



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MODELAGEM EM CIÊNCIA DA TERRA E DO AMBIENTE – PPGM**

**ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NO SEMIÁRIDO
BAIANO A PARTIR DAS IMAGENS TERMAIS**

NAIARA DA SILVA LIMA



**Feira de Santana
2019**

NAIARA DA SILVA LIMA

**ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NO SEMIÁRIDO
BAIANO A PARTIR DAS IMAGENS TERMAIS**

Dissertação apresentada junto ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciência da Terra e do Ambiente da Universidade Estadual de Feira de Santana como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rosângela Leal Santos

**Feira de Santana
2019**

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteadó - UEFS

L699 Lima, Naiara da Silva

Estimativa de evapotranspiração potencial no semiárido baiano a partir das imagens termais / Naiara da Silva Lima. – 2019.

73 f.: il.

Orientadora: Rosangela Leal Santos

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciência da Terra e do Ambiente, Feira de Santana, 2019.

1. Evapotranspiração potencial – Serrinha, Bahia. 2. Semiárido baiano – Região Nordeste – Brasil. 3. Sensoriamento remoto. 4. SAFER – algoritmo. I. Santos, Rosangela Leal, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU: 551.573:528.8(814.22)

“Importante não é ver o que ninguém nunca viu, mas sim, pensar o que ninguém nunca pensou sobre algo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

AGRADECIMENTOS

Quando acreditamos que uma conquista irá nos fazer crescer enquanto pessoa e profissional, a buscamos incessantemente, enfrentamos todos os obstáculos, todas as dificuldades e por um curto período de tempo pensamos: Consegui!! Fui aprovada. Não sabendo que ali é só o começo de mais um caminho dos muitos que permeiam a nossa jornada chamada vida.

Nunca fui o tipo de pessoa que queria muito da vida, apenas o necessário, não por achar que não merecesse, mas para poder sanar as necessidades que batiam todos os dias na nossa porta e que eu sabia que só o estudo poderia me dar, nunca fui também o tipo de pessoa que queria conquistar as coisas somente para si, mas para poder retribuir um pouco da vida digna que abaixo de Deus uma pessoa me proporcionou, abriu seu coração, sua casa, sua família e sua vida para se doar a uma pequena jovem que não carregava seu sangue, mas que carrega a maior gratidão do mundo.

Meu sonho é poder viver o mundo e poder compartilhar suas cores e sabores, porém ainda é uma hábito do ser humano achar que a vida acontece no amanhã, no depois e no meio desse processo de se preparar para o futuro esquecemos que a vida acontece no agora e nem sempre a vida espera você estar preparado para as conquistas e para as perdas. Pois bem, uma vez eu fiz a promessa de crescer e poder proporcionar uma vida melhor para minha família, as coisas não saíram exatamente como planejei, mas a promessa permanece com novas perspectivas, de me tornar uma pessoa melhor a cada dia e poder compartilhar todas as minhas experiências e conhecimento independentemente de onde esteja, jamais esquecendo de onde vim, sei que dessa forma onde quer que ela esteja, estará orgulhosa.

Acredito que nada na vida seja por acaso, diante do meu caminho percorrido muitos foram os obstáculos e as dificuldades, mas em toda essa trajetória nunca estive só. Inicialmente agradeço a Deus nosso senhor, por me guiar e iluminar sempre, agradeço todas as conquistas e também todos os desafios, me mostrando a força que eu nunca imaginei que tinha.

A minha família, em especial a minha mãe Ana Queiroz e minha irmã Maria da Conceição, que apesar das adversidades, sempre quiseram o melhor

para mim e fizeram o impossível para que eu tivesse tudo que um dia lhes foi negado.

Ao meu amigo e noivo Geronildo Ramos, pelo apoio, compreensão e paciência, fazendo sempre questão de me lembrar quem eu sou e quem eu posso ser.

A minha mestre em todos os sentidos da palavra, Ana Isabel Leite, pelos seus conselhos, sua orientação, compreensão, paciência, companheirismo e amizade, pois ao longo do tempo além de ser uma excelente professora também se tornou uma grande amiga.

A Professora Rosangela, pelo seu tempo dedicado, os momentos de conversa e aprendizado, sem a sua valiosa contribuição esse trabalho não seria possível.

A turma XI do Programa de pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, em especial aos grandes amigos que fiz durante esse período: Ana Paula, Ereni, Beth, Jonathas e Natane.

Meus agradecimentos também se estendem ao um amigo recente, o qual trouxe grandes contribuições para esta pesquisa, e sem a sua ajuda a mesma também não seria possível, Erli Santos, que agora também está trilhando o seu caminho no mestrado, mas nunca esquece de mim.

Agradeço também a professora Joselisa que durante o período de formação sempre esteve presente, formando parcerias e nos proporcionando experiências inesquecíveis e enriquecedoras e ao professor Gustavo Baptista pelas conversas estimulantes e o apoio concedido na pesquisa.

Enfim, a todos que estiveram presentes nesse percurso o meu mais sincero agradecimento.

“Não é sobre chegar no topo do mundo e saber que venceu é sobre escalar e sentir que o caminho te fortaleceu é sobre ser abrigo e também ter morada em outros corações e assim ter amigos contigo em todas as situações.”

(Ana Vilela – Trem Bala)

**A Deus,
A minha mãe, Ana (*in memoriam*).**

Dedico

RESUMO

A Região Nordeste do Brasil é composto por uma grande área de clima semiárido, na qual há o predomínio de elevadas temperaturas e de baixos índices pluviométricos com uma distribuição desigual das chuvas, o déficit observado no balanço hídrico anual dessa região se constitui um grave problema as atividades agropecuárias, pois a deficiência hídrica limita à produção agrícola, diminui a disponibilidade de água para dessedentação animal e consumo humano, sendo assim fonte de risco agrícola nestas áreas. Desta forma a quantificação da evapotranspiração assume particular aceção em virtude destes eventos de déficit hídrico, ajudando no planejamento agrícola, indicando o período de escassez de água. Sendo assim, o principal objetivo desta pesquisa foi Estimar a evapotranspiração potencial do município de Serrinha a partir do algoritmo SAFER juntamente com dados de estação meteorológica local, para o ano de 2013. De modo que buscou-se compreender a dinâmica climática do semiárido, organizar base de dados com a aquisição de imagens de satélite e dados de estações meteorológicas para a área de estudo; estimar ET, a partir dos métodos Penman-Monteith, Samani-Hargrave e Thornthwaite com dados da estação meteorológica do município de Serrinha e por fim comparar os resultados das estimativas obtidos através da imagem de satélite e dos métodos empíricos matemáticos. A área de estudo compreendeu todo o município de Serrinha/BA, foi selecionada 1 imagem do sensor OLI (*Operational Land Imager*), do satélite Landsat-8, correspondente a órbita 216 e o ponto 68 e através da metodologia aplicada foi possível obter o Albedo da superfície (α_0), a Temperatura da superfície (T_0) e o NDVI, variáveis de entrada do SAFER, além da evapotranspiração potencial (ET_o) pela equação de Penman-Monteith, Thornthwait e Samani e Hargrave com dados da Estação Meteorológica Convencional de Serrinha – Bahia. Como resultados, constatou-se que não houve diferença acentuada entre os três métodos utilizados, os menores valores foram os calculados pelo método de Thornthwaite, e os valores superiores foram os calculados pelo métodos de Penman-Monteith (PM), acompanhado pelo método de Hargraves-Samani. A ET_o foi calculada para todo o ano de 2013, mas foram selecionados os valores da data da imagen escolhida, o SAFER computou, os maiores valores para as áreas com a presença de uma vegetação mais intensa, com máximos de 5,159 a 6 mm dia⁻¹ e os menores valores foram encontrados no centro urbano e em faixas de solo exposto, onde há pouca ou nenhuma vegetação.

Palavras-chave: Semiárido. Evapotranspiração. Sensoriamento Remoto. SAFER

ABSTRACT

Brazil's Northeast region is composed of a great semi-arid climate area in which high temperatures and low rainfall indexes are predominant with an unequal distribution of rainfalls. The deficit observed in the annual hydric balance is a serious problem for agricultural activities, once hydric deficiency limits the agricultural production, reduces the availability of water for animals thirst-quenching and for human consumption, being, though, a fountain of agricultural risks in those areas. Thus, the quantification of evapotranspiration assumes a particular meaning due to these events of hydric deficit, helping the agricultural planning and indicating the period of water shortage. Therefore, the main objective of this research was to estimate the potential evapotranspiration of the municipality of Serrinha from the SAFER algorithm along with local meteorological station data for the 2013 year. The aim was to understand the climatic dynamics of the semi-arid region, to organize the data base with the acquisition of satellite images and meteorological station data for the area of study; it was also sought to estimate ET, using the Penman-Monteith, Samani-Hargrave and Thornthwaite methods with data from the meteorological station of Serrinha. Finally, the aim was also compare the results of the estimates obtained through the satellite image and empirical mathematical methods. The studied area comprised the entire municipality of Serrinha / BA. The Landsat-8 satellite OLI (Operational Land Imager) image, corresponding to orbit 216 and point 68, was selected through the methodology used to obtain Surface Albedo (α_0), Surface Temperature (T_0) and the NDVI, SAFER input variables, as well as potential evapotranspiration (ET_0) by the Penman-Monteith, Thornthwait and Samani and Hargrave equations with data from the Serrinha-Bahia Conventional Meteorological Station. As results, it was verified that there was no marked difference between the three methods used. The lowest values were those calculated by the Thornthwaite method, and the higher values were those calculated by the Penman-Monteith (PM) methods, followed by the Hargraves-Samani method. ET_0 was calculated for the entire year 2013, but the values of the date of the chosen image were selected. SAFER computed the highest values for the areas with the presence of more intense vegetation, with maximum values of 5,159 to 6 mm day⁻¹ and the lowest values were found in the urban center and in strips of exposed soil, where there is little or no vegetation.

Keywords: Semiarid. Evapotranspiration. Remote sensing. SAFER

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática do movimento de água no sistema solo-planta-atmosfera em condições ótimas de desenvolvimento

Figura 2: Representação esquemática do processo de Evapotranspiração.

Figura 3: Proporção territorial das regiões brasileiras

Figura 4: Limite atual da região semiárida brasileira

Figura 5 - Localização do município de Serrinha, Estado da Bahia

Figura 6: Climograma de Serrinha/BA, para o ano de 2013

Figura 7: Mapa de localização e aspectos Geomorfológicos

Figura 8: Mapa geológico do município de Serrinha

Figura 9: Vegetação de Caatinga, típica do município de Serrinha/BA

Figura 10: Áreas devastadas por ação antrópicas

Figura 11: Hidrografia do município de Serrinha.

Figura 12: Corpos hídricos presentes no município de Serrinha/BA

Figura 13: Mapa de solos de Serrinha

Figura 14: Solos característicos do município de Serrinha/BA

Figura 15: Fluxograma de operações do algoritmo SAFER para gerar a evapotranspiração regionalizada.

Figura 16: Simplificação do algoritmo como escrito na ferramenta *Graph Built* no software SNAP para obtenção da evapotranspiração atual com as imagens Landsat 8.

Figura 17: Precipitação total mensal (mm) no município de Serrinha - BA, 2013

Figura 18: Média de Temperatura (°C) mensal de Serrinha/BA, 2013

Figura 19: Valores totais mensais da evapotranspiração de potencial (mm) Serrinha/BA, 2013

Figura 20: Gráfico de Correlação entre os métodos de Penman-Monteith (PM) e Thornthwaite.

Figura 21: Gráfico de correlação entre os métodos de Penman-Monteith (PM) e Hargraves-Samani.

Figura 22: Distribuição espacial dos valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para a imagem do mês de dezembro de 2013.

Figura 23: Distribuição espacial da temperatura da superfície (T_0) em graus Celsius, obtida a partir dos dados do sensor TIRS do Landsat 8, para o mês de dezembro de 2013.

Figura 24: Distribuição espacial do albedo da superfície (α_0), obtida a partir da soma do albedo das bandas B1 a B7 do sensor OLI, para a imagem do mês de dezembro de 2013.

Figura 25: Distribuição espacial da evapotranspiração atual (ET_0), em mm.dia⁻¹, obtida a partir da temperatura da superfície (T_0), do NDVI, do albedo da superfície (α_0) e da evapotranspiração potencial (ET_0).

Figura 26: Distribuição espacial da evapotranspiração atual (ET_a), em mm.dia⁻¹, em função do NDVI.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Bandas espectrais, dos sensores OLI e TIRS do satélite Landsat 8, e suas descrições

Tabela 2. Parâmetros radiométricos para o cálculo do albedo

Tabela 3: Cálculo de Evapotranspiração Potencial (dada em dia mm.dia⁻¹) pelos métodos de Penman-Monteith (PM), Thornthwaite e Hargraves-Samani para o ano de 2013 com dados da Estação Meteorológica de Serrinha/BA

LISTA DE SIGLAS

ESA - European Space Agency
ET - Evapotranspiração
ETa - Evapotranspiração atual
ETC – Evapotranspiração de Cultura
ETO – Evapotranspiração de Oasis
ETo - Evapotranspiração de referência
ETP - Evapotranspiração potencial
FAO – Food Agriculture Organization
FPA - Frente Polar Atlântica
HS – Método de Hargrave e Samani
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
KC – coeficiente de cultura
NDVI - Normalized Difference Vegetation Index
OLI - Operational Land Imager
PM - Método de Penman-Monteith
REM - Radiação eletromagnética
SBV - Serra da Barra do Vento
SNAP - Sentinel Application Platform
SR - Sensoriamento Remoto
Ta - Temperatura média diária do ar (°C)
TIRS - Termal Infrared Sensor
Tbri - Temperatura de brilho
TOA - Top of Atmosphere
USGS - United States Geological Survey
UTM - Universal Transversa de Mercator
ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	19
1.2 Justificativa.....	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Conceitos básicos	20
2.1.1 EVAPORAÇÃO	20
2.1.2 TRANSPIRAÇÃO	20
2.1.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO	22
2.2 Métodos de Estimativa da Evapotranspiração	24
2.2.1 ASPECTOS RELEVANTES	24
2.2.2 MÉTODO PENMAN-MONTEITH (PM).....	24
2.2.3 MÉTODO DE THORNTHWAITE	25
2.2.4 MÉTODO DE HARGREAVES & SAMANI	26
2.3 Características do Semiárido Brasileiro	26
2.3.1 ASPECTOS RELEVANTES	26
2.3.2 ESPECIFICIDADES DO SEMIÁRIDO.....	27
2.3.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ÁREAS SEMIÁRIDAS	30
2.4 Sensoriamento Remoto	31
2.4.1 SENSORIAMENTO TERMAL – SAFER.....	32
3 ÁREA DE ESTUDO	35
3.1 Clima.....	36
3.2 Geomorfologia.....	38
3.3 Geologia	39
3.4 vegetação.....	40
3.5 Hidrografia	42
3.6 Solos.....	44

4 MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1 Dados Meteorológicos	46
4.2 Aquisição das Imagens Landsat 8	46
4.3 Conversão da reflectância TOA	47
4.4 Albedo no topo da atmosfera	48
4.5 Temperatura no topo da atmosfera	49
4.6 NDVI.....	49
4.7 Processamento do algoritmo SAFER	50
4.8 Software de Processamento (SNAP)	52
5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	53
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
6.1 Validação dos métodos	60
6.1.1 THORNTHWAITE	60
6.1.2 HARGREAVES E SAMANI	61
6.1.3 RESULTADOS OBTIDOS PELO SAFER.....	62
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

Para entendermos a dinâmica de um determinado espaço torna-se necessário levar em consideração as múltiplas relações entre os elementos que o compõe. Seguindo essa perspectiva o clima conforma-se como um dos elementos mais importantes para a compreensão da dinâmica socioambiental do nosso planeta. Ele interage com toda a superfície terrestre, interferindo na configuração de diferentes arranjos geoespaciais, sejam estes naturais ou socialmente produzidos, apresentando-se dinâmico e com características espaçotemporais distintas.

Atualmente as questões voltadas para as mudanças climáticas nas últimas décadas tornaram-se um dos principais temas de discussões no mundo. O desenvolvimento de atividades antrópicas como: desmatamento, indústrias, automóveis, agropecuária, contribuem fortemente para as mudanças de Clima. Essas modificações provocadas por fenômenos naturais ou antrópicos favorecem flutuações em diversas componentes do ciclo hidrológico, tais como precipitação, evapotranspiração e umidade do solo, fundamentalmente dependentes dos processos de trocas radiativas e energéticas entre a atmosfera e a superfície (SANTOS, 2009).

A evapotranspiração juntamente com a precipitação se caracterizam como principais fatores que afetam a disponibilidade hídrica de uma região. A precipitação atua como suprimento de água e a evapotranspiração atua como perda de água pela plantação e pelo solo. Ao contrário da precipitação a evapotranspiração ocorre todo dia, sua intensidade depende principalmente da demanda atmosférica e da disponibilidade de água no solo. Regularmente locais com precipitação menor que a evapotranspiração são locais que apresentam déficit hídrico. Quando a evapotranspiração em uma superfície ampla e vegetada ocorre sem restrições hídricas tem-se a Evapotranspiração Potencial; que geralmente utiliza a grama como referência. (SANTOS, 2017)

Entende-se por evapotranspiração (ET) como um fenômeno natural, proposto por Thornthwaite (1944) para representar os processos conjuntos de evaporação e de transpiração que ocorrem naturalmente numa superfície vegetada, no qual a água é transferida para atmosfera no estado de vapor através da evaporação do solo (processo físico) e transpiração das plantas

(processo biológico), sendo fundamental para previsão e estudo do clima, pois o mesmo se caracteriza como componente principal do balanço hídrico e está fortemente relacionado à quantidade de vapor d'água no ar, sendo capaz de alterar a quantidade de chuva em determinadas áreas.

Para estimar a ET de um determinado local pode-se utilizar métodos diretos ou indiretos. Os métodos indiretos, também conhecidos como métodos empírico-teóricos, utilizam dados atmosféricos em equações matemáticas para estimar a evapotranspiração e o método direto é obtido através de equipamentos de medida, sendo o lisímetro mais utilizado, porém devido ao alto custo, esta técnica se restringe a pesquisa.

