de chuva é através de gráfico de dispersão linear, onde as médias de cada comparação (A, B, C e D) é demonstrado no eixo X e Y para todo o período estudado.

Gráfico 5 – Gráfico de dispersão linear da média da comparação A entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.



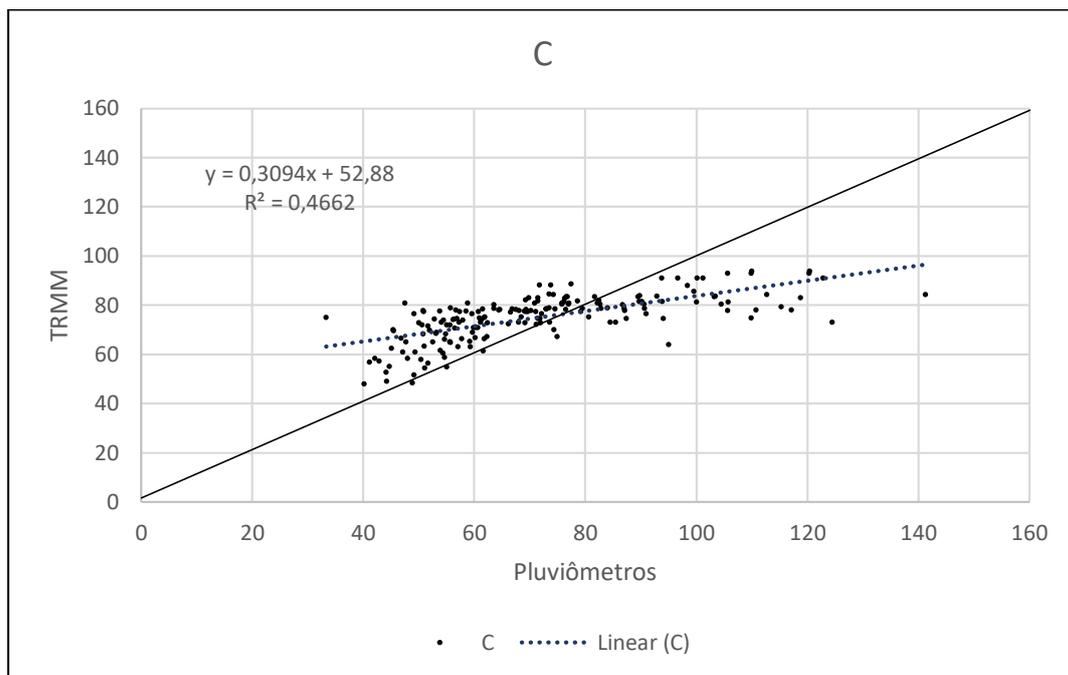
O Gráfico 5 apresenta a dispersão estabelecida para a região do Ceará, a partir dos totais mensais precipitados de longo período de 1998 a 2017 apropriados a partir de dados pluviométricos e das imagens de satélite TRMM para a comparação A. Neste gráfico é apresentado, adicionalmente, o coeficiente de determinação associado ao ajuste de uma função linear entre os referidos valores de totais de 20 anos precipitados (0,51), observa-se que houve uma superestimação do TRMM em relação aos postos de precipitação para valores menores que 76 mm, tendência a subestimação a partir desse valor.

Gráfico 6 – Gráfico de dispersão linear da média da comparação B entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.



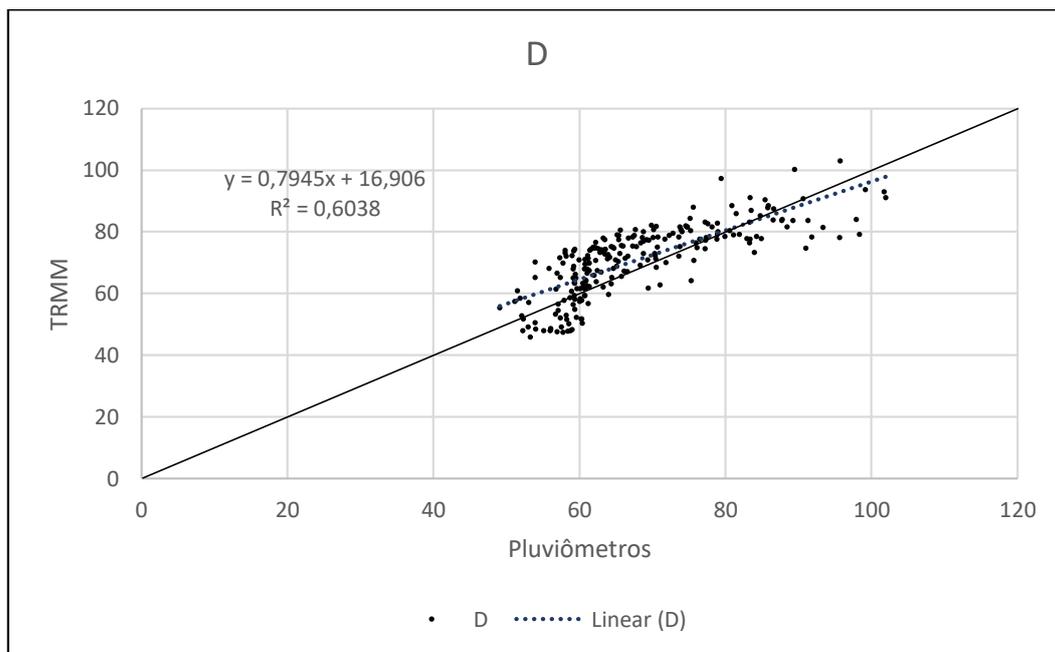
O Gráfico 6 apresenta a dispersão estabelecida para a região do Ceará, a partir dos totais mensais precipitados de longo período de 1998 a 2017 apropriados a partir de dados pluviométricos e das imagens de satélite para a comparação B. Neste gráfico é apresentado, adicionalmente, o coeficiente de determinação associado ao ajuste de uma função linear entre os referidos valores de totais de 20 anos precipitados (0,50), observa-se que houve uma superestimação na média de maior parte dos dados.