Com o avanço das tecnologias informacionais e o auxílio do sensoriamento remoto, progressos foram obtidos nos estudos ambientais, técnicos e sociais voltados para a perspectiva de conhecer e identificar problemáticas e tencionar possíveis soluções.

Atualmente, com o desenvolvimento do Sensoriamento Remoto é possível realizar diversos estudos nas mais diferentes áreas do mundo. Através desta técnica é possível conhecer informações sobre o objeto sem contato físico entre o sensor e o alvo a ser estudado, através da Radiação Eletromagnética que é captada pelos objetos da superfície e convertida em informações possíveis de análise e interpretação dos alvos. Assim, informações precisas sobre a cobertura do solo, obtidas através de satélites, podem acoplar-se às informações fornecidas a partir de estações meteorológicas para o cálculo proporcionando a estimativa de evapotranspiração para grandes áreas (SOUZA, 2013).

Tomando por base a região semiárida do Brasil, a qual atualmente ocupa uma área de 969.589,4 km² e que se caracteriza, principalmente, pelas elevadas temperaturas e baixos índices pluviométricos, onde se desenvolve atividades sobretudo ligadas a pecuária e produção agrícola nas mais variadas escalas de produção, associando o processo de desenvolvimento a ação antrópica, provocou transformações paisagísticas no domínio do semiárido. Dessa forma, a importância de estudos apoiados no sensoriamento remoto em áreas como o semiárido brasileiro se faz importante, tanto na perspectiva de uma análise temporal para a detecção de problemática e/ou evolução de um

determinado aspecto assim como, para projeções futuras diante do cenário social.

O município de Serrinha, recorte espacial desse estudo, possui médias de temperatura homogêneas (25° a 29°C), drenagens intermitentes sazonais, destacada irregularidade interanual das chuvas (a média anual pode oscilar entre 200 a 800 mm), com período prolongado de estiagem (seis a sete meses) ou com ocasionais episódios de chuvas torrenciais (AB'SABER, 2003). Encontra-se localizada no interior do Estado da Bahia, possui características de clima semiárido e grande parte da sua economia encontra-se pautada na agricultura e pecuária.

A escassez natural da água desperta a necessidade de estudos que estabeleçam de forma clara a relação com as atividades humanas, para que a dependência em relação aos eventos climáticos possa ser minimizada, para tanto, a estimativa da evapotranspiração é extremamente necessária para compreender essas relações, porém é extremamente difícil de ser estimada com confiança, pois existe uma dificuldade de obter dados e técnicas diretas que se apliquem a grandes áreas levando-se ainda em consideração à necessidade de instrumentos de custo elevado para a obtenção de estimativas indiretas. Sendo assim cabe questionarmos como as técnicas de sensoriamento remoto juntamente com dados meteorológicos e métodos teóricos podem contribuir para a estimativa da evapotranspiração potencial em áreas semiárida?

No que se refere à estrutura, este trabalho encontra-se organizado em sete capítulos. O primeiro capítulo trata-se da introdução, no qual são apresentados o tema, os objetivos, justificativa e a estrutura da pesquisa. O segundo capítulo aborda o referencial teórico, ancorado nos conceitos básicos da evapotranspiração, nos métodos de estimativa, nas características do semiárido brasileiro e por fim, na utilização do sensoriamento remoto nos estudos ambientais.

No capítulo subsequente são apresentados os aspectos gerais da área de estudo, como clima, geomorfologia, geologia, a vegetação, hidrografia e solos, explicando como esses aspectos contribuem para a dinâmica paisagística do município. O quarto capítulo apresenta uma discussão sobre os materiais e métodos utilizados no decorrer desse estudo, seguido dos

procedimentos metodológicos. O sexto capítulo refere-se as análises dos resultados obtidos e suas respectivas validações, acompanhada das conclusões que compõem o sétimo e último capítulo da pesquisa.

1.1 Objetivos

OBJETIVO GERAL

Estimar a evapotranspiração potencial do município de Serrinha a partir do algoritmo SAFER juntamente com dados de estação meteorológica local, para o ano de 2013.

OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Discutir as condições climáticas da região semiárida e as potencialidades dos dados climáticos obtidos por sensoriamento remoto para a compreensão de sua dinâmica atual;
- Organizar base de dados com a aquisição de imagens de satélite e dados de estações meteorológicas para a área de estudo;
- Estimar ET, a partir dos métodos Penman-Monteith, Samani-Hargrave e Thornthwaite com dados da estação meteorológica do município de Serrinha;
- Comparar os resultados das estimativas obtidos através da imagem de satélite e dos métodos empíricos.

1.2 Justificativa

A evapotranspiração pode ser estimada por meio de equipamentos, como os lisímetro, por meio do balanço hídrico ou de dados meteorológicos aplicados em equações. Porém, esses métodos podem apresentar lacunas no caso dos bancos de dados meteorológicos quando não captados e são limitados, porque eles estimam valores pontuais de ET para um local específico e não em escala regional. Essa limitação motivou o desenvolvimento dessa pesquisa a partir do uso de dados obtidos por sensoriamento remoto, e podem ser adquiridos diretamente sem a necessidade de quantificação do processo hidrológico. Os dados de ET são relevantes para o monitoramento ambiental, pois esses podem estar associados à perda de água vinculada à degradação da vegetação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos básicos

2.1.1 EVAPORAÇÃO

Para Varejão e Silva (2006), a evaporação constitui-se como processo de transferência de água sob a forma de vapor para a atmosfera, decorrente tanto da evaporação que acontece com o solo úmido sem vegetação e nos oceanos, lagos, rios e em outras superfícies hídricas naturais, como da sublimação que se processa nas superfícies de gelo (geleiras, campos de neve, etc.)

Diferentemente do conceito abordado por Varejão e Silva que não considera a presença da vegetação necessária para a ocorrência da evaporação, Pereira, Sedyama e Villa Nova (2013), define a evaporação como um processo natural, no qual uma substância passa do estado líquido para o gasoso (vapor), a evaporação da água em condições naturais ocorre tanto em condições continua exposta as condições atmosféricas (mar, lago, rio, tanque e etc.), bem como numa superfície úmida da terra composta por solos e plantas. (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013).

Klar (1991), considera a evaporação, como a água evaporada pelo terreno adjacente às plantas, por uma superfície de água ou pela superfície das folhas quando molhadas por chuva ou irrigação for evaporada sem ser usada pela planta.

Para a ocorrência desse processo é necessário uma grande quantidade de energia proveniente da Radiação Solar, que segundo Silva et al. (2008), esta energia necessária para vaporizar a água é chamada de calor latente de vaporização (λ). Se a superfície estiver úmida, haverá passagem de água do estado líquido ao de vapor e a energia consumida será proporcional à taxa de evaporação ou quantidade de água evaporada"(E). (KLAR, 1991)

2.1.2 TRANSPIRAÇÃO

A transpiração pode ser entendida como um processo biofísico, no qual a água é consumida pela planta, esse é um processo natural que faz parte do desenvolvimento da mesma, no qual as raízes absorvem e transportam os nutrientes necessários para o metabolismo vegetal. Sendo esta água

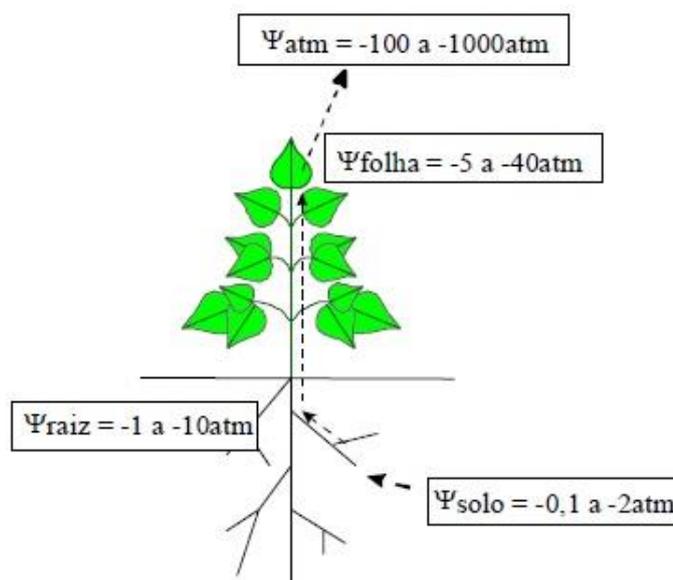
transportada para cima através do caule e liberada pelas folhas através dos estômatos e transpirada. (ALLEN *et al.*, 1998).

Os estômatos atua como regulador fundamental no processo de transpiração, sendo elas estruturas celulares que se localizam na superfície das folhas. Pereira, Sedyama e Villa Nova (2013), apontam que os estômatos são como “portas” de saída da água (transpiração), mas também de entrada do CO₂, utilizado na fotossíntese.

Souza (2013), afirma que os durante o dia estômatos ficam abertos e à noite se fecham, exceto em condições de estresse hídrico, que permanecem fechados. Isso ocorre devido a disponibilidade de água no solo ou quando a transpiração da planta não atende à demanda da atmosfera. Além da mudança de horário, a abertura dos estômatos varia de uma espécie para outra, pois para as plantas adaptadas a clima áridos e semiáridos, este padrão de abertura estomática é invertido permanecendo aberto durante a noite para permitir as trocas gasosas. (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013).

A deficiência hídrica causa a não dissipação de energia, ocasionando assim, um aumento da temperatura e, conseqüentemente, aumento do déficit de saturação.

Figura 1: Representação esquemática do movimento de água no sistema solo-planta-atmosfera em condições ótimas de desenvolvimento.



Fonte: Adaptado de Reichardt (1985).

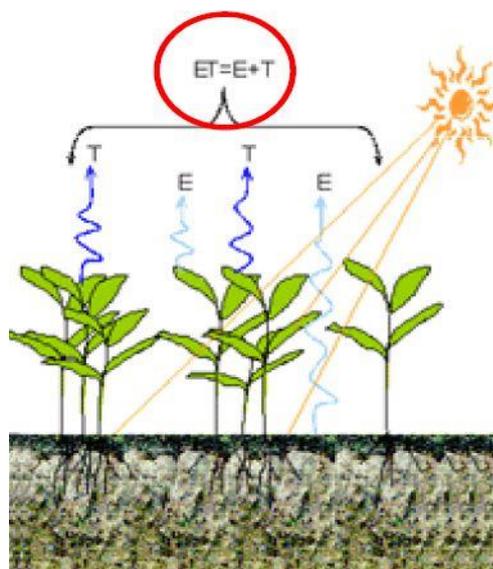
A partir da representação esquemática acima (figura 13), podemos compreender o processo de transferência de água, através da transpiração das plantas. A atmosfera, com seu potencial da água (Ψ_{atm}) altamente negativo, atua como um *dreno* para vapor d'água. Quanto mais seco estiver o ar (baixa umidade relativa), maior (mais negativa) será a força desse dreno. (ANGELOCCI; CAMARGO; SENTELHAS, 2007).

2.1.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração (ET) é um fenômeno natural, proposto por Thornthwaite (1944) no qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera no estado de vapor a partir da evaporação superfície do solo, e dos tecidos das plantas através da transpiração (figura 14), sendo um componente vital do ciclo da água, que inclui precipitação, escoamento, vazão de água do solo, armazenamento e ET (MU *et al.*, 2007).

Esta é de fundamental importância para previsão e estudo do clima, pois o mesmo se caracteriza como componente principal do balanço hídrico e está fortemente relacionado à quantidade de vapor d'água no ar, sendo capaz de alterar a quantidade de chuva em determinadas áreas.

Figura 2: Representação esquemática do processo de Evapotranspiração.



Fonte: <https://irrigacao.blogspot.com.br>

Dependendo de algumas circunstâncias como condições da vegetação, do tamanho da área vegetada, e do suprimento de água pelo solo, a evapotranspiração está associada a termos como: *potencial, real, de oásis, e de cultura*.

A ET potencial (ETP) definida por Penman (1948) é dada pelo processo, no qual, a água é transferida para a atmosfera por na unidade de tempo, por uma superfície totalmente coberta por vegetação. A ETP é limitada apenas pelo balanço vertical de energia, ou seja, pelas condições do ambiente local, podendo ser estimada por fórmulas teórico-empíricas desenvolvidas e testadas para várias condições climáticas. (ANGELOCCI; CAMARGO; SENTELHAS, 2007).

Para VAREJÃO-SILVA (2006) a evapotranspiração potencial como um caso-limite de transferência de vapor d'água para a atmosfera, estando o solo plenamente abastecido de água e revestido por uma vegetação rasteira em plena atividade vegetativa.

A evapotranspiração real é definida por TUCCI (2007, *apud* GANGOPADHYAYA *et al*, 1968), como a quantidade de água transferida para a atmosfera por evapotranspiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. Angelocci et al. (2007), indica que quando não há restrição hídrica, $ETR = ETP$; portanto:

$$ETR \leq ETP$$

Nesse ponto, é importante enfatizar que, por definição, os conceitos de ETP e ETR se aplicam exclusivamente a uma superfície gramada. Isso significa que não faz sentido referir-se à evapotranspiração potencial de uma cultura.

Segundo Pereira *et al.*, (2002), a ET de Oásis (ETO) pode ser definida pela quantidade de água que é utilizada por uma pequena área vegetada (irrigada) vizinha de uma grande área seca, que provém energia por advecção (transporte de calor através do deslocamento de massa). Logo, por definição,

$$ETO > ETP$$

Um outro qualificativo associado a evapotranspiração é a ET_c – Evapotranspiração de cultura, na qual a quantidade de água utilizada por uma

cultura, em qualquer fase de seu desenvolvimento, desde o plantio/semeadura até a colheita, quando não houver restrição hídrica, e por este motivo ela é também chamada *evapotranspiração máxima de cultura*. (ANGELOCCI; CAMARGO; SENTELHAS, 2007). A ET_c pode ser obtida a partir da ETP pela relação, em que K_c é o *coeficiente de cultura*.

$$ET_c = K_c ETP$$

2.2 Métodos de Estimativa da Evapotranspiração

2.2.1 ASPECTOS RELEVANTES

Atualmente existem diversos métodos para a estimativa da evapotranspiração potencial na literatura, construídos, na sua grande maioria, a partir de conceitos empíricos (PEREIRA *et al*, 2002). Alguns dos métodos de estimativa são: o método de Thornthwaite, Simplificação de Camargo, de Camargo, do Tanque Classe A e de Penman-Monteith.

A utilização de cada um desses métodos tende a variar, pois está diretamente ligado, à disponibilidade de dados meteorológicos e semelhança das condições ambientais e físicas do local onde foi desenvolvido o método escolhido com a área de estudo a ser investigada, conforme recomenda PEREIRA *et al* (2002). Sendo assim, é necessário selecionar um método que seja adequado as condições físicas e climáticas da área de estudo lócus da pesquisa, se atentando para as variáveis requeridas para cada método, uma vez que existem métodos mais simples e outros que exigem uma ampla quantidade de elementos a serem considerados nos cálculos de estimativa.

2.2.2 MÉTODO PENMAN-MONTEITH (PM)

O método Penman-Monteith é considerado pela FAO como o método padrão para o cálculo da estimativa de ET, a partir de dados meteorológicos. Conforme Georgen (2010), a equação de PM utiliza dados termodinâmicos, aerodinâmicos, resistência ao fluxo de calor sensível e vapor d'água no ar (r_a),

e resistência da superfície (planta) à passagem de vapor d'água (r_s). A equação combinada de Penman-Monteith para a estimativa da ET é:

$$ET = 86,4 \cdot \left(\frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right) \frac{1}{\lambda \rho_w} \left[\frac{mm}{dia} \right] \quad (1)$$

Em que:

Δ representa a inclinação da curva de pressão de vapor [$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$]; R_n é o saldo de radiação diário [$W \cdot m^{-2}$]; G é o fluxo de calor no solo [$W \cdot m^{-2}$]; ρ_a é a densidade média do ar a pressão constante [$1,2 \text{ kg} \cdot m^{-3}$]; c_p é o calor específico do ar a pressão constante [$1.013 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$]; e_s é a pressão de vapor de saturação [kPa]; e_a descreve a pressão atual de vapor [kPa]; γ é a constante Psicométrica [$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$]; r_s é a resistência superficial [$s \cdot m^{-1}$]; r_a é a resistência aerodinâmica [$s \cdot m^{-1}$]; λ calor latente de vaporização [$MJ \cdot \text{kg}^{-1}$]; ρ_w massa específica da água [$1000 \text{ kg} \cdot m^{-3}$]. O valor 86,4 é um fator de conversão de $W \cdot m^{-2}$ para $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ (0,0864) e de metros para milímetros (10^3).

2.2.3 MÉTODO DE THORNTHWAITE

A equação de Warren Thornthwaite (1948) é uma das mais antigas expressões de estimativa da evapotranspiração potencial. Constitui-se em um modelo mais simples, se comparado com o de Penman-Montheith, o mesmo é baseado em dados de temperatura média do ar e do foto-período (comprimento do dia) de áreas secas dos Estados Unidos.

Para a evapotranspiração potencial de cada mês o modelo escreve-se com a seguinte notação matemática

$$ET_p = F_c \times (ET_p)_{NA} \quad (2)$$

em que:

ET_p = evapotranspiração potencial acumulada, em mm/mês;

(ETp)_{NA} = evapotranspiração potencial não ajustada, em mm/mês, estimada para um mês-padrão de 30 dias e com duração do período diurno de 12 horas;
Fc = fator de correção, que leva em consideração o comprimento médio do dia e o número de dias do mês em questão.

2.2.4 MÉTODO DE HARGREAVES & SAMANI

Este método foi desenvolvido por Hargreaves & Samani (1985) para as condições semiáridas da Califórnia (Davis) a partir de evapotranspiração obtida em lisímetro de pesagem cultivado com grama.

Onde:

$$ETP = 0,0023 Q_0 (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T_{med} + 17,8) \quad (3)$$

Em que:

Q₀: é a irradiância solar extraterrestre, expressa em mm de evaporação equivalente;

T_{max}: a temperatura máxima do ar (oC);

T_{min}: a temperatura mínima do ar (oC); e

T_{med}: a temperatura média do ar (oC), no período considerado. Esse método é semelhante ao proposto por Camargo (1971).

2.3 Características do Semiárido Brasileiro

2.3.1 ASPECTOS RELEVANTES

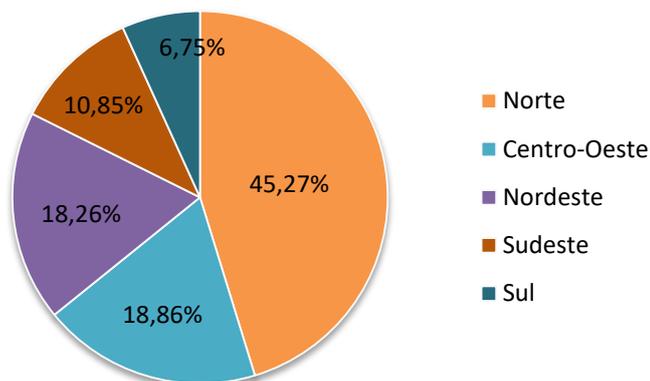
A Região Nordeste do Brasil é composto por uma grande área de clima semiárido, na qual há o predomínio de elevadas temperaturas e de baixos índices pluviométricos com uma distribuição desigual das chuvas (TORRES; MACHADO, 2011). Esta zona semiárida, que inclusive extrapola o limite da Região Nordeste, possui uma localização azonal pois o mesmo não se encontra tão próximo da linha do equador, quanto as demais áreas semiáridas do globo, o que a tornou alvo de grandes debates. Procurou-se realizar uma

caracterização do semiárido nordestino no que diz respeito a sua dinâmica climática e base econômica, pautando-se principalmente na agricultura.

2.3.2 ESPECIFICIDADES DO SEMIÁRIDO

O estado da Bahia está situado na região Nordeste do Brasil, a qual se constitui como uma das maiores regiões brasileira em termos de extensão territorial (Figura 15), ocupando aproximadamente 1.561.177,8 Km², o que corresponde a 18,26% da área total do país (IBGE, 1999).

Figura 3: Proporção territorial das regiões brasileiras



Fonte: Elaborado pelo autor, com base nos dados do IBGE (1999).

Nesta terceira maior região do Brasil, segundo Torres e Machado (2011), estão inseridos aproximadamente 1.000.000 Km² de área semiárida, que se caracteriza, principalmente, pelas elevadas temperaturas, com médias anuais de 27° a 29°; pela variabilidade pluviométrica, variando de 400 a 800 mm por ano; e estação seca prolongada, chegando a 11 meses em algumas áreas.

O Nordeste brasileiro é uma das áreas mais susceptíveis as mudanças climáticas do mundo, isso porque existe uma combinação de alta variabilidade espacial e temporal da precipitação, falta de irrigação, degradação da terra devido ao manejo inadequado do solo (Vieira et al., 2015) e a pobreza em grande escala nas áreas rurais.

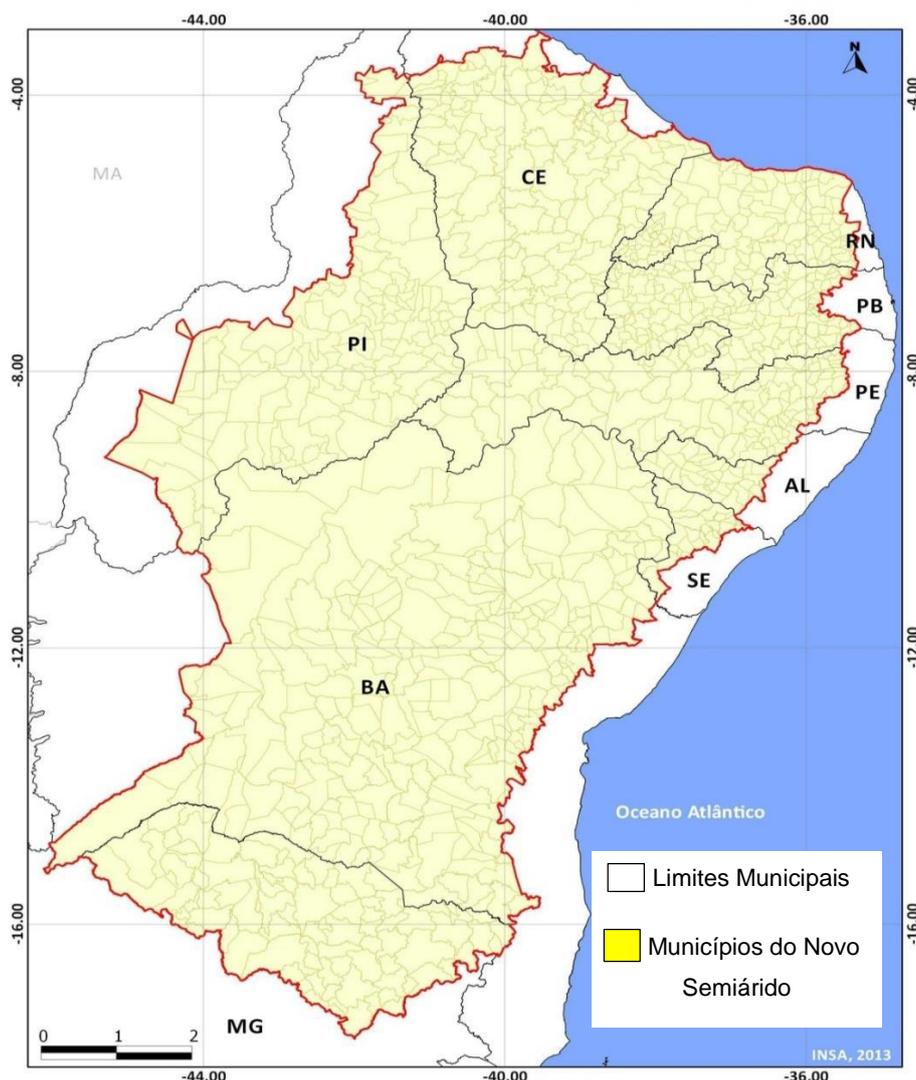
Torres e Machado (2011) afirmam que alguns dos fatores associados a esse tipo climático são os deslocamentos no inverno, das áreas de alta pressão, as quais atuam como dispersoras de vento para essa região, o que dificulta a chegada de umidade. Sobre este aspecto, Ab'Saber (2003) ressalta a grande influência das massas de ar equatoriais marítimas e tropicais atlânticas. Essas massas de ar possuem características quente e seca e, ao se expandirem, permanecem por um grande período no interior do Nordeste, originando uma célula de alta pressão, o que acaba por impedir a penetração da massa ar equatorial continental.

Outros fatores citados por Torres e Machado (2011) são os subafloramentos de rochas impermeáveis, impedindo a acumulação de água no solo e, conseqüentemente, a alimentação do sistema hídrico da região e a disposição do relevo, que bloqueia os ventos úmidos vindos do oceano. Compreendendo o Nordeste brasileiro como uma das áreas mais quentes do globo, Ab'Saber (1974) chama a atenção para a existência dessa área semiárida em um país que é predominantemente dominado por climas úmidos e subúmidos intertropicais e subtropicais, observando que são muito complexas as razões para a sua localização azonal.

A conjunção de tais fatores resulta em paisagens compostas, predominantemente, por estepes semiáridas ou caatinga, solos pouco desenvolvidos, rasos e pedregosos, pobres em matéria orgânica. Souza Filho (2003) relata que as características climáticas do semiárido brasileiro mostram-se presentes no quadro natural da vegetação (caatinga), pelo escoamento hidrográfico intermitente e pelos solos pedregosos. No entanto, não é correto afirmar que essas características se estendem por toda região semiárida, pois o seu domínio não é homogêneo e se diversifica espacialmente.

Para Prado Júnior (2004), as condições naturais, entre elas as condições climáticas do interior do Brasil, no que diz respeito a região Nordeste, na área que corresponde ao semiárido (figura 4), dificultaram o acesso e expansão dos colonos europeus. No entanto diante da necessidade de se produzir para a manutenção interna, tornou-se necessária a expansão mesmo que de forma dispersa.

Figura 4: Limite atual da região semiárida brasileira



Fonte¹: Mapa do Semiárido Brasileiro do Instituto Nacional do Semiárido.

Dessa forma, a ocupação da região semiárida, que ocorreu tardiamente, no século XVII, principalmente devido à escassez hídrica natural, encontra-se vinculada primariamente à criação de gado (CIRILO et al., 2013). O que se reflete até os dias atuais, pois sua economia ainda baseia-se na prática da pecuária de caráter extensivo, alinhada à agricultura (BUAINAIN; GARCIA, 2013).

Marengo e Alves (2011), afirmam que a variabilidade climática do semiárido nordestino, principalmente por conta das secas, é sempre considerada como um problema para as populações rurais do interior da região

¹Disponível em: < <http://www.insa.gov.br/wp-content/uploads/2013/07/mapa-%C3%A1rea-semi%C3%A1rido.pdf>>. Acesso em: 20 abr 2016.

e objeto de preocupação da sociedade e do governo ao longo dos anos. Isso porque a grande parte da população rural que habita o interior do Nordeste tem a sua sobrevivência baseada na agricultura familiar.

Sendo assim, o clima se constitui como uma das características mais importante da região Semiárida, principalmente no que diz respeito a ocorrência de secas estacionais e periódicas, que trazem fortes implicações na produção agrícola. Em consequência do comportamento das chuvas no Semiárido e da reduzida capacidade de retenção de água na maioria dos solos (JACOMINE, 1996), grande parte da população é altamente dependente da água de chuva, de sua captação e de seu armazenamento, uma vez que os rios apresentam regime temporário (MOURA et al., 2011, p. 39).

2.3.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ÁREAS SEMIÁRIDAS

Segundo Allen et al. (1998), a evapotranspiração é variável no espaço e no tempo: variável no espaço devido à grande variabilidade espacial da precipitação, características físico-hídricas do solo e ao tipo e densidade da vegetação; e variável no tempo, em razão da variabilidade do clima.

No Nordeste do Brasil, a seca se caracteriza como um fenômeno frequente com grande intensidade e diversos efeitos no espaço e no tempo. A situação geográfica do território brasileiro é favorável à ocorrência de episódios de seca pelo que este fenômeno não constitui propriamente uma surpresa, devendo antes ser encarado como um elemento climático de determinada frequência no sentido de que já ocorreu no passado e ocorrerá no futuro (MENESES et al., 2006).

Diferenças nas configurações oceânicas e atmosféricas estão associadas a cada um dos eventos. Grande parte dos eventos de seca na região estão relacionados à ocorrência do El Niño, porém alguns estudos demonstram que, eventos severos de seca também podem ser o resultado de uma mudança para o norte da ZCIT que tem sua migração para o norte associada à ocorrência simultânea de anomalias de TSM quentes no Atlântico tropical norte e anomalias de TSM frias nos oceanos tropicais do sul (Hastenrath e Heller, 1977 ; Hounsou-Gbo et al., 2016).

A região semiárida brasileira possui como vegetação predominante a Caatinga, com uma extensão territorial de aproximadamente 800.000 km², compreendendo cerca de 80% do Nordeste brasileiro e 11% do território nacional (Santos et al., 2012). O clima local é sazonal, com meses chuvosos, de janeiro a abril, e longo período sem chuvas, de maio a dezembro (Moura et al., 2007). Nos meses secos, a demanda evaporativa da atmosfera torna-se substancialmente elevada e provoca estresse hídrico nas espécies vegetais, o que pode ser potencialmente agravado pelas mudanças nos padrões atmosféricos de larga escala. Essas mudanças foram observadas em 2012 com a ocorrência do fenômeno do Dipolo do Atlântico, que culminou em alterações no regime pluvial da região e, conseqüentemente, na intensidade da seca (Centro, 2014; Gutiérrez et al., 2014).

A vegetação semiárida normalmente é resistente a déficits hídricos, a atividade da vegetação na região semiárida do Nordeste do Brasil (NEB) é altamente controlada pelas variações interanuais na disponibilidade de água e a diminuição da disponibilidade de água pode desencadear a degradação e desertificação. Condições de secas recorrentes em regiões semiáridas, como o NEB, podem produzir uma perda progressiva de resiliência que afeta negativamente as populações vulneráveis que vivem da agricultura de pequena escala. (MARENGO *et al.* 2019)

No semiárido nordestino predominam os solos rasos, que tendem a se saturar na chuva e ressecar facilmente nos períodos de estiagem, clima tropical quente, elevados índices de evapotranspiração durante todo o ano e grandes variações pluviométricas, fazem com que a maior parte da energia disponível seja utilizada no aquecimento do ar e do solo, em razão da baixa disponibilidade hídrica (Chen et al., 2009; Teixeira et al., 2008; Oliveira et al., 2006).

2.4 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto definido por ser uma ciência, como o meio pelo qual se obtém dados de objetos e fenômenos sem contato direto com os mesmos, através da utilização de sensores (NOVO, 1992). Com o advento da

fotografia aérea nos estudos da paisagem terrestre, foi promovido o desenvolvimento e aprimoramento das novas tecnologias e dos métodos de estudos do sensoriamento remoto, ganhou destaque devido a sua aplicabilidade na análise ambiental, uma vez que possibilita a construção de dados e informações de alta qualidade. (COLWELL, 1983; FLORENZANO, 2002; JENSEN, 2009).

Dentre os principais objetivos do Sensoriamento Remoto está a aquisição de informações sobre a superfície da terra para mapeamento e avaliação de recursos terrestres e monitoramento ambiental (IBGE, 2000). Os objetos presentes na superfície, seja eles naturais ou artificiais que possuem temperatura superior a zero (0° K) são capazes de absorver, refletir, emitir e transmitir a radiação eletromagnética – REM, tendo como principal fonte a energia solar.

O aumento e avanço de satélites que dispõem de imagens da superfície da Terra possibilitaram a realização de estudos envolvendo análise temporal em diferentes escalas, podendo ser aplicado na monitorização e gestão de recursos naturais, na dinâmica de cobertura do solo, expansão urbana, avaliação de riscos, como queimadas florestais, deslizamentos de encostas, entre outros (BRUZZONE, *et al.*, 2003). Assim como, estudos permitindo análises de temperatura a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto, dessa forma a obtenção de dados na faixa do infravermelho termal trouxe a perspectiva de acrescentar possibilidades a estudos relativos ao monitoramento ambiental.

2.4.1 SENSORIAMENTO TERMAL – SAFER

A utilização do Sensoriamento remoto para os estudos climáticos vem se demonstrando como um grande potencial podendo ser utilizado não só em larga escala espacial como temporal, podendo assim, verificar as alterações meso-climáticas causadas pela mudança do uso da terra ao longo dos anos. (Compaoré *et al.*, 2008). Para pesquisas voltadas à Evapotranspiração esse é um método muito considerado nos últimos anos, que está sendo amplamente divulgado no meio acadêmico por conta da facilidade demonstrada em relação aos outros métodos direto de medição e à dificuldade de espacialização dos

resultados obtidos pelos métodos clássicos indiretos, pelo baixo custo da sua manipulação e por representarem valores pontuais de localização específica (Bezerra et al., 2008; Giacomoni & Mendes, 2008).

A aplicação de imagens do Sensoriamento Remoto (SR), juntamente com as informações de superfície em sido indispensáveis na aplicação de modelos e algoritmos destinados a estimativa dos componentes do balanço de energia à superfície e da ET em várias escalas de tempo e espaço (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013).

Vários são os estudos que se utilizam de processamento de imagens na com destaque para a faixa do infravermelho termal para estimar a temperatura de superfície terrestre e assim, compreender a relação das diferentes paisagens e coberturas urbanas com a radiação e estudos de cunho climático.

Baptista (2012) afirma que para compreendermos melhor as informações contidas nas imagens do espectro termal de emissão, alguns conceitos são importantes nesse processo, que são:

- a) *Energia*, que é definida como a capacidade de realizar qualquer tipo de trabalho, e uma dessas formas de energia é a energia cinética, que pode ser entendida como a quantidade de energia de movimento. Esse conceito é fundamental para diferenciarmos temperatura, de calor.
- b) *Temperatura*, é a medição do grau de movimento ou de agitação dos átomos e das moléculas de um corpo, conhecida também como temperatura cinética ou temperatura verdadeira.
- c) *Calor* é entendido como o fluxo de energia entre dois corpos de temperaturas diferentes. Portanto, temperatura é diferente de calor.

Além dos conceitos apresentados acima, outros também se tornam indispensáveis para a o desenvolvimento da compreensão à cerca da ET, dentre eles estão o de calor sensível e calor latente. Klar (1991) explica que a energia que chega à superfície terrestre é transformada. Se a superfície estiver úmida, haverá passagem de água do estado líquido ao de vapor e a energia consumida será proporcional à taxa de evaporação ou quantidade de água evaporada é denominado *latente de vaporização*. Mas se a superfície estiver mais quente que o ar atmosférico acima, haverá aquecimento da massa de ar que a envolve e a energia será removida da superfície pelo movimento desse ar quente fora da aludida, sendo o ar frio ali repostado. (KLAR, 1991, p. 97)

A radiação termal que compreende a faixa espectral de 8,0 a 14 μm é usada nas aplicações de sensoriamento remoto terrestre, porém as análises pautadas no processamento das imagens termais, perpassam pela compreensão de algumas leis que elucidam acerca do comportamento da radiação termal nos objetos terrestre, a lei do corpo negro se caracteriza como uma dessas, a qual foi desenvolvida por Kirchoff e designa o corpo que transforma em calor toda a radiação que sobre ele incide.

Baptista (2012) esclarece que Kirchoff nos seus experimentos observou que na porção do infravermelho do espectro a emissividade espectral de um objeto geralmente é igual a sua absorptância espectral, por isso podemos dizer que bons absorvedores são bons emissores. Se analisarmos as imagens dos objetos de coloração mais escura, ou seja, de baixa reflectância, deduzimos que eles são mais absorvedores e no termal notaremos que eles são mais emissores, ou seja, apresentam maior emissividade que alvos que apresentem coloração clara, com maior reflectância. (BAPTISTA, 2012, p.52).