Gráfico 7 – Gráfico de dispersão linear da média da comparação C entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceara de 1998 a 2017.



O Gráfico 7 apresenta a dispersão estabelecida para a região do Ceará, a partir dos totais mensais precipitados de longo período de 1998 a 2017 apropriados a partir de dados pluviométricos e das imagens de satélite para a comparação C. Neste gráfico é apresentado, adicionalmente, o coeficiente de determinação associado ao ajuste de uma função linear entre os referidos valores de totais de 20 anos precipitados (0,46), observa-se que houve uma superestimação na média de maior parte dos dados comparados.

Gráfico 8 – Gráfico de dispersão linear da média da comparação D entre TRMM e postos pluviométricos, para todo estado do Ceará de 1998 a 2017.



O Gráfico 8 apresenta a dispersão estabelecida para a região do Ceará, a partir dos totais mensais precipitados de longo período de 1998 a 2017 apropriados a partir de dados pluviométricos e das imagens de satélite para a comparação D. Neste gráfico é apresentado, adicionalmente, o coeficiente de determinação associado ao ajuste de uma função linear entre os referidos valores de totais de 20 anos precipitados (0,60), observa-se que os valores da reta de tendência estão muito próximos da reta 1:1, mesmo havendo uma leve superestimação para valores menos de 80 mm e uma leve subestimação para valores acima desse valor.

6 – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa aqui realizada, permitiu concluir que a densidade de postos pluviométricos no Estado não está de acordo com as recomendações mínimas da WMO. É importante frisar que a pesquisa foi realizada somente com os postos da FUNCEME, necessitando, portanto, incluir em futuras pesquisas a rede meteorológica nacional que conta com estações automáticas do INMET.

Os valores superiores obtidos pelos interpoladores em comparação com o Polígono de Thiessen, podem estar relacionados com a classificação climática predominante. Como o método de Thiessen opera com a ponderação das áreas de influência dos postos meteorológicos, quanto maior a área maior será sua influência nos resultados da precipitação média sobre a bacia hidrográfica (Aires et al., 2016). Além disso, a elaboração de estudos sobre informações técnicas dos recursos hídricos e climáticos, dará subsídios a FUNCEME para que avalie melhor a densidade e a distribuição estratégica de novos postos pluviométricos a serem instalados, visando suprir os critérios técnicos mínimos para a construção de séries históricas pluvio-hidrológicas mais confiáveis.

Já quanto ao TRMM, pode-se concluir que as estimativas do satélite foram aproximadas com os dados observados nos postos pluviométricos na comparação D e A. A comparação D a que obteve melhores resultados entre todas comparações analisadas, sendo esse modelo de comparação mais indicado para estimar precipitação no Ceará. Vale ressaltar que a comparação A teve praticamente o mesmo desempenho, sendo também um modelo de comparação satisfatório.

O índice de Pbias apresentou valores positivos, para todas comparações, o que indica que a utilização dos dados do TRMM tende a superestimar os valores observados de superfície.

A confiabilidade do TRMM em representar estimativas de chuvas para o estado do Ceará, comprova a eficácia de seus instrumentos em fornecer dados para o monitoramento climático a que se propôs. Lembrando que estes dados são disponibilizados para consulta a qualquer um que pesquise sobre a área e em qualquer

lugar da Terra, possibilitando pesquisas em vários segmentos de acordo com necessidades de cada pesquisa.

Verificou-se nas comparações pelos quatro métodos, que os locais que apresentam os maiores erros, são justamente onde tem a maior concentração de postos pluviométricos para o mesmo pixel, significando que quanto maior o número de dados disponíveis em um mesmo pixel, maior é a tendência desses valores se diferenciarem da precipitação estimada pelo TRMM, mas que pode ser corrigido com a utilização da interpolação para ajuste espacial desses dados.

Pode-se considerar que a quantidade de pesquisas envolvendo os produtos do TRMM mostrou-se viável, mas apenas para alguns estudos específicos, considerando que os dados se comportam de maneira diferente para cada região do planeta. Como no caso do nordeste do Brasil, que possui clima semiárido, onde a radiação solar é alta e a cobertura de nuvem é baixa durante a maior parte do ano, associado a um menor índice de pluviosidade em relação a outras regiões do país, acaba favorecendo um bom desempenho dos sensores do TRMM.

Contudo, nota-se que há uma grande quantidade de métodos utilizados para avaliação da qualidade das estimativas, alguns com foco em análises pontuais, outros em comparações espaciais, alguns fazendo uso de interpoladores e outros mantendo os dados intactos. Logo, deve-se ter cuidado ao definir o método dependendo do objetivo da análise.

7 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACQUAOTTA F.; FRATIANNI S.; ZANDONADI L.; ZAVATTINI J. A.; ANÁLISE DAS PRECIPITAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E AVALIAÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO PARANÁ, BRASIL, Environnement et géomatique: approches comparées France-Brésil. Rennes, 12-15, novembre 2014.

AIRES, U. R. V.; NETO, J. de O. M.; MELLO, C. R.; ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO DERIVADAS DO SATÉLITE TRMM PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAPEBA, MG, REVISTA SCIENTIA AGRARIA - SA, vol. 17, n.º. 2, Curitiba - PR, abril/maio, 2016, p. 57-66, Versão On-line ISSN 1983-2443.

ALMEIDA, C. T.; DELGADO, R. C.; JUNIOR, J. F. O.; GOIS, G.; CAVALCANTI, A. S. Avaliação das estimativas de precipitação do produto 3B43-TRMM do Estado do Amazonas. Floresta e Ambiente, 279-286, 2015.

ALVALÁ, C. R.; MACHADO, L. A. T.; Os satélites meteorológicos de nova geração e suas contribuições para as previsões de tempo e clima. Anais 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, Brasil, 11-15 novembro 2006, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.770-780.

ANA - Agência Nacional de Águas (Brasil); Diretrizes e análises recomendadas para a consistência de dados pluviométricos / Agência Nacional de Águas; Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica, Brasília: ANA, SGH, 2011.

ANDRADE, A. R.; NERY, J. T.; Análise da precipitação pluviométrica diária, mensal e interanual da bacia hidrográfica do Rio Ivaí, Brasil, Investigaciones Geográficas, Boletín 52, 2003.

ARAUJO, C. L.; NASCIMENTO, E.; VIANNA, J. N. de S.; PARA ONDE NOS GUIA A MÃO INVISÍVEL? Considerações sobre os paradoxos do modelo econômico hegemônico e sobre os limites ecológicos do desenvolvimento, Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente, UFPR, Vol. 31, agosto 2014.

ASHOURI, H.; GEHNE, M.; National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 17 Mar 2018. "The Climate Data Guide: PERSIANN-CDR: Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Climate Data Record." Retrieved from <<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/persiann-cdr-precipitation-estimation-remotely-sensed-information-using-artificial>>.

AZEVEDO, C. D. S.; Análise da estimativa de precipitação PR-TRMM durante a estação chuvosa para os estados de Alagoas e Sergipe / Carlos Denyson da Silva Azevedo. – 2015.

BARBOSA, G. S.; O DESAFIO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, Revista Visões 4ª Edição, Nº4, Volume 1 - 2008.

BERNARDI, E. C. S.; Qualidade das Estimativas de Precipitação do Satélite TRMM no Estado do Rio Grande do Sul. 2016. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

BEZERRA, F. B.; Fragmentando o Território, Bases para o Desenvolvimento do Semiárido do Ceará, Fortaleza – Ce, Fundação Konrad Adenauer, 2004, 190 p.

BRANDÃO, R. L.; FREITAS, L. C. B. Geodiversidade do estado do Ceará / Organização – Fortaleza - CE, CPRM, 2014, 214 p, ISBN 978-85-7499-140-5.

BRITO, L. T. de L.; MOURA, M. S. B. de; GAMA, G. F. B. (Ed.). Potencialidades da Água de Chuva no Semiárido Brasileiro. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007. cap. 2, p. 37-59.

BURSZTYN, M. Estado e meio ambiente no Brasil. In: BURSZTYN, M. (Org.). Para pensar o desenvolvimento sustentável. 2. ed. São Paulo: Brasiliense, 1994.