As estimativas de Evapotranspiração obtidas a partir de imagens de sensoriamento remoto, utilizam alguns algoritmos aliados a modelos físicos com destaque para o SEBS - Surface Energy Balance System (Su, 2002), SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (Bastiaanssen et al., 1998), METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) (Allen et al., 2007) e SAFER (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) (TEIXEIRA et al., 2013).

Dessa forma, optou-se para a realização deste trabalho a utilização do Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving – SAFER, esse modelo foi desenvolvido por Teixeira (2010). Sendo este considerado um modelo de fácil aplicação, baseado na modelagem da razão ET/ET_0 , o mesmo já foi validado por meio de dados provenientes de quatro experimentos de campo envolvendo culturas irrigadas e vegetação natural nas condições semiáridas brasileiras (TEIXEIRA, 2012).

Dentre os estudos realizados com o SAFER, podemos destacar o trabalho de Texeira (2013), no qual o mesmo realiza uma análise comparativa entre os modelos SEBAL e SAFER baseados no método da FAO, nas áreas de Petrolina (PE), Juazeiro (BA) e Noroeste de São Paulo (Fazenda comercial Bonança), sendo que o SAFER apresentou melhor desempenho nas diferentes

áreas de análise, porém como o mesmo foi projetado para ambientes de característica semiárido, ao aplicar o modelo em outros ecossistemas torna-se necessário ajustes no coeficiente da equação. (TEXEIRA, 2013).

Outra pesquisa realizada recentemente foi a de Silva (2018), que teve por objetivo estimar o albedo de superfície, o NDVI, o saldo de radiação, a temperatura de superfície e a evapotranspiração real da soja no nordeste do estado de São Paulo, aplicando o algoritmo “Simple Algoritmo Model For Evapotranspiration Retrieving”- SAFER comparado com o método FAO 56, fazendo uso de técnicas de sensoriamento remoto e das variáveis climáticas obtidas em estação agrometeorológica. A pesquisadora concluiu que o algoritmo SAFER aplicado no Landsat 8 estimou com alto nível de confiança as variáveis evapotranspiração real, obtendo-se resultados apropriados para a cultura da soja. (SILVA, 2018).

Dentre outros algoritmos o SAFER apresenta como um aspecto positivo a possibilidade de aplicação com dados meteorológicos provenientes de diferentes tipos de estações agrometeorológicas, convencionais e automáticas, sendo uma característica importante por possibilitar a avaliação das tendências históricas dos componentes do balanço de energia. O SAFER é baseado na equação de Penman-Monteith e utiliza albedo, NDVI e temperatura da superfície, com a evapotranspiração como parâmetro. (TEIXEIRA et al., 2012)

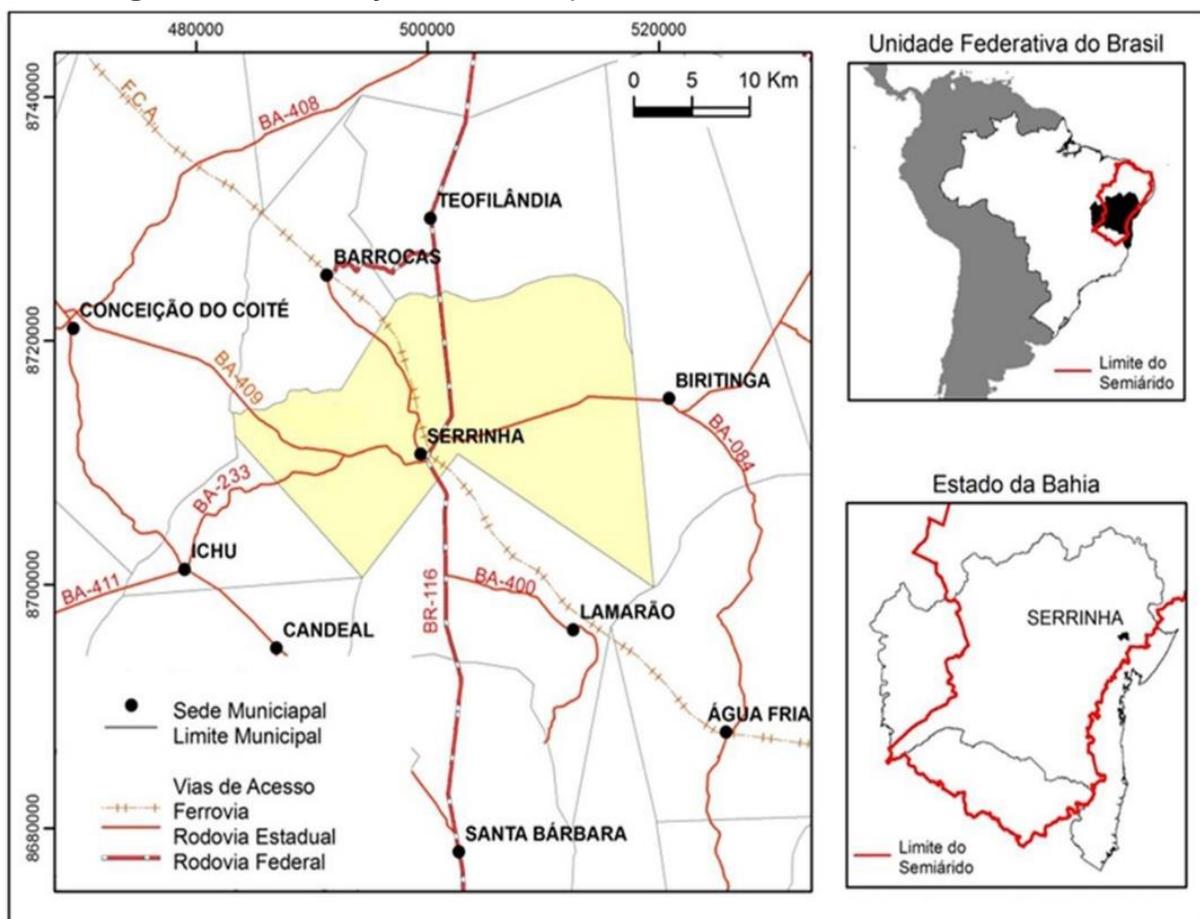
3 ÁREA DE ESTUDO

Serrinha (figura 5) está localizado entre as coordenadas aproximadas de latitude $-11^{\circ}39'51''$ Sul e longitude $39^{\circ}00'27''$ Oeste, a uma altitude média de 379 m acima do nível do mar e caracteriza-se pelo clima semiárido. Faz divisa com os municípios de Teofilândia, Biritinga, Lamarão, Santa Bárbara, Tanquinho, Candeal, Ichu, Conceição do Coité e Barrocas. Com uma área total de 613,7 km², Serrinha fica distante 180 Km de Salvador, capital do Estado da Bahia. (SEI, 2016).

Localizado no Território de Identidade Sisal, o município de Serrinha foi criado pela Resolução Provincial nº 1.609 de 13/06/1876. Além de Serrinha,

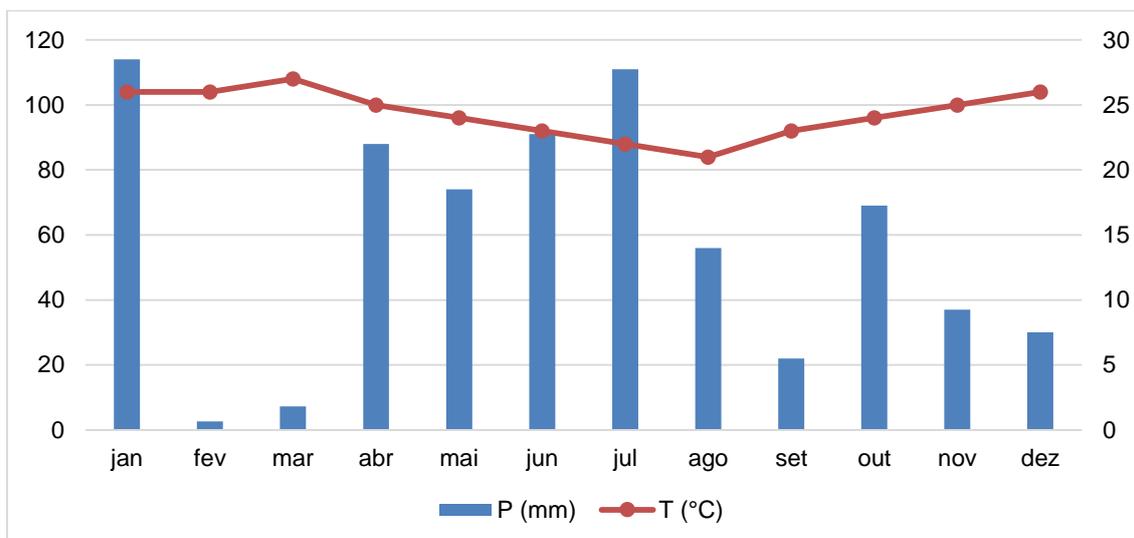
Araci, Barrocas, Biritinga, Candéal, Cansanção, Conceição do Coité, Ichu, Itiúba, Lamarão, Monte Santo, Nordestina, Queimadas, Quijingue, Retirolândia, Santaluz, São Domingos, Teofilândia, Tucano e Valente, são os municípios que compõem o Território de Identidade Sisal.

Figura 5 - Localização do município de Serrinha, Estado da Bahia



3.1 Clima

A área do município (figura 6) está incluída no denominado “Polígono das Secas”, com clima semi-árido, seco a subúmido e experimentando longos períodos de estiagem ou escassez de chuvas, possui médias de temperatura homogêneas (25° a 29°C), drenagens intermitentes sazonais, destacada irregularidade interanual das chuvas (a média anual pode oscilar entre 200 a 800 mm), com período prolongado de estiagem (seis a sete meses) ou com ocasionais episódios de chuvas torrenciais (AB’SABER, 2003).

Figura 6: Climograma de Serrinha/BA, para o ano de 2013

Fonte: Base de dados do BDMEP – INMET. Elaborado pelo autor.

A partir do Climograma acima, podemos observar que o ano de 2013 apresentou baixos índices pluviométricos, com exceção dos meses de janeiro, abril, junho e julho que demonstrou os maiores valores da série entre 114 a 88 mm. Em relação a temperatura os valores sofreram algumas oscilações que se mantiveram entre as médias de 27°C a 21°C.

Serrinha encontra-se localizada no interior do Estado da Bahia, possui características de clima semiárido, a partir do modelo de classificação climática de Köppen, corresponde ao tipo BShw, caracteriza-se por ser um clima seco, possuem evaporação e evapotranspiração anuais superiores aos valores de precipitação, com uma vegetação típica de estepe, com raízes pouco profundas e temperaturas superiores a 18°. (TORRES; MACHADO, 2011).

O município integra um regime de chuvas típico do Nordeste brasileiro com estação chuvosa de verão e outono (Fevereiro e maio). A pluviosidade média é de 850mm com máxima de 1.421 e mínima de 311. As chuvas que ocorrem no município assim como no Estado da Bahia sofre a influência de diferentes sistemas meteorológicos portadores de chuvas, dentre esses destacam-se a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), as ondas de leste e a Frente Polar Atlântica (FPA). (FRANCO, 1996).

Sendo frequente também períodos de seca, que estão relacionadas à interferência do “El Niño”, anomalia que causa o aquecimento do Oceano

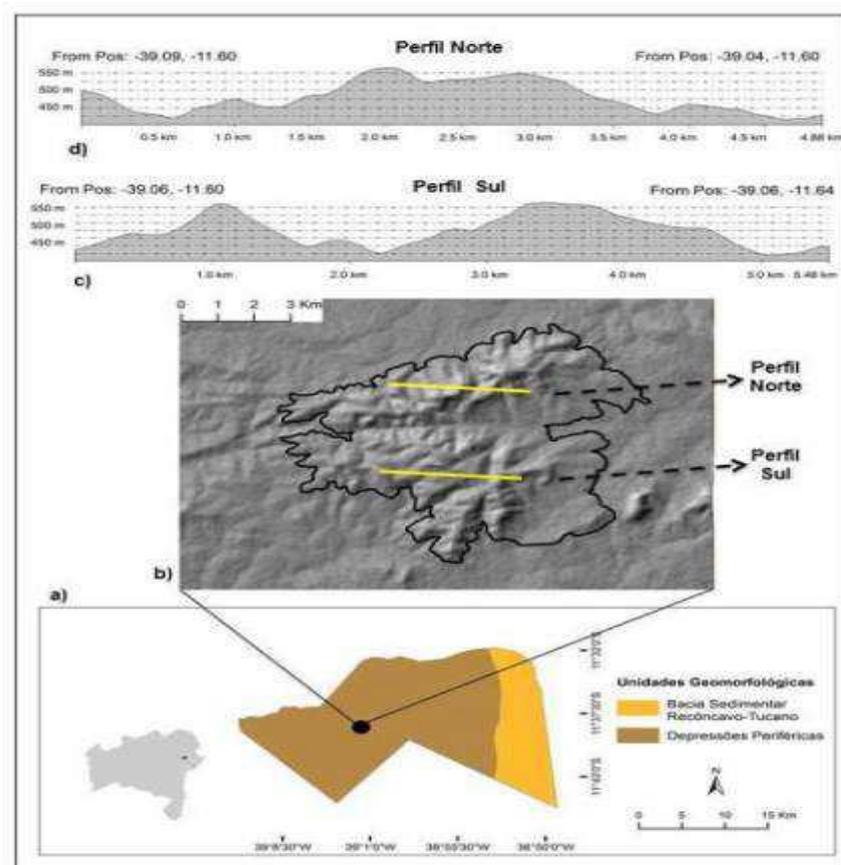
Pacífico Tropical, este fenômeno está associado as alterações no padrão da temperatura da superfície do mar (TSM). O mesmo é resultado das alterações no comportamento normal da chamada célula de Walker, que provoca modificações climáticas em escala regional e global, alterando o regime pluviométrico em todo o continente.

3.2 Geomorfologia

O município está imerso no domínio morfoclimático da caatinga, possuindo duas unidades Geomorfológicas em sua área sendo estas a Depressão Periférica e a Bacia Sedimentar do Recôncavo- Tucano, com um predomínio de relevo tipicamente pediplano sertanejo.

A na porção oeste do município de Serrinha localiza-se a Serra da Barra do Vento (figura 7) possui uma área de aproximadamente 51,6 Km² relevo específico de Depressão Periférica. Em análise dos perfis topográficos transversais Lopes, Pinheiro e Leite (2014) observaram que a SBV tem altimetria variando de 250 metros em sua base a 570 metros em áreas de topo. O perfil Sul da SBV caracteriza-se por uma maior dissecação relativa do relevo, visto que neste primeiro perfil visualiza-se um menor grau de entalhamento em relação ao anterior. Já no Perfil Norte da SBV as encostas apresentam declividades acentuadas e tipologia variando entre convexa a retilínea com modelados predominantemente convexas. No entanto, em ambas as situações por tratar-se de ambiente semiárido.

Figura 7: Mapa de localização e aspectos Geomorfológicos



Fonte: Lopes Pinto, B.; Pinheiro de Almeida Neto, D.; Leite Oliveira, A.I.

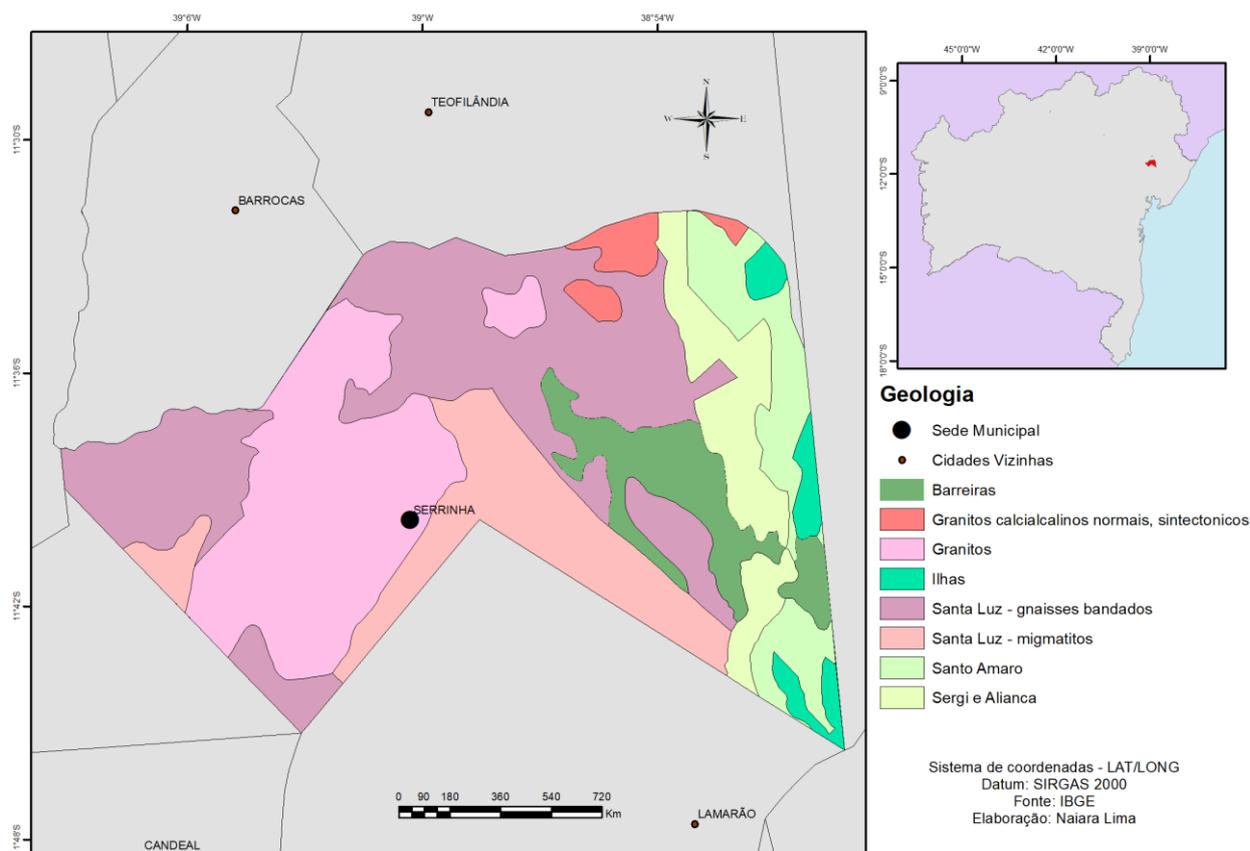
3.3 Geologia

O Município de Serrinha é constituído em sua maior parte por rochas cristalinas pertencentes ao complexo Santa Luz e greenstone belt do Rio Itapicuru que bordejam a bacia sedimentar do Tucano (figura 8), representada pelos litótipos dos grupos Brotas, Santo Amaro e Ilhas. Na porção noroeste do município ocorre o domo de Teofilândia constituído por granodiorito e tonalito, em parte gnaissificados, calcialcalinos normais, metaluminosos e unidades vulcânica félsica e máfica caracterizadas respectivamente por rocha efusiva e piroclástica, metandesíticas, metadacíticas e metarriodacíticas, calcialcalinas; e metabasalto toleítico, formação ferrífera, metacherte e filito grafitoso. (CPRM,2005).