CARVALHO, A. M.; CARVALHO, L. G.; VIANELLO, R.; SEDIYAMA, G. C.; OLIVEIRA, M. S.; JUNIOR, A. S.; Geostatistical improvements of evapotranspiration spatial information using satellite land surface and weather stations data. Theoretical and Applied Climatology, (2013). 113. 10.1007/s00704-012-0772-1.

CAMPOS, A. G.; CASTRO, D.; OLIVEIRA, M. P.; ET AL., Atlas da Exclusão Social no Brasil: Dinâmica da Exclusão Social na Primeira Década do Século XXI, vol. 2, Cortez Editora.

CAMPOS, R. F.; Comparação entre dados de precipitação interpolados e do TRMM (3B43V7), Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, 2017. 54 f.

CARSON, RACHEL; Primavera Silenciosa, 2ª Ed. 1969, PORTICO: Edições Melhoramentos, Tradução: Raul de Polillo.

CASAGRANDE JUNIOR, E. F.; INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E SUSTENTABILIDADE: Possíveis Ferramentas para uma Necessária Interface, Revista Educação & Tecnologia, Periódico Técnico Científico dos Programas de Pós-Graduação

em Tecnologia dos CEFETs-PR/MG/RJ, Encontro da Associação Nacional de Programas de Pós-Graduação em Administração, Curitiba: Anais do Enanpad, 2004.

CHACON, S. S., O Sertanejo e o Caminho das Águas: Políticas Públicas, Modernidade e Sustentabilidade no Semiárido. Série BNB Teses e Dissertações, Nº 08, Fortaleza – Ce, 2007, 354 p.

CHEN, S.; HONG, Y.; GOURLEY, J. J.; HUFFMAN, G. J.; TIAN, Y.; CAO, Q.; YONG, B.; KIRSTETTER, P.; HU, J.; HARDY, J.; LI, Z.; KHAN, S.; XUE, XIANWU. Evaluation of the successive V6 and V7 TRMM multisatellite precipitation analysis over the Continental United States. *Water Resources Research*, v. 49, p. 8174-8186, 2013.

COLLISCHONN, B. Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído. 174 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

COLLISCONN, W.; DORNELLES, F.; Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais, Porto Alegre - RS, 2013, 332 p.

CONCEIÇÃO, R. S.; COSTA, V. C.; Cartografia e Geoprocessamento. v. 2, ISBN: 978-85-7648-778-4, Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2013. 264p.

CRUZ, P. M.; FERRER, G. R., Direito, Sustentabilidade e a Premissa Tecnológica como Ampliação de seus Fundamentos, Sequência. UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, ISSN 2177-7055, aprovado em: 19/05/2015, <<http://dx.doi.org/10.5007/2177-7055.2015v36n71p239>>.

DAMASCENO, S. M. B.; REIS, D. R.; AQUINO, D. S.; VASCONCELOS, P. H.; BARCELOS, A. D.; SUSTENTABILIDADE NO FOCO DA INOVAÇÃO, Revista Gestão Industrial, SN 1808-0448 / v. 07, n. 03: p. 120-134, 2011.

DOWBOR, L.; INOVAÇÃO SOCIAL E SUSTENTABILIDADE, Revista Brasileira de Gestão Urbana, Curitiba, v. 1, n. 1, p. 109-125, 2009, ISSN 2175-3369.

EMANUEL, L. S. A.; MARCOS, J. N. S.; CLEYBER, N. M.; FÁTIMA, J. S.; KATHIUSCIA, A. L.; Perfil Geossocioeconômico: Um olhar para as Macrorregiões de Planejamento do Estado do Ceará. ISBN: 978-85-98664-31-6, Fortaleza: IPECE, 2014. 174 p.

FENSTERSEIFER, C. A. Qualidade das Estimativas de Precipitações Derivadas de Satélites na Bacia do Alto Jacuí – RS. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

FLEMING, K.; AWANGE, J.L.; KUHN, M.; FEATHERSTONE, W.E. Evaluating the TRMM 3B43 monthly precipitation product using gridded raingauge data over Australia. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, v. 61, p.171-184, 2011.

FLORENZANO, T. G. *Iniciação em Sensoriamento Remoto*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia, série histórica de chuvas do Ceará, link<http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Download_de_series_historicas.php>, acessado em 05/03/2018.

GASPARINI, K. A. C.; ALMEIDA, C. T. de A.; GOUVEIA, N. de A.; Comparação de dados de precipitação do produto TRMM-3B43 com dados de estações meteorológicas do estado do Espírito Santo, *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE, Santos - SP, Brasil*, 28 a 31 de maio de 2017.

GOMES, F. da C.; MAGALHÃES, A. J. da S.; CAMPELO J. C.; et al., A Comparative Study Between the Rainfall Observed in Ceará and Estimated by the TRMM Project, *International Journal of Development Research*, 7, 2017, ISSN 17665-17671.

GONÇALVES, S.; NETO, R. B.; SANTOS, C. A. G.; RICARDE, M. S.; Análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação no Cariri Paraibano utilizando dados do satélite TRMM. Artigo, XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis-SC, 2017.

GREGO, C. R.; TEXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; BAYMA-SILVA, G.; MANJOLIN, R. C.; Interpolação de dados agrometeorológicos em duas densidades amostrais no norte de Minas Gerais, *Revista Agrometeoros*, Passo Fundo, v.25, n.1, p.81-89, ago 2017, ISSN 2526-7043.

GUERRA, A. F. S.; FIGUEIREDO, M. L.; RUSCHEINSKY, A.; Ambiente e Sustentabilidade no Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil, *Revista Iberoamericana Universitaria en Ambiente, Sociedad y Sustentabilidad*, ISSN 2346-9269, Aprovado: 05/30/2014.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; O Brasil em Síntese é o sistema agregador de informações do IBGE sobre os municípios e estados do Brasil, acessado em 23/12/2018 com endereço eletrônico: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/panorama>>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2001*. In: Houghton, J.T. (ed). *The scientific basis — Contribution of working Group I to the third assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge Univ. Press. 2001.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará: Ceará em Números - Informações Socioeconômicas e Geográficas ao Governo e à Sociedade, 2011, acessado em 18/10/2018 no endereço eletrônico: <http://www2.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ceara_em_numeros/2011/territorial/index.htm>.

KAWAKUBO, F.S.; MORATO, R.G.; LUCHIARI, A. Use of fraction imagery, segmentation and masking techniques to classify land-use and land-cover types in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing (Print)*, v. 34, p. 5452-5467, 2013.

KOBS, F.F.; CASAGRANDE JUNIOR, E.F.; O papel das tecnologias digitais na educação: perspectivas para além dos muros da escola *Rev. Cienc. Educ., Americana*, ano XVIII, n. 34, p. 41-73, 2016.

KOETSIER, T.; CECCARELLI, M.; Explorations in the History of Machines and Mechanisms: Proceedings of HMM 2012. ISBN: 9400741324, 9789400741324., Springer Science & Business Media, 2012.

KOPPE, A. O. P; HORN, L. F. D. R.; Relações de consumo: meio ambiente / Organizadores, Caxias do Sul, RS: Educus, 2009.232 p., ISBN 978-85-7061-559-6.

LIU, J. K.; PETER, T. Y.; Topographic correction of wind-driven rainfall for landslide analysis in Central Taiwan with validation from aerial and satellite optical images. *Remote Sens.*, v. 5, n. 6, p. 2571-2589, 2013.

LIRA, W. S; CÂNDIDO, G.A; Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa / Organizadores [online]. Campina Grande: EDUEPB, 2013, 325p. ISBN 9788578792824.

LOPES, G. K.; CASAGRANDE, E. F. J.; SILVA, M. C. da., Educação Interdisciplinar para Formação de uma Mentalidade Sustentável, *Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade* | vol.5 n.3 | jan/jun 2014.

LOUZADA, F. L. R. O. Balanço hídrico climatológico com dados estimados pelo satélite Tropical Rainfall Measuring Mission para a bacia hidrográfica do Rio Doce. 2016.Tese (Doutorado em Recursos hídricos e Geoprocessamento em sistemas agrícolas), Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre - ES, 2016.

MAIA, M. H. de A.; CEARÁ 2050: Diagnóstico, Recursos Naturais e Ecologia, Fortaleza - CE, setembro de 2018, 189 pág.

MARCIANO, A. G.; BARBOSA, A. A.; SILVA, A. P. M.; Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada, *Rev. Ambient. Água* vol. 13 n. 1, e1906 - Taubaté 2018.

MARCUZZO, F. F. N.; MELATI, M. D.; Cálculo de Densidade pelos Critérios da OMM e Espacialização de Novas Estações P e Pr na Sub-Bacia 85, XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília - DF, novembro de 2015.

MASSAGLI, G. O.; VICTORIA, D. C.; ANDRADE, R. G.; COMPARAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO MEDIDA EM ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E ESTIMADA PELO SATÉLITE TRMM, 5º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica - CIIC 2011 9 a 11 de agosto de 2011 – Campinas, SP.

MAZIERO, E.; CRUZ, J. C.; PADILHA, D.; BAUMHARDT, E.; Indicador hidrológico de tempo de percurso determinado pixel a pixel para uma bacia hidrográfica. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 18., 2009. Anais... Campo Grande, MS: [s.n.], 2009. p. 67–88.