Na porção oriental do município, estendendo-se de norte a sul ocorrem as rochas sedimentares pertencentes aos grupos Brotas, Santo Amaro e

Ilhas. O grupo Brotas é representado por arenito fino a conglomerático, conglomerado, folhelho e calcilutito sobreposto pelo grupo Santo Amaro, representado por folhelho e siltito, em parte calcíferos, arenito, subarcóseo e carvão, e em menor proporção pelo grupo Ilhas, representado por folhelho e arenito intercalados. A formação Barreiras ocorre em segmentos isolados na porção sudeste do município, sendo constituída por arenito argiloso a conglomerático, argilito puro a arenoso e conglomerado.

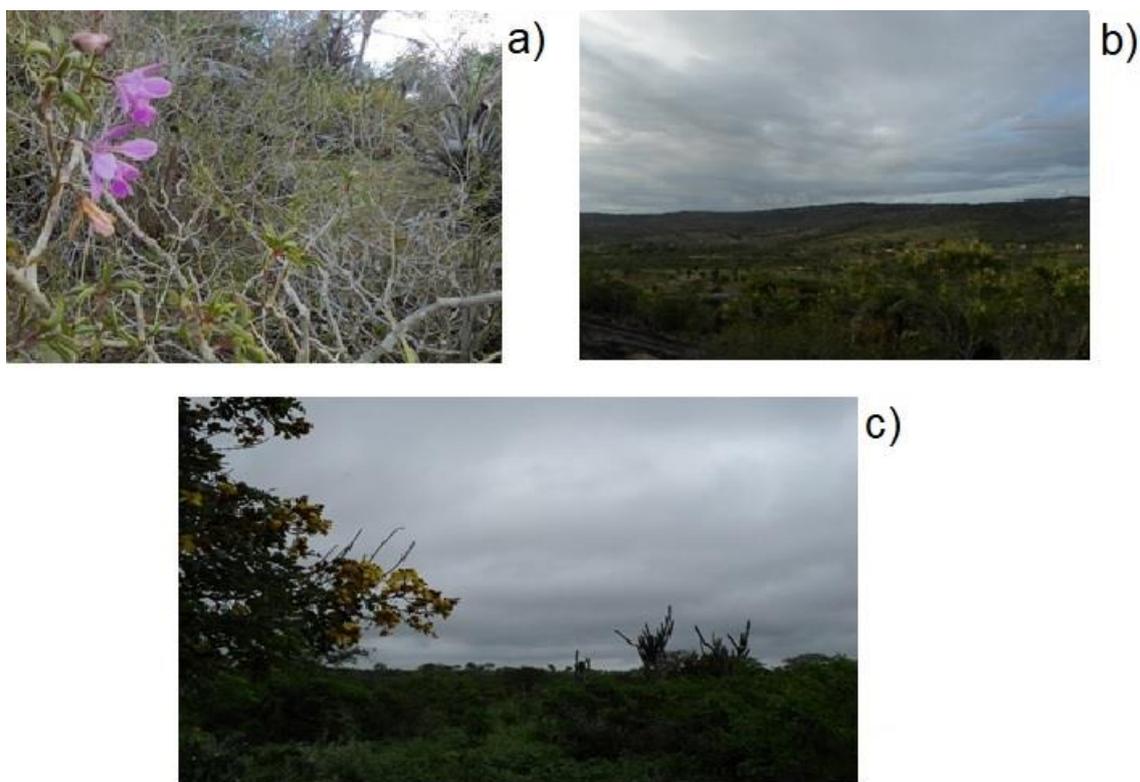
Figura 8: Mapa geológico do município de Serrinha



3.4 vegetação

O município está imerso no domínio morfoclimático da caatinga dos sertões do Nordeste brasileiro, essa cobertura vegetal de estepes (caatinga) é caracterizada como xeromórfica e lenhosas monofoliadas decíduas, que pode distinguir-se em dois subgrupos diferentes, o aberto e o denso (figura 9 a,b,c).

Figura 9: Vegetação de Caatinga, típica do município de Serrinha/BA



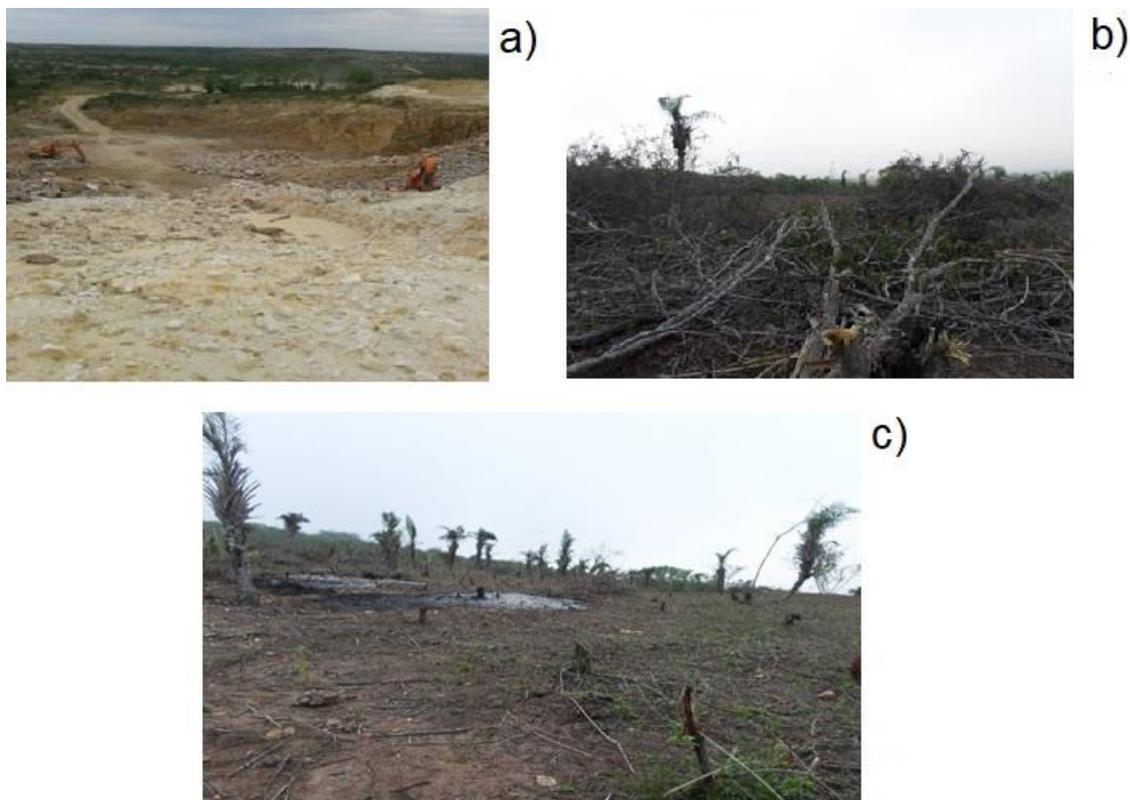
Fonte: Lima, 2013.

Esses dois subgrupos da caatinga encontram-se organizados em três estratos vegetais: arbóreo com árvores de 04 a 06 m, espaçadas entre si, como por exemplo o umbuzeiro, o angico, aroeira, jurema entre outras; o arbustivo que caracteriza-se por árvores com o porte variando de 2 a 4 m, composto por plantas caducifólias e mais desenvolvido que o anterior; e o herbáceo formados predominantemente por, euforbáceas, malváceas e secundariamente gramíneas. As cactáceas de alto porte configuram-se pelo mandacaru e feicheiro enquanto as de pequeno porte encontra-se espécies como a coroa de frade e o xique-xique. (PEREIRA; SOUZA, 1991).

Atualmente a ação antrópica é uma das principais responsáveis pela devastação da caatinga (figura 10 a,b,c), onde espaços de vegetação natural dão espaço para áreas de pastagens que atende a pecuária ou áreas de plantio destinadas a agricultura, ainda é muito comum a extração vegetal para a produção de lenha, que também se constitui como uma atividade

econômica no município, onde não há a preocupação com áreas de reflorestamento para a reposição da cobertura vegetal.

Figura 10: Áreas devastadas por ação antrópica

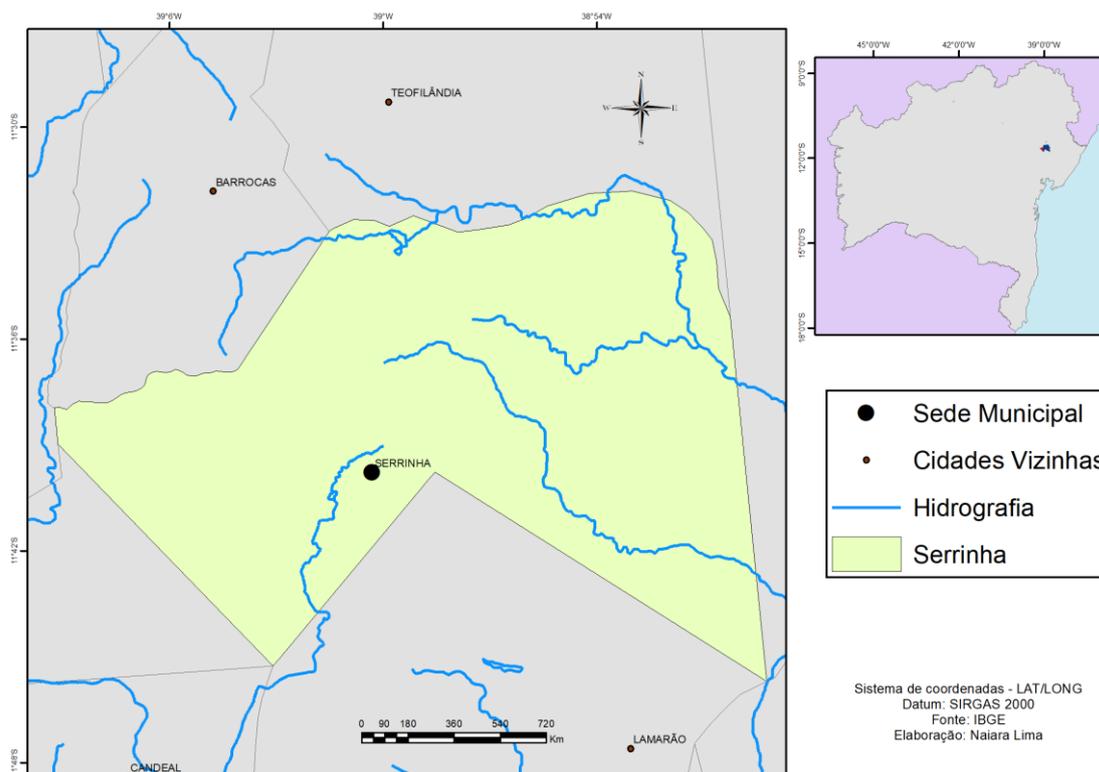


Fonte: Lima, 2014.

3.5 Hidrografia

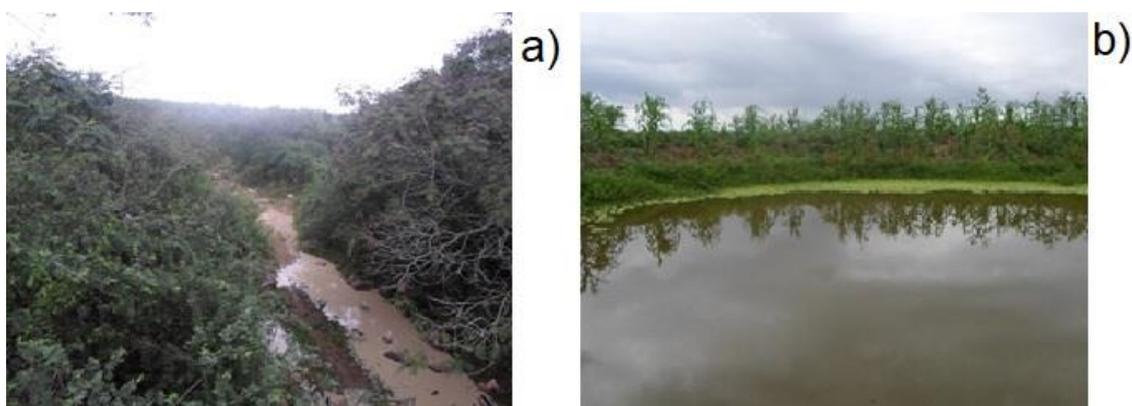
Segundo Pereira e Souza (1991), toda a rede de drenagem da área faz parte da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu e está diretamente ligada ao seu principal afluente, o rio Jacuípe. Porém a porção norte do município de Serrinha, é drenada por riachos que pertencem a bacia hidrográfica do Rio Inhambupe. A sede municipal está inserida exatamente em seu divisor de águas onde a leste as águas fluem para a bacia do rio Inhambupe e a oeste para a bacia do rio Paraguaçu. Os riachos existentes são todos de drenagem intermitente, o Rio Tocós flui de norte a sul e constitui o limite oeste com o município de Conceição do Coité (figura 11).

Figura 11 – Hidrografia do município de Serrinha.



É possível identificar outros cursos d'água na área (figura 12 a, b) como o Tabua, o riacho da Margarida, do Saquinho, Socó, da Ladeira, do Massau, da Bomba e do Gravatá. (FRANCO, 1996).

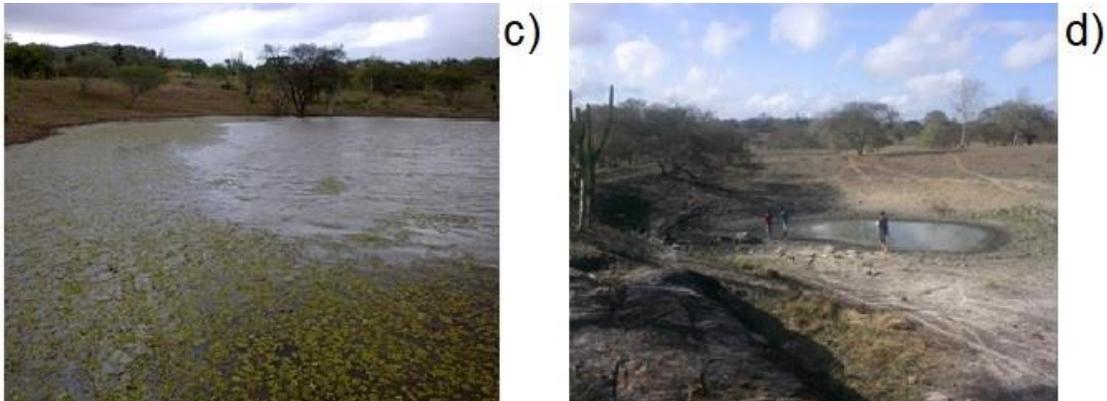
Figura 12: Corpos hídricos presentes no município de Serrinha/BA



Fonte: Lima, 2014.

Além dos rios, os lagos e açudes presentes no município possui um fisionomia típica das regiões semiáridas, nos quais a presença de um grande regime de água só se encontra nos meses chuvosos, e em grande parte do

ano permanece seco. Nas figuras (c, d) abaixo podemos observar um exemplo dessa dinâmica, na qual o açude Carrancudo foi fotografado em dois períodos distintos do mesmo ano.

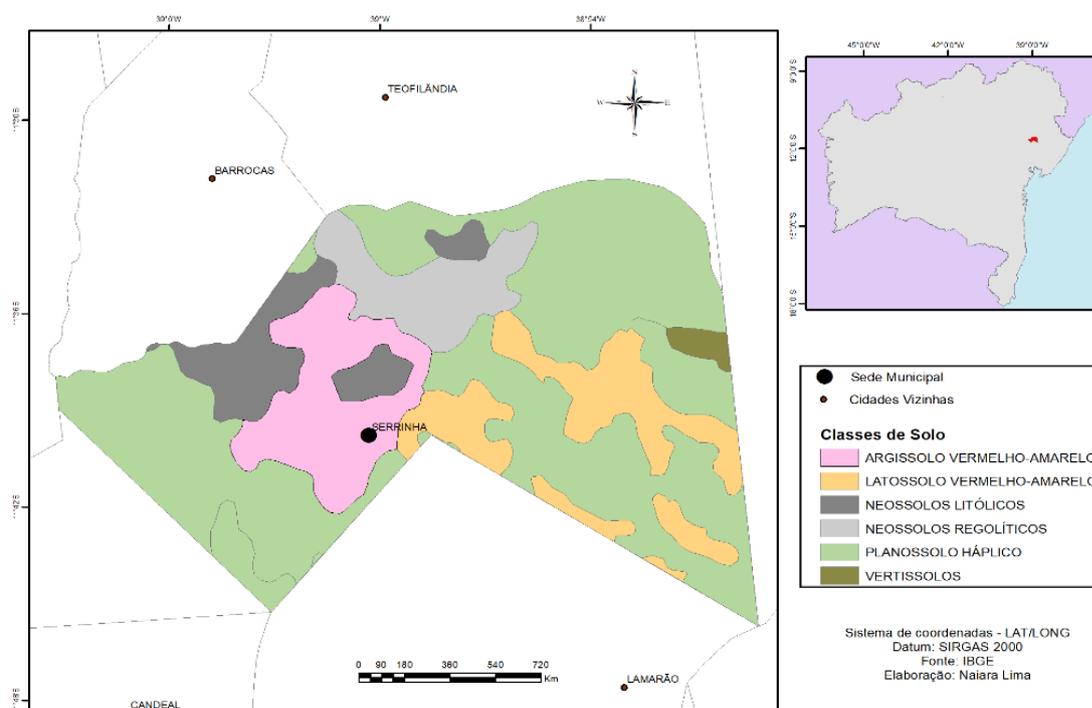


Fonte: Lima, 2013.