MEADOWS, DONELLA H; MEADOWS, DENNIS L; RANDERS, JØRGEN; BEHRENS III, WILLIAM W. Os limites do crescimento; Um Relatório para o Projeto do Clube de Roma sobre a Predicação da Humanidade, 1972.

MELATI, M. D; MARCUZZO, F. F. N.; Espacialização da recomendação de novas estações pluviométricas na sub-bacia 87 segundo os critérios de densidade da Organização Mundial de Meteorologia, Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

MELO, D. C.; XAVIER, A. C.; BIANCHI, T.; OLIVEIRA, P. T.; SCANLON, B. R.; LUCAS, M. C.; WENDLAND, E. Performance evaluation of rainfall estimates by TRMM Multisatellite Precipitation Analysis 3B42V6 and V7 over Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 120, p. 1-11, 28 Ago., 2015.

MENEZES, P. R.; ALMEIDA, T. de (Org.). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília, 2012.

MENG, J.; LI, L.; HAO, Z.; WANG, J.; SHAO, Q. Suitability of TRMM satellite rainfall in driving a distributed hydrological model in the source region of Yellow River. *Journal of Hydrology*, v. 509, p. 320-332, 2014.

MORAES, E. C. Fundamento de Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisa Espacial. DSR/INPE. São José dos Campos. 2002. Disponível em: Acesso em: 26 mai. 2014.

MORAIS, L. B.; FERREIRA, N. C.; Banco de Dados Pluviométricos Integrados por Dados do Sensor TRMM e Estações Pluviométricas no Estado de Goiás, Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

MOREIRA, M. A. Sistemas Sensores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, agosto 2001.

MICALICHEN, M. L. M. de M.; DIAS, N. L. C.; Análise comparativa da velocidade do vento e da temperatura do ar, entre dados gerados por reanálises meteorológicas e dados observacionais na região de Minas Gerais, *Ciência e Natura* v.40, Edição Especial: X Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 2018, p. 20 – 25, ISSN on-line: 2179-460X.

MILANESI, M. A.; ALVES, R. R.; GALVANI, E.; Comparativo entre instrumentos pluviométricos experimentais e automáticos, XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, I Congresso Nacional de Geografia Física, Campinas - SP, julho de 2017.

NASA, Giovanni User Guide; Giovanni is an online (Web) environment for the display and analysis of geophysical parameters in which the provenance (data lineage) can easily be accessed. Disponível em <<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/doc/UsersManualworkingdocument.docx.html>>.

NASDA. TRMM Data Users Handbook. National Space Development Agency of Japan, Earth Observation Center. 2001.

NÓBREGA, R. S.; SOUZA, E. P.; GALVÍNCIO, J. D.; Análise da Estimativa de Precipitação do TRMM em uma Sub-Bacia da Amazônia Ocidental, *Revista de Geografia*, Recife - PE: UFPE – DCG/NAPA, v. 25, no 1, jan/abr. 2008.

Comissão mundial no ambiente e no desenvolvimento; *Nosso futuro comum*. Oxford: Oxford University Press. p. 27. 1987, ISBN 019282080X.

PEREIRA, G.; SILVA, M. E. S.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. S.; Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 18, n. 3, p. 139-148, 2013.

PINSKY, V.; KRUGLIANSKAS, I.; *ESTUDOS AVANÇADOS* 31 (90), 2017.

POMBO, S.; OLIVEIRA, R. P. Evaluation of extreme precipitation estimates from TRMM in Angola. *Journal of Hydrology*, v. 523, p. 663-679, 2015.

QGIS Development Team, <2018>. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2018. <https://www.qgis.org/pt_BR/site/>.

R CORE TEAM R; A Language and Environment for Statistical Computing R Foundation, Vienna, Austria, 2017. Disponível em < <https://www.r-project.org/>>.

RECH, A. U.; Instrumentos de desenvolvimento e sustentabilidade urbana / Organizador [Recurso eletrônico], Caxias do Sul, RS: Educs, 2014.

ROCHA, L. T.; Avaliação da viabilidade de uso de precipitações obtidas por sensoriamento remoto em simulações hidrológicas na bacia do rio Japarutuba – SE.; Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Sergipe, 2015, 75 f.

ROMEIRO, A. R., Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômicoecológica, estudos avançados 26 (74), 2012.

SACHS, I; BURSZTYN, M.; MENDES, A.; ET AL.; Para Pensar O Desenvolvimento Sustentável. Editora Brasiliense, 1997.

SANTOS, A. P. S.; PEREZ-MARIN, A. M.; FORERO, L. F. U.; et al.; O semiárido brasileiro: riquezas, diversidades e saberes, Coleção Reconhecendo o Semiárido, INSA/MCTI, Campina Grande - PB, 2013, 73p.