3.6 Solos

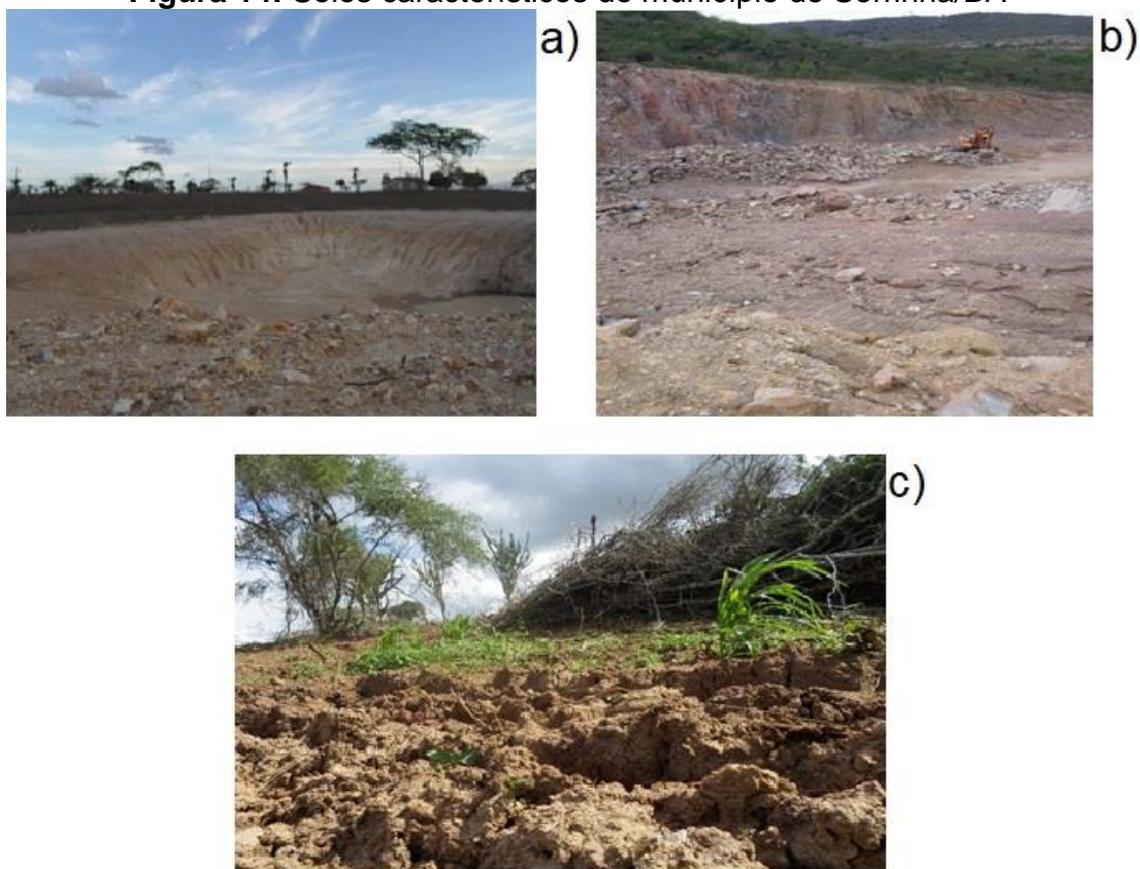
Seus solos foram identificados como argissolo vermelho-amarelo, planossolos háplicos, vertissolos, latossolos vermelho-amarelo, neossolos litólicos e regolíticos (figura 13). Os três últimos de natureza eutrófica.

Figura 13: Mapa de solos de Serrinha



Os solos da área são rasos e pedregosos, com texturas que variam de areia, areia franca e franco arenosa nos interfúvios e argila arenosa em barrancos de rios, sendo as coberturas aluviais constituídas de areias. Esses solos arenosos são resultantes dos processos de desagregação da rocha em função do processo de termoclastia, característico das regiões semi-áridas quentes (HAGGE; ALMEIDA, 2015). Os baixos teores de matéria orgânica dos horizontes superficiais do solo contribuem para sua fraca estrutura e susceptibilidade à erosão (figura 14 a,b,c).

Figura 14: Solos característicos do município de Serrinha/BA



Fonte: Lima, 2014

Os solos do município na sua maioria sofrem com a degradação, pelas as mais diversas atividades antrópicas, desde a agricultura que se caracteriza como uma das principais atividades econômicas do município, bem como a exploração e extração de rochas e criação de pastagens. Nas imagens acima podemos constatar que se trata de um solo rico, porém exposto as intempéries.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Como técnicas de pesquisa, para a obtenção de dados e informações, foi realizada documentação indireta, com levantamento em fontes variadas, tais como, livros, artigos, mapas, banco de dados digitais, dentre outras, por meio de pesquisa documental e bibliográfica.

4.1 Dados Meteorológicos

Através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>) do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), os dados diários obtidos foram na estação (OMM: 83190): temperatura do ar (máxima e mínima diária) (°C), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento (m/s) para o município de Serrinha, esses parâmetros foram utilizados para a estimativa de Evapotranspiração Potencial diária, a partir dos métodos empíricos e matemáticos, bem como para a aplicação do Algoritmo Safer.

4.2 Aquisição das Imagens Landsat 8

As imagens, Landsat 8 OLI e TIRS foram adquiridos no portal *Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov>), a partir do catálogo de imagens do satélite disponibilizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos da América, USGS (*United States Geological Survey*), sendo escolhidas aquelas imagens para o período de análise (ano de 2013). São imagens referentes a órbita 216 e ponto 68, ortorretificadas, com sistema geocêntrico de referência horizontal (datum) WGS 84 e projeção UTM (Universal Transversa de Mercator).

Nessa pesquisa foi utilizada imagem do satélite Landsat 8, selecionado por conta dos sensores embarcados nesta plataforma de observação da terra, pois além de dispor de um sensor de refletância com bandas nas regiões eletromagnéticas do visível, infravermelho próximo e médio, essenciais nos estudos de vegetação, que é o sensor OLI (*Operational Land Imager*), também

dispõe de um sensor capaz de medir a radiância na região do espectro eletromagnético do infravermelho termal, o sensor TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), fundamental em estudos baseados na temperatura da atmosfera em seus diferentes níveis, as bandas do Landsat 8 encontram-se na tabela 1.

Além disso, o Landsat 8 OLI é classificado como um sensor de média resolução espacial, com pixel de 30 nas suas bandas (tabela 1), e juntamente com o TIRS, apresentam resolução radiométrica de 16 bits, aumentando ainda mais a quantidade e qualidade de informação da superfície terrestre.

Tabela 1. Bandas espectrais, dos sensores OLI e TIRS do satélite Landsat 8, e suas descrições.

BANDA	DESCRIÇÃO DA BANDA	CENTRO DA BANDA (NM)	SENSOR	RESOLUÇÃO ESPACIAL (M)
<i>B1</i>	Coastal Aerosol	433	OLI	30
<i>B2</i>	Blue	482	OLI	30
<i>B3</i>	Green	562	OLI	30
<i>B4</i>	Red	655	OLI	30
<i>B5</i>	Near-Infrared (NIR)	865	OLI	30
<i>B6</i>	Short Wavelength Infrared (SWIR) 1	1610	OLI	30
<i>B7</i>	SWIR 2	2200	OLI	30
<i>B8</i>	Panchromatic	590	OLI	15
<i>B9</i>	Cirrus	1375	OLI	30
<i>B10</i>	Thermal Infrared Sensor (TIRS) 1	108000	TIRS	100
<i>B11</i>	TIRS 2	12000	TIRS	100

Fonte: Zanter (2016).

4.3 Conversão da reflectância TOA

A reflectância TOA (*Top of Atmosphere*), é a razão entre irradiância solar e radiância da superfície. Os valores de radiância precisaram ser convertidos em reflectância para posterior obtenção do albedo planetário nas imagens Landsat 8 do sensor OLI das bandas 1 a 7. Portanto o procedimento foi realizado de acordo com a metodologia de UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (2016) aplicando a equação 1.

$$\rho\lambda' = M\rho * Q_{cal} + A\rho \quad (1)$$

Em que o $M\rho$ é o fator multiplicativo de dimensionamento para a banda: REFLECTANCE_MULT_BAND_n, onde n é a banda, dado obtido nos metadados da imagem. $A\rho$ é o fator aditivo de dimensionamento para a banda: REFLECTANCEW_ADD_BAND_n, onde n é a banda, dado também obtido nos metadados da imagem. E $\rho\lambda'$ é a reflectância espectral planetária (TOA) sem correção do ângulo solar. Depois desse procedimento é aplicada a segunda equação para obtenção da reflectância TOA, sendo a equação 2 a seguir:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\text{sen}\theta} \quad (2)$$

$\rho\lambda$ é a reflectância TOA (adimensional); θ_s é o ângulo de elevação (zenital) solar no momento da aquisição (em graus), obtido no metadados da imagem.

4.4 Albedo no topo da atmosfera

O albedo é uma variável extremamente importante para caracterização do balanço de energia no sistema solo-planta-atmosfera, o albedo quantifica a parte de energia que é absorvida e transformada em calor e fluxo de calor latente (TRIGO et al., 2011), para chegar no albedo da superfície é necessária a obtenção do albedo planetário, o albedo planetário no topo da atmosfera (α_{TOA}) não ajustado para transmissividade atmosférica foi obtido pela equação (3), em conjunto com os valores $\omega\lambda$ da tabela 1.

$$\alpha_{TOA} = \sum(\omega b\rho\lambda) \quad (3)$$

Onde α_{TOA} é o albedo planetário no TOA e ρ_{λ} é a reflectância TOA (adimensional); ω_b é o coeficiente de peso, encontrados na tabela 2, calculados por Teixeira et al. (2015b) como a razão entre a quantidade de radiação de radiação de entrada do sol no topo da atmosfera em uma banda particular e a soma de todas as bandas, para imagens Landsat 8.

Tabela 2. Parâmetros radiométricos para o cálculo do albedo
Coefficientes de peso para as bandas B1-7 do Landsat 8 OLI

Banda	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
ω_b	0,10	0,31	0,30	0,13	0,08	0,05	0,04

Fonte: adaptado de Teixeira et al., (2015b).

4.5 Temperatura no topo da atmosfera

A temperatura de superfície da Terra irradia energia nos comprimentos de onda de micro-ondas, contudo na região do termal (11,0 a 14,0 μm) pode-se detectar a temperatura da superfície por meio da interação da energia eletromagnética com a agitação das moléculas (calor) nessa região. A temperatura de brilho foi obtida aplicando a metodologia de UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (2016) convertendo a radiância espectral do sensor (L_{λ}) em temperatura de brilho pela equação 4.

$$T_{bri} = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (4)$$

Em que, T_{bri} é a temperatura de brilho efetiva no sensor (em Kelvin), $K1$ e $K2$ são constantes de calibração encontrados nos metadados das imagens como $K1_CONSTANT_BAND_n$ e $K2_CONSTANT_BAND_n$ (onde n é a banda respectiva, B10 ou B11).

4.6 NDVI

O índice de vegetação que foram utilizados na metodologia desse trabalho foram o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), é baseado no comportamento antagônico da vegetação em banda de máxima reflectância (NIR) e banda de mínima reflectância (RED), descrito por Rouse et al. (1974) razão entre a diferença de reflectância no infravermelho próximo e vermelho, como segue nas equações 5 e 6.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (5)$$

Em que NDVI é o índice de vegetação que varia de 0,0 a 1,0, ρ_{NIR} é a reflectância na banda do infravermelho próximo, e ρ_{RED} é a reflectância de superfície na banda do vermelho, banda B5 e B4 respectivamente.

4.7 Processamento do algoritmo SAFER

O SAFER foi criado e calibrado para diferentes tipos de culturas, esse algoritmo calcula a evapotranspiração por meio de alguns parâmetros biofísicos adquiridos por meio do Sensoriamento Remoto juntamente com dados de estações meteorológicas. O processamento dos dados dentro do algoritmo é representado através do fluxograma da figura 1, onde o NDVI, albedo e temperatura de superfície são os parâmetros de entrada na equação.

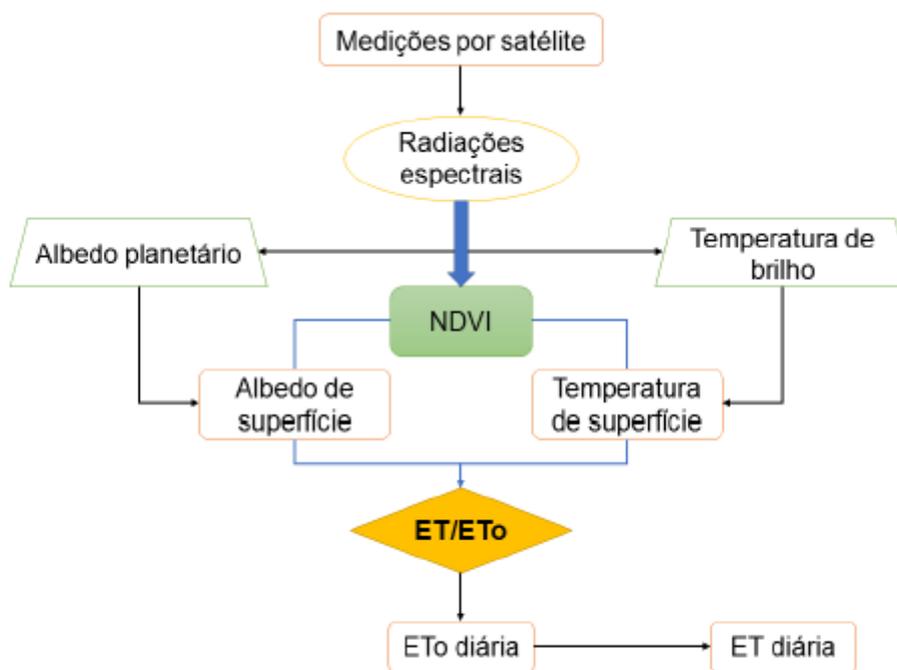
O primeiro passo na estimativa da evapotranspiração foi computar aplicando a equação 7, que define uma razão entre Evapotranspiração real e de referência - ET/ET_o.

$$\frac{ET}{ET_o} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_o}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (7)$$

Em que a e b são coeficientes de regressão para a região, calibrados para a região semiárida (do Estado da Bahia e Pernambuco), sendo usado para a = 1,8 (adimensional) e b = -0,008 (°C); ET/ET_o é a razão de evapotranspiração do modelo, para posterior recuperação da ET (mm.dia-1); T₀ é a temperatura de superfície (°C); α_0 é o albedo da superfície

(adimensional); NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada (adimensional).

Figura 15. Fluxograma de operações do algoritmo SAFER para gerar a evapotranspiração regionalizada.



Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2013).

Feito o processamento acima descrito com a equação 13, a ETa (evapotranspiração atual) foi recuperada (*Retrieving*, do acrônimo SAFER) com o cálculo da equação 14 através do produto entre a ETo e a razão ET/ETo , para obtenção dos valores diários da evapotranspiração atual, em larga escala (TEIXEIRA et al., 2015), nesta etapa acontece a junção do modelo matemático SAFER e a ETo, obtida por meio de dados de estações meteorológicas em solo.

$$ETa = ETo \left(\frac{ET}{ETo} \right) \quad (8)$$

Em que ETa é dada em mm.dia-1, e a variável ETo é a evapotranspiração de referência (mm.dia-1), obtida pela equação de Penman-Monteith, aplicada por dados meteorológicos, através do Banco de Dados Meteorológicos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), os parâmetros

obtidos foram: temperatura do ar (máxima e mínima diária) (°C), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento (m/s).

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (9)$$

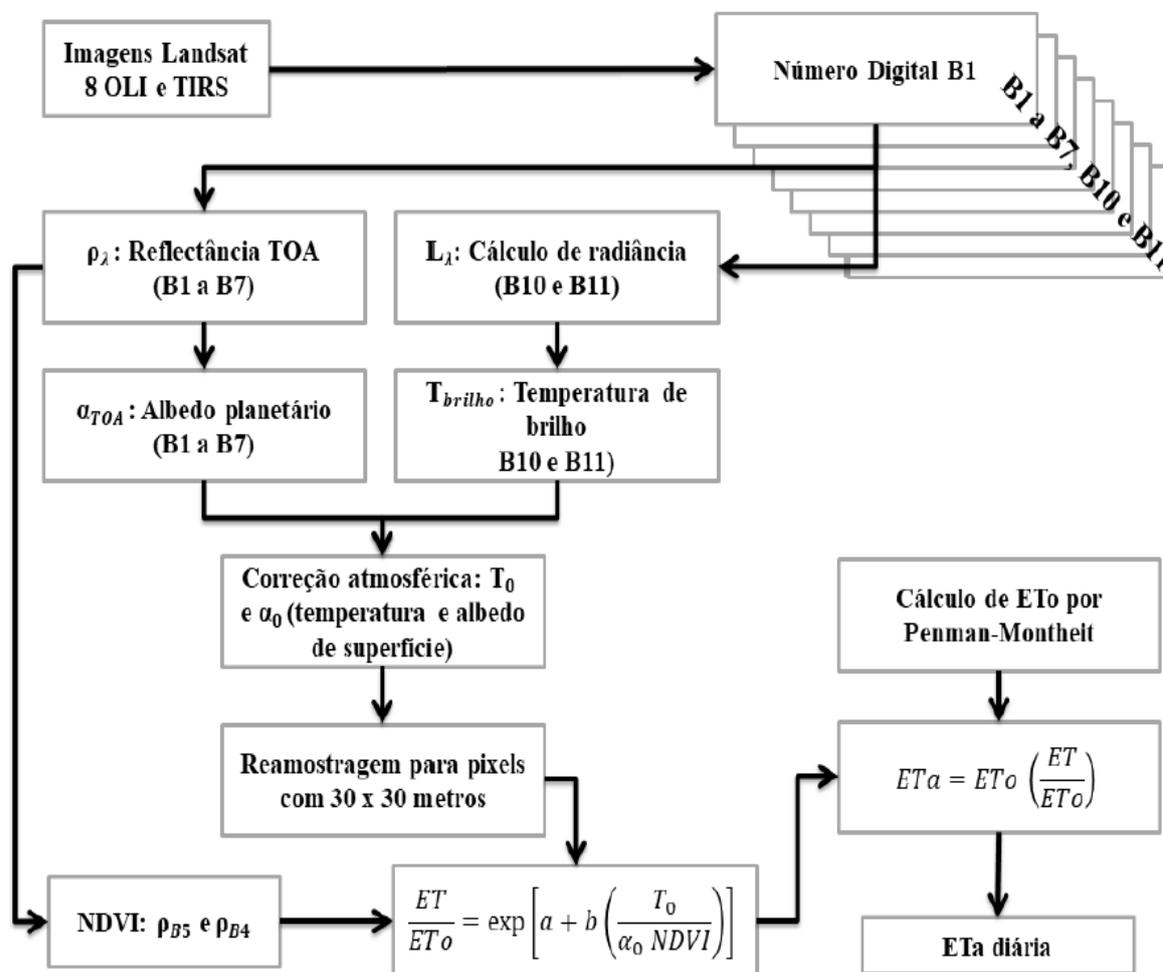
Em que ETo é a evapotranspiração de referência ou potencial (mm.d-1); Δ é o gradiente da curva pressão vapor versus temperatura (kPa.°C-1); o R_n é a radiação solar líquida disponível (MJ.m-2.d-1); G é o fluxo de calor no solo (MJ.m-2.d-1); γ é a constante psicrométrica (kPa.°C-1); u_2 é a velocidade do vento a 2 m, (m.s-1); e_s é a pressão de saturação do vapor de água atmosférico (kPa); e_a é a pressão atual do vapor de água atmosférico (kPa); T_a é a temperatura média diária do ar (°C).

4.8 Software de Processamento (SNAP)

O processamento das Imagens Landsat 8 OLI e TIRS foi realizado utilizando software SNAP (*Sentinel Application Platform*), desenvolvido pela ESA (*European Space Agency*) para processamento de dados de observação da Terra a partir de sensores do Projeto Copernicus (The Sentinels 1-A e B, 2-A e B, 3-A e B, 4, 5, 5P e 6) além de outras plataformas orbitais como SPOT, RapidEyes, e na sua mais recente versão (6.0) também processa dados Landsat 8.

Foram escritos como fluxograma, simplificado na Figura 2, na ferramenta *Graph Built*, a conversão para radiância, reflectância no topo da atmosfera, albedo no topo da atmosfera, temperatura no topo da atmosfera, correção atmosférica do albedo planetário, e a temperatura na superfície, bem como o NDVI para então processar também o algoritmo SAFER.

Figura 16. Simplificação do algoritmo como escrito na ferramenta *Graph Built* no software SNAP para obtenção da evapotranspiração atual com as imagens Landsat 8.



Fonte: Santos (2018).

5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Dentre os elementos da documentação indireta foram coletados dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, adquiridos da base de dados digital, correspondentes ao período de 2013. Os dados meteorológicos utilizados nesta pesquisa, coletados a partir da estação meteorológica de Serrinha (OMM: 83190), foram: pressão atmosférica, temperatura do ar, saldo de radiação, velocidade do vento e precipitação, temperatura de superfície e evapotranspiração.

Após a coleta dos dados meteorológicos, prosseguiu-se com a metodologia de três distintos métodos empíricos matemáticos para a estimativa da evapotranspiração potencial, sendo eles o Método de Thornthwaite, de Hargreaves & Samani e por fim, o Método de Penman-Monteith (FAO – Food Agriculture Organization), posteriormente foi aplicado o método de correlação linear para os valores obtidos de cada método em relação ao de Penman-Monteith que se caracteriza como o padrão para a FAO.

Seguidamente foi selecionada 1 imagem do sensor OLI (*Operational Land Imager*), do satélite Landsat-8, correspondente a órbita 216 e o ponto 68. O pré-processamento das imagens (recorte, georreferenciamento, etc), e a modelagem do algoritmo SAFER ocorreu no software SNAP. Após geradas as imagens de NDVI, Temperatura, Albedo e evapotranspiração, foi extraído os valores pixel-a-pixel finalizando com a geração dos layouts das imagens que foi realizado no mesmo software. O modelo Safer (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) é um algoritmo desenvolvido para estimar evapotranspiração fazendo uso de menos parâmetros que os demais modelos matemáticos (TEIXEIRA, 2012).

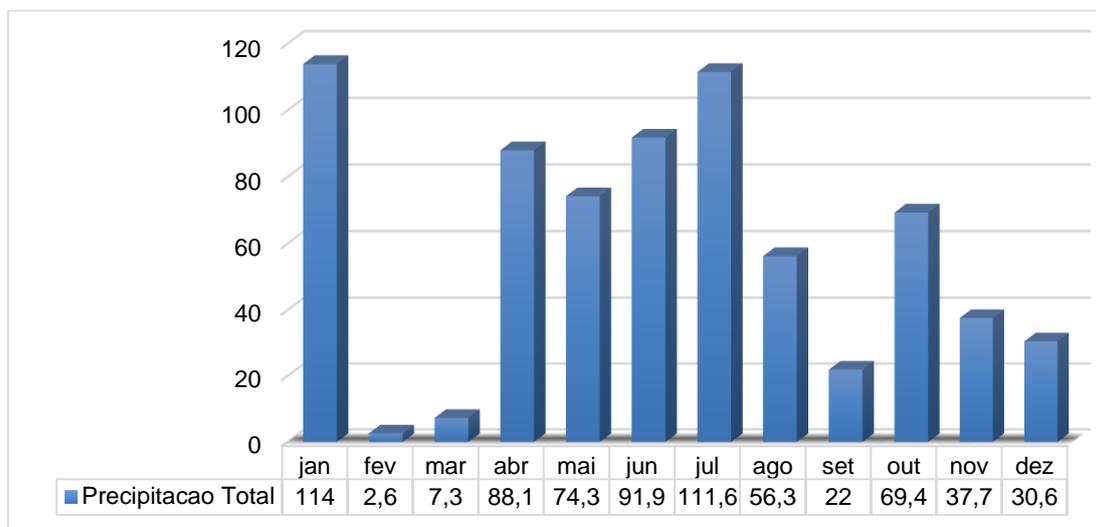
O SAFER é um modelo de estimativa de ET com base na equação de Penman-Monteith como modelo de estimativa da ETo para gerar os dados de evapotranspiração são necessários dados de ETo, radiação global (Rg), temperatura média do ar (Ta), obtidos por estações meteorológicas, e parâmetros obtidos por dados de sensores orbitais, como radiância, reflectância, albedo no topo da atmosfera, albedo de superfície, temperatura de superfície, e um dado derivado que é um índice de vegetação, neste caso sendo usado o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (SALES, 2016).

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A princípio é valoroso relatar acerca da importância dos dados e seu impacto na pesquisa, para a realização desse trabalho encontramos algumas dificuldades no que tange a disponibilidade e qualidade dos dados coletados. A proposta inicial dessa pesquisa estava ancorada no ano de 2016 mas devido a um lacuna na série temporal do referido ano na estação meteorológica do município de Serrinha, o estudo foi redirecionado para o ano de 2013 o qual possuía a serie temporal diária completa em relação a todas as variáveis climáticas (temperatura máxima e mínima, precipitação, umidade do ar, velocidade do vento) que foram utilizadas.

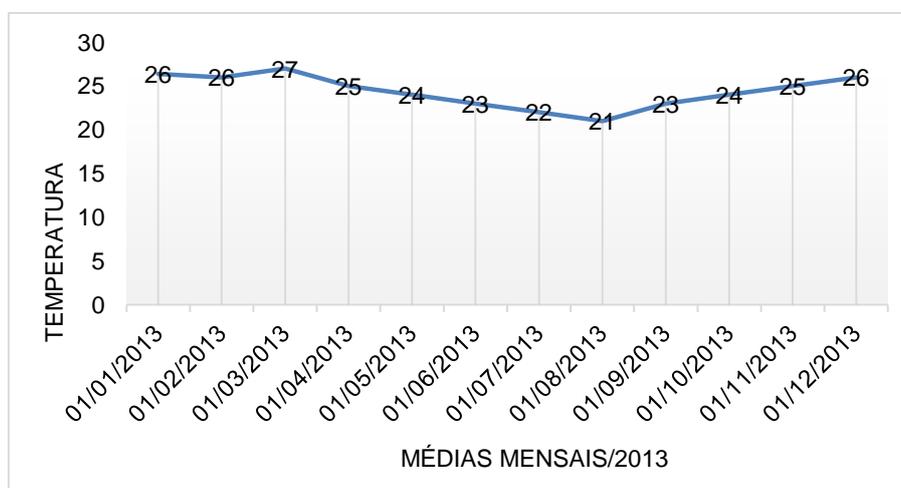
Um outro empecilho ao longo do percurso foi a qualidade das imagens de satélites, nas quais a cobertura de nuvens foi o principal problema no ato do processamento, em que muitas delas se tornaram inviáveis para a coleta de dados necessários aos objetivos.

A princípio, foram coletados os dados mensais de precipitação, temperatura e evapotranspiração da estação meteorológica de Serrinha (83190), no intuito de caracterizar e analisar a dinâmica climatológica do ano selecionado no estudo. Assim, na análise da figura 17, referente a variabilidade pluviométrica dos valores totais mensais, observa-se uma flutuação ao longo do ano que permite inferir a presença de estações pluviométricas: concentração maior de chuvas nos meses de Janeiro, Junho e Julho (Verão / início do Inverno Austral), com médias superiores à 80 mm em cada um dos meses; grande redução das chuvas no período de Agosto à Dezembro, com valores inferiores à 70 mm (Setembro marca o valor mínimo); com exceção dos meses de Fevereiro e Março que registraram os menores valores (2,6 e 7,3 mm) mensais. Esta distribuição mensal das chuvas coincide com o que se pode encontrar na grande maioria do chamado "Leste do Nordeste", no qual o principal período chuvoso acontece entre Maio e Julho.

Figura 17: Precipitação total mensal (mm) no município de Serrinha - BA, 2013

Fonte: Base de dados do BDMEP – INMET. Elaborado pelo autor.

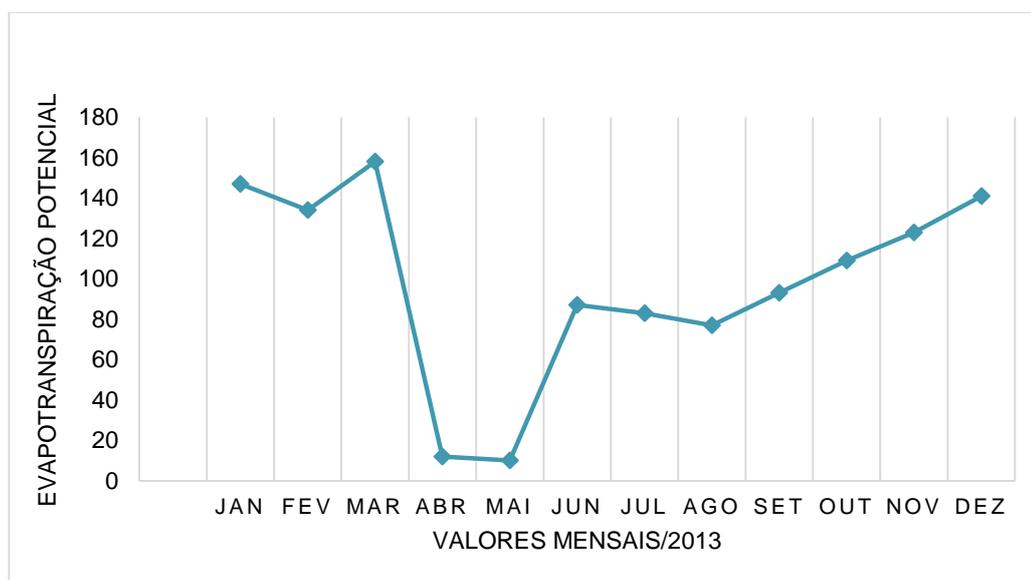
Quanto a variabilidade da Temperatura (figura 18), percebe-se que não há uma irregularidade marcante na distribuição das médias no ano de estudo. A temperatura do município oscila entre 27°C no mês de Março (mês de transição do Verão para o Outono) e 21°C no mês de Agosto (Inverno). Os demais valores se mantiveram entre 25°C a 22°C em que podemos observar a influência da sazonalidade na distribuição das médias mensais, uma vez que as mesmas foram identificadas entre o Outono, Inverno e primavera, posteriormente os valores voltam a aumentar de 26°C a 27°C no período do Verão.

Figura 18: Média de Temperatura (°C) mensal de Serrinha/BA, 2013

Fonte: Base de dados do BDMEP – INMET. Elaborado pelo autor.

No gráfico da figura 19, mostra-se o comportamento dos valores totais mensais da evapotranspiração de potencial (mm) ao longo do ano para Serrinha/BA. Observa-se, de maneira geral, que, os valores de ETP apresentam algumas variações semelhantes ao longo do ano, em que os valores estimados da ETP apresentam-se decrescentes de janeiro a maio, passando a ser crescente de junho a dezembro.

Figura 19: Valores totais mensais da evapotranspiração de potencial (mm) Serrinha/BA, 2013



Fonte: Base de dados do BDMEP – INMET. Elaborado pelo autor.

Os menores valores estimados de ETP ocorreram no período de abril e maio. Ainda no gráfico da Figura 19, pode-se observar também que, com algumas exceções, o maior valor estimado de ETP para a estação de Serrinha foi registrado no mês de março.

Foi selecionada a imagem de 01/12/2013 para estimar temperatura, albedo, NDVI e posteriormente a evapotranspiração potencial. Dessa forma, foram calculados valores diários para todo o ano de 2013, porém serão apresentados apenas os referentes ao mês de Dezembro.

A seguir são apresentados os dados de evapotranspiração potencial a partir das formulas descritas na tabela 3.

Tabela 3: Cálculo de Evapotranspiração Potencial (dada em dia mm.dia⁻¹) - pelos métodos de Penman-Monteith (PM), Thornthwaite e Hargraves-Samani para o ano de 2013 com dados da Estação Meteorológica de Serrinha/BA.

Dezembro/2013	ET _o PM	THORNTHWAITE	HARGRAVES-SAMANI
01	6,4	6,11	6,31
02	6,0	5,34	6,04
03	5,9	5,89	6,12
04	6,1	6,20	6,48
05	5,8	5,42	5,81
06	5,7	5,47	5,92
07	5,8	5,95	5,81
08	5,9	5,74	6,17
09	6,0	5,91	6,10
10	4,8	4,89	4,54
11	5,6	4,95	5,57
12	5,5	5,29	5,32
13	5,6	5,15	5,57
14	5,6	5,25	5,58
15	5,7	5,56	5,73
16	5,7	5,53	5,61
17	5,4	5,15	5,36
18	5,0	4,52	4,82
19	5,7	5,12	5,79
20	5,7	5,33	5,55
21	5,7	5,25	5,72
22	6,1	5,79	6,13
23	6,0	5,84	6,13
24	5,8	5,55	5,81
25	5,8	5,55	5,86
26	6,1	5,86	6,14
27	6,0	6,12	6,19

28	6,2	6,19	6,43
29	6,0	5,96	6,25
30	5,4	5,39	5,42
31	5,5	5,43	5,57

A partir de todos os dados selecionados foi estimada a Evapotranspiração Potencial por mm.dia^{-1} para o município de Serrinha no ano de 2013.

A razão para a escolha do método de Penman-Monteith (PM) se deu pelo fato do mesmo se caracterizar como padrão pela FAO para a estimativa de evapotranspiração e o mesmo ainda se configura como a base teórica do algoritmo que posteriormente será utilizado – SAFER. O método de Thornthwaite se configura como um dos mais aplicados para a estimativa de Evapotranspiração Potencial, uma vez que foi desenvolvido pelo teórico que definiu o conceito de evapotranspiração pela primeira vez, e o método de Hargraves-Samani foi desenvolvido para áreas semiáridas, dessa forma, era mais que apropriado a sua aplicação nessa pesquisa, já que a mesma está sendo desenvolvida em um município do semiárido do Brasil.

Considerando-se os valores diários, observa-se que não houve diferença acentuada entre os três métodos utilizados. Podemos perceber que os menores valores foram os calculados pelo método de Thornthwaite, salvo os dias 4 e 7 o qual os valores foram superiores ao de Penman-Monteith (PM), acompanhado pelo método de Hargraves-Samani que também tiveram seus índices superiores somente nos dias 3 e 7.

Para auxiliar a análise, aplicou-se o coeficiente de correlação linear a partir dos diagramas de dispersão (figuras 20 e 21), nos quais poderemos identificar a correlação entre os métodos, tomando como parâmetro o de Penman-Monteith (PM), uma vez que o mesmo é considerado como método padrão. Sendo assim, podemos observar que quanto mais próximo estiver de -1 ou +1 a correlação será forte, e será tanto mais fraca ao se aproximar do coeficiente 0 (zero).