SANTOS, Mateus C. Desenvolvimento Sustentável: interpretações crítico - científicas. 2011. 63 fls. Trabalho de Conclusão de Curso, Especialização em Análise e Educação Ambiental em Ciências da Terra – Universidade Estadual de Londrina, 2011.

SÁVIO, E. P.R.; MARTINS, E. N.; MOLEJÓN, C.; BIAZETO, B.; SILVA, R. F. V.; ENGLE, N.; Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas – Banco Mundial, 1ª Edição – Brasília – 2015.

SILVA, D. F.; ROCHA, J. V.; Interpolação dos dados observados de precipitação pluvial e comparados com dados estimados pelo satélite TRMM, Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

SILVA-FUZZO, D. F.; ROCHA, J. V. Validação dos Dados de Precipitação Estimados Pelo TRMM, para o Estado do Paraná, e sua Contribuição ao Monitoramento Agrometeorológico. Revista Formação (ONLINE) Vol. 3; n. 23, 2016. p. 301316. ISSN: 2178-7298. ISSN-L: 1517-543X.

SILVA, M. C. da; ZAGO, M. R. R. S.; FRANÇA, A. C. C. V.; RODRIGUES A. P. S.; CASAGRANDE, E. F. J., Care About Water in Curitiba, Brazil: Educational and Environmental Practices at School, Asian Education Studies; Vol. 3, No. 3; 2018, ISSN 2424-8487, E-ISSN 2424-9033, Published by July Press.

SILVA, M. I. C. A.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; ESTIMATIVA DA PRECIPITAÇÃO DO SATÉLITE TRMM PARA A BACIA DO ALTO RIO PARAÍBA (PB), XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2016.

SILVA, V.P.R.; PEREIRA, E.R.R.; ALMEIDA, R.S.R.; Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v.27, p.163-172, 2013.

SODRÉ, G. R. C. ; BORGES, L. S. ; OLIVEIRA, J. V. ; MELLO, F. A. . Análise Quantitativa e Qualitativa Horária de Dados do Radar, TRMM e Estações Meteorológicas na Região Amazônica. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 6, p. 110-117, 2013.

SOARES, A. S. D.; PAZ, A. R.; PICCILLI, D. G. A.; Avaliação das estimativas de chuva do satélite TRMM no Estado da Paraíba, Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH, Versão On-line ISSN 2318-0331, vol. 21, no.2, Porto Alegre, abr./jun. 2016, p. 288 - 299, Artigo Científico/Técnico.

SOUSA, D.G.; MINCATO, R.L.; KAWAKUBO, F.S.; Multitemporal analysis of land use types using Landsat-5 TM images in the region of Alfenas, South of Minas Gerais, aiming the conservation of native forest fragments. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 8, p. 1482-1492, 2015.

TOMAZ, U. R.; CRUZ, S. M. S.; SANTOS, E. O.; LYRA, G. B.; CrossFlow: Interpolando Dados Pluviométricos com Apoio de Validação Cruzada em Workflows Científicos, XXXVII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, 11º BreSci - Brazilian e-Science Workshop, 2017, <<http://csbc2017.mackenzie.br/anais>>.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Segunda Edição. Porto Alegre: Ed. Universidad e/ ABRIL, 2001, p. 943.

VEIGA, J. E. da. Indicadores de sustentabilidade. Estudos Avançados, v.24, n.68, p. 3952, 2010.

VERAS, C. A. G.; Sensoriamento Remoto no Brasil, Artigo publicado na Revista MundoGEO. Edição nº 71, 2013, Pág. 64. link: <<http://mundogeo.com/blog/2013/02/15/sensores-remotos/>> acessado em 22/01/2018.

VIANELLO, R. L.; A ESTAÇÃO METEOROLÓGICA E SEU OBSERVADOR: Uma parceria secular de bons serviços prestados à humanidade, Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, Maio 2011.

VIEIRA, G.; QUADROS, R., Abrindo a Caixa Preta da Mudança Organizacional para a Inovação Tecnológica, Desafio Online, Campo Grande, v. 4, n. 2, agosto 2016, www.desafioonline.ufms.br.

WATERFOOTPRINT. Disponível em <http://waterfootprint.org/en/>, acessado em 16/11/2017.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Methods of observation. In: Guide to Hydrological Practices: hydrology from measurement to hydrological information. 6. ed. Geneva, Switzerland, 2008. v. 1, cap. 2, p. 24-27. (WMO - n. 168). Disponível em: http://www.whycos.org/chy/guide/168_Vol_I_en.pdf. Acesso em: 4 jun. 2013.

ANEXOS

The ANOVA Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
Comp	4	A B C D

Number of observations 795

NOTE: All dependent variables are consistent with respect to the presence or absence of missing values. However only 758 observations can be used in this analysis.

The ANOVA Procedure

Dependent Variable: EMA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	27636.44966	9212.14989	324.14	<.0001
Error	754	21429.01634	28.42045		
Corrected Total	757	49065.46600			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	EMA Mean
0.563257	23.79592	5.331083	22.40334

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Comp	3	27636.44966	9212.14989	324.14	<.0001

The ANOVA Procedure

Dependent Variable: REMQ

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	77164.3079	25721.4360	283.36	<.0001
Error	754	68443.8861	90.7744		
Corrected Total	757	145608.1940			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	REMQ Mean
----------	-----------	----------	-----------

0.529945 25.96060 9.527559 36.70008

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Comp	3	77164.30786	25721.43595	283.36	<.0001

10:22 Monday, May 31, 2019 4

The ANOVA Procedure

Dependent Variable: Pbias

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	7606.1559	2535.3853	7.72	<.0001
Error	754	247541.7622	328.3047		
Corrected Total	757	255147.9181			

R-Square Coeff Var Root MSE Pbias Mean
0.029811 271.9878 18.11918 6.661762

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Comp	3	7606.155915	2535.385305	7.72	<.0001

10:22 Monday, May 31, 2019 5

The ANOVA Procedure

Dependent Variable: r

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	0.69395028	0.23131676	495.91	<.0001
Error	754	0.35170071	0.00046645		
Corrected Total	757	1.04565099			

R-Square Coeff Var Root MSE r Mean
0.663654 2.319631 0.021597 0.931069

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Comp	3	0.69395028	0.23131676	495.91	<.0001

10:22 Monday, May 31, 2019 6

The ANOVA Procedure

Bartlett's Test for Homogeneity of EMA Variance

Source	DF	Chi-Square	Pr > ChiSq
Comp	3	108.4	<.0001

Bartlett's Test for Homogeneity of REMQ Variance

Source	DF	Chi-Square	Pr > ChiSq
Comp	3	131.0	<.0001

Bartlett's Test for Homogeneity of Pbias Variance

Source	DF	Chi-Square	Pr > ChiSq
Comp	3	155.5	<.0001

Bartlett's Test for Homogeneity of r Variance

Source	DF	Chi-Square	Pr > ChiSq
Comp	3	267.7	<.0001

10:22 Monday, May 31, 2019 7

The ANOVA Procedure

Level of Comp	N	-----EMA-----		-----REMQ-----		-----Pbias-----	
		Mean	Std Dev	Mean	Std Dev	Mean	Std Dev
A	196	16.8880019	4.38501860	27.5268020	7.5610052	4.2121818	12.6238761
B	183	29.1077615	6.52217318	48.1408458	12.4976248	8.9337606	23.3054274
C	183	28.1703330	6.51364673	46.0742657	11.0825758	10.7648135	22.6179222
D	196	16.2744662	3.37076981	26.4389904	5.7803387	3.1591271	11.2108680

Level of Comp	N	-----r-----	
		Mean	Std Dev
A	196	0.95854177	0.01486032
B	183	0.89479344	0.02771179
C	183	0.90520988	0.02881127
D	196	0.96161128	0.00955340

10:22 Monday, May 31, 2019 8

The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for EMA

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha		0.05
Error Degrees of Freedom		754
Error Mean Square		28.42045
Harmonic Mean of Cell Sizes		189.277

NOTE: Cell sizes are not equal.

Number of Means	2	3	4
Critical Range	1.076	1.133	1.171

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	Comp
A	29.1078	183	B
A			
A	28.1703	183	C
B	16.8880	196	A
B			
B	16.2745	196	D

10:22 Monday, May 31, 2019 9

The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for REMQ

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha		0.05
Error Degrees of Freedom		754
Error Mean Square		90.77438
Harmonic Mean of Cell Sizes		189.277

NOTE: Cell sizes are not equal.

Number of Means	2	3	4
Critical Range	1.923	2.024	2.092

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	Comp
A	48.1408	183	B
B	46.0743	183	C
C	27.5268	196	A

The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Pbias

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha 0.05
 Error Degrees of Freedom 754
 Error Mean Square 328.3047
 Harmonic Mean of Cell Sizes 189.277

NOTE: Cell sizes are not equal.

Number of Means	2	3	4
Critical Range	3.656	3.850	3.979

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	Comp
A	10.765	183	C
A			
A	8.934	183	B
B	4.212	196	A
B			
B	3.159	196	D

The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for r

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha 0.05
 Error Degrees of Freedom 754
 Error Mean Square 0.000466
 Harmonic Mean of Cell Sizes 189.277

NOTE: Cell sizes are not equal.

Number of Means	2	3	4
Critical Range	.004358	.004588	.004743

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	Comp
A	0.961611	196	D
A			
A	0.958542	196	A
B	0.905210	183	C
C	0.894793	183	B