6.1 Validação dos métodos

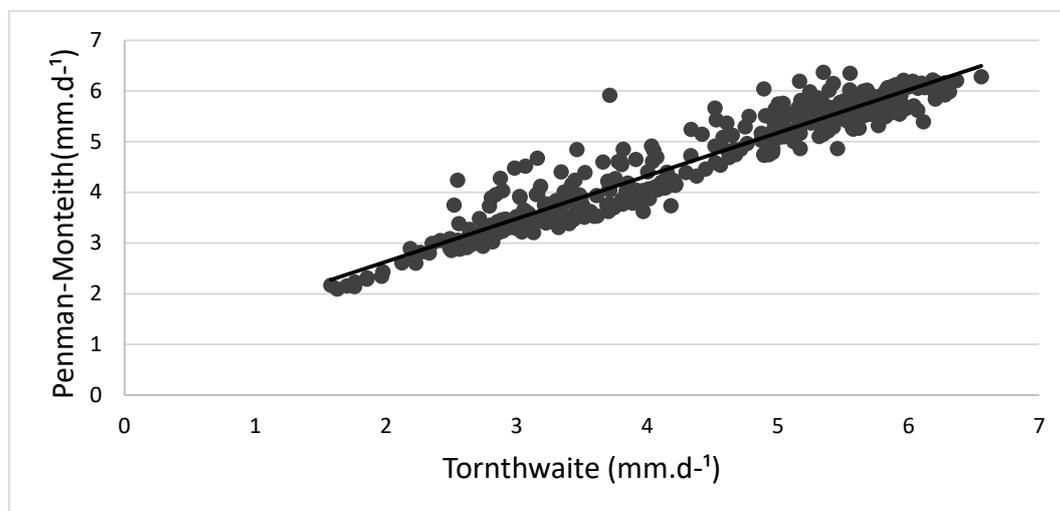
6.1.1 THORNTHWAITE

Alguns estudos já foram realizados em áreas semiáridas do Brasil utilizando o método de Thornthwaite para estimar valores de Evapotranspiração. Pesquisas como a de Moura et. al. (2012) em uma Bacia experimental no estado do Pernambuco, baseado na temperatura e na Radiação solar, demonstrou que o método apresentou variações de desempenho de “mau a muito bom”.

Assim como, o trabalho realizado por Francisco et. al. (2017), em que os autores utilizaram o referido método para estimar Evapotranspiração de referência mensal e anual de 223 municípios do estado da Paraíba, constatou-se que os valores de ETo mensais apresentam dependência da localização geográfica (latitude e longitude), sobretudo da topografia local (altitude), mas os resultados estão de acordo com a literatura para a região semiárida do Nordeste Brasileiro.

A figura 20 apresenta a relação entre as estimativas de ETo pelo método de Thornthwaite, ajustada pelo método de Penman-Monteith-FAO, para o ano de 2013 em escala diária. Para o município estudado o método apresentou um ótimo desempenho, apontando os respectivos valores 0.953, 0.983 e 0.937 exatamente nessa ordem. Segundo Camargo e Sentelhas (1997), ambos métodos receberam desempenho ótimo, com uma pequena taxa da variação do erro.

Figura 20: Gráfico de Correlação entre os métodos de Penman-Monteith (PM) e Thornthwaite.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da pesquisa, 2018.

6.1.2 HARGREAVES E SAMANI

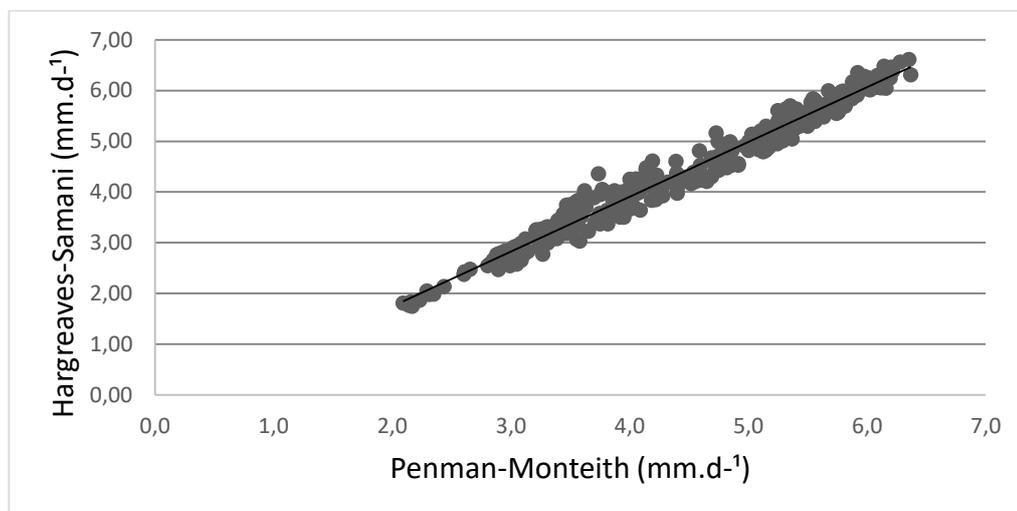
Pesquisas desenvolvidas em regiões semiáridas com o método de HS apresentaram resultados bastantes satisfatórios (MARTÍNES-COB E TEJERO-JUSTE, 2004; GONÇALVES et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2010) corroborando com os resultados aqui apresentados. Segundo Cunha et al. (2013) o método de Hargreaves e Samani é muito utilizado para estimativa da ETo no Brasil.

A figura 21 apresenta a relação entre as estimativas de ETo pelo método de Hargreaves e Samani e pelo método de Penman-Monteith, para o ano de 2013 em escala diária.

O método de Hargreaves e Samani obteve um ótimo desempenho estatístico, tanto na sua forma original. Em sua metodologia, para as condições climáticas em Serrinha, Bahia, este apresentou alto valor do coeficiente de determinação (0.988), baixo erro absoluto médio (0.104) e índice de confiança considerado ótimo.

Este método requer para dados de entrada as temperaturas máxima, mínima e média do ar e radiação solar extraterrestre (tabelado) como variável climática, sendo de fácil execução. Assim, é recomendável o método de Hargreaves e Samani (1985) para as condições climáticas de Serrinha.

Figura 21: Gráfico de correlação entre os métodos de Penman-Monteith (PM) e Hargreaves-Samani.



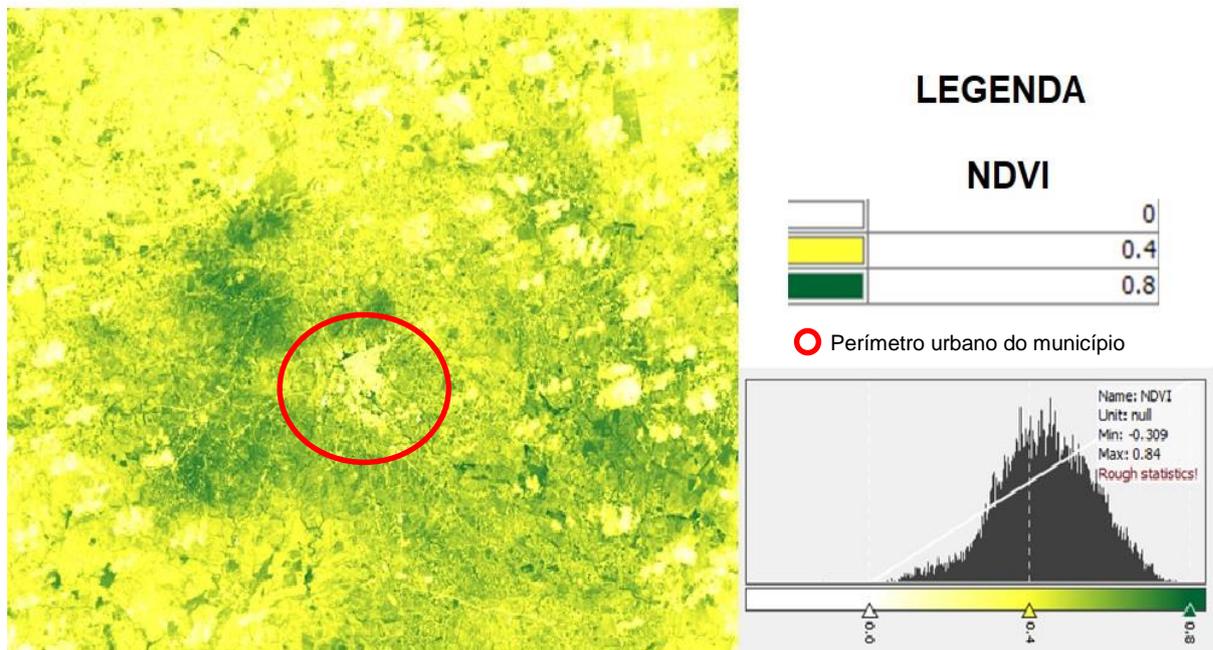
Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da pesquisa, 2018

6.1.3 RESULTADOS OBTIDOS PELO SAFER

Sendo assim, foi selecionada a imagem de 01 de Dezembro de 2013, posteriormente seguiu-se para seu processamento digital até a obtenção da evapotranspiração atual regionalizada, para a obtenção do índice de vegetação, no objetivo de identificar a presença e intensidade da vegetação na equação do modelo SAFER, neste caso o NDVI.

Para Silva e Liporace (2016) o NDVI é um índice discriminante de vegetação, que quanto mais próximo de 1 maior é a certeza de estar se tratando de um pixel de vegetação. Na detecção de nuvem espera-se NDVI próximo a zero para pixels de nuvem, devido sua aparência branca nas bandas envolvidas (SILVA; LIPORACE, 2016). Para isso, foi criada uma máscara no NDVI (figura22) para excluir valores que não estão relacionados com a vegetação, no intuito de uma melhor visualização da imagem e análise visual.

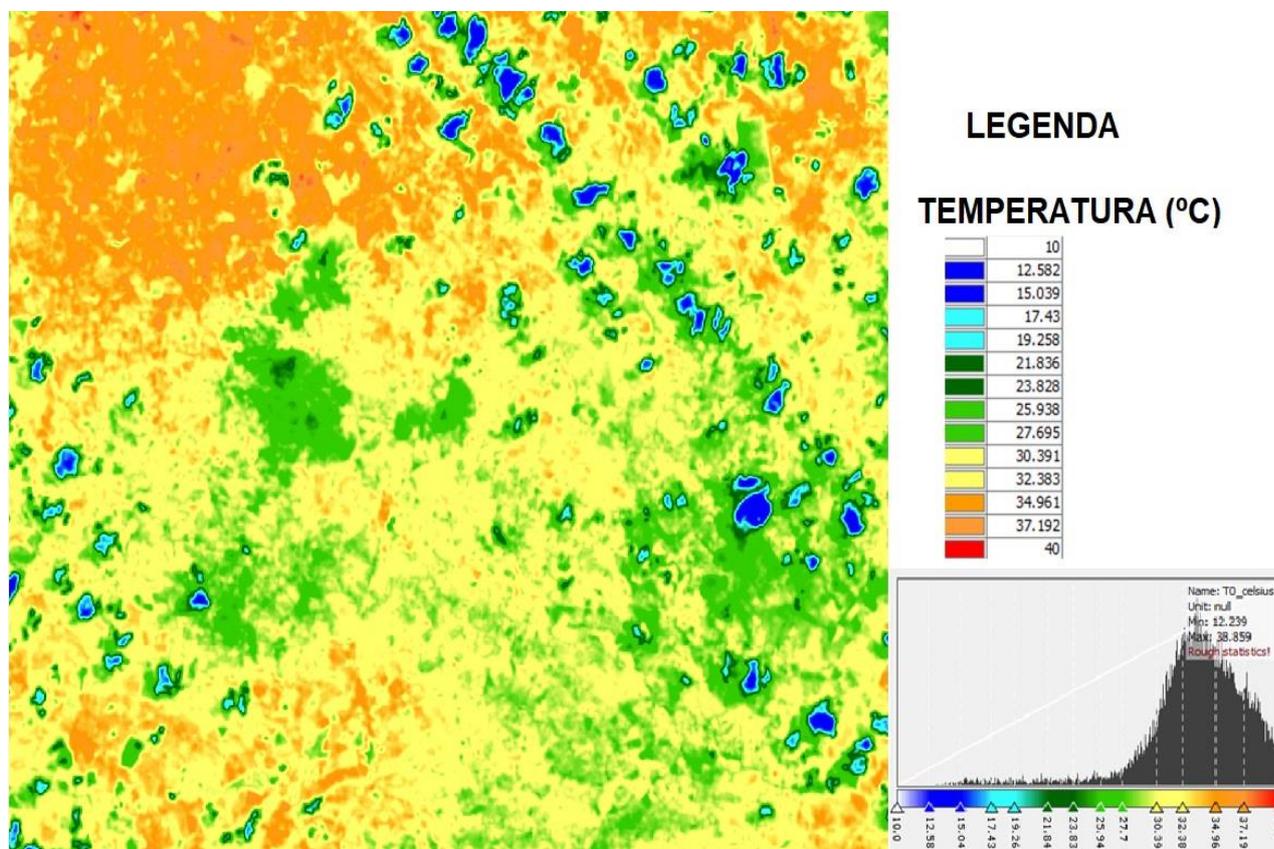
Figura 22: Distribuição espacial dos valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para a imagem do mês de dezembro de 2013.



A partir da imagem acima podemos identificar que os pixels com valores de 0.8, estão localizados ao redor da malha urbana do município, uma vez que estes são representativos das áreas, onde ainda é possível encontrar alguns remanescentes de caatinga arbórea.

Após obter o NDVI, a segunda variável necessária para o modelo SAFER e derivada de dados de satélite é a temperatura da superfície. Na imagem de Temperatura da superfície, exibidas na figura 23 em graus Celsius, as áreas de nuvens foram mascaradas restringindo os dados a temperaturas superiores à 20 °C, podendo ainda serem observadas temperaturas das áreas de sombras de nuvens,

Figura 23: Distribuição espacial da temperatura da superfície (T0) em graus Celsius, obtida a partir dos dados do sensor TIRS do Landsat 8, para o mês de dezembro de 2013.

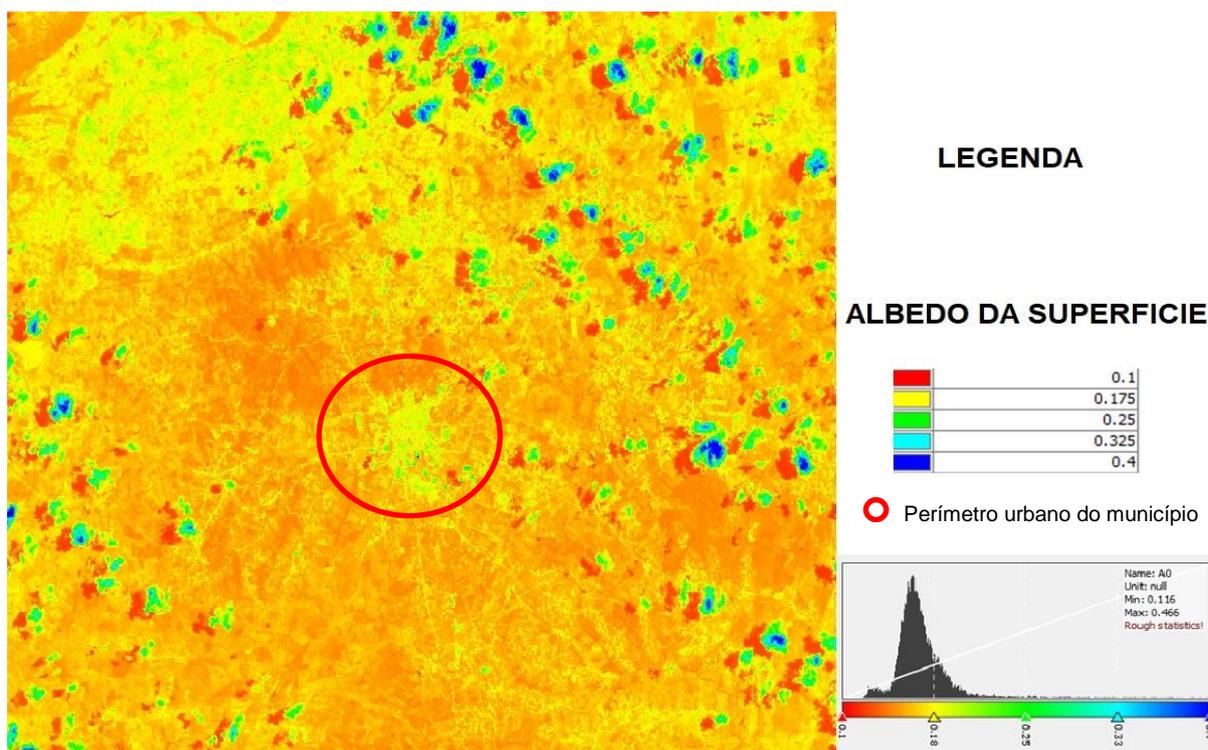


Como podemos observar na imagem de temperatura, os valores não aparecem de forma tão discrepante, dentre os valores mínimos foram encontrados uma média entre 23°C e 27°C, principalmente nas áreas que anteriormente foram identificadas com a presença de uma vegetação ativa, e os valores máximos estão entre 30°C e 34°C, esses valores se destacam principalmente na área urbana do município e nos campos de pastagens, que são cada vez mais presentes para o desenvolvimento das atividades agrícolas, destaques na economia Serrinhense.

O albedo da superfície (figura 24) que se caracteriza como a última variável de entrada do Safer. E valores superiores ao intervalo descrito, por exemplo o que é possível de ser observado nas imagens os valores de 0,4 e 0,325 são representados por solo exposto e/ou superfície de nuvens. Os demais valores de albedo da superfície encontrados para a área de estudo

encontram-se, compreendida no domínio dos valores 0,1 e 0,175 são representativo das áreas de pastagem e caatinga.

Figura 24: Distribuição espacial do albedo da superfície (α_0), obtida a partir da soma do albedo das bandas B1 a B7 do sensor OLI, para a imagem do mês de dezembro de 2013.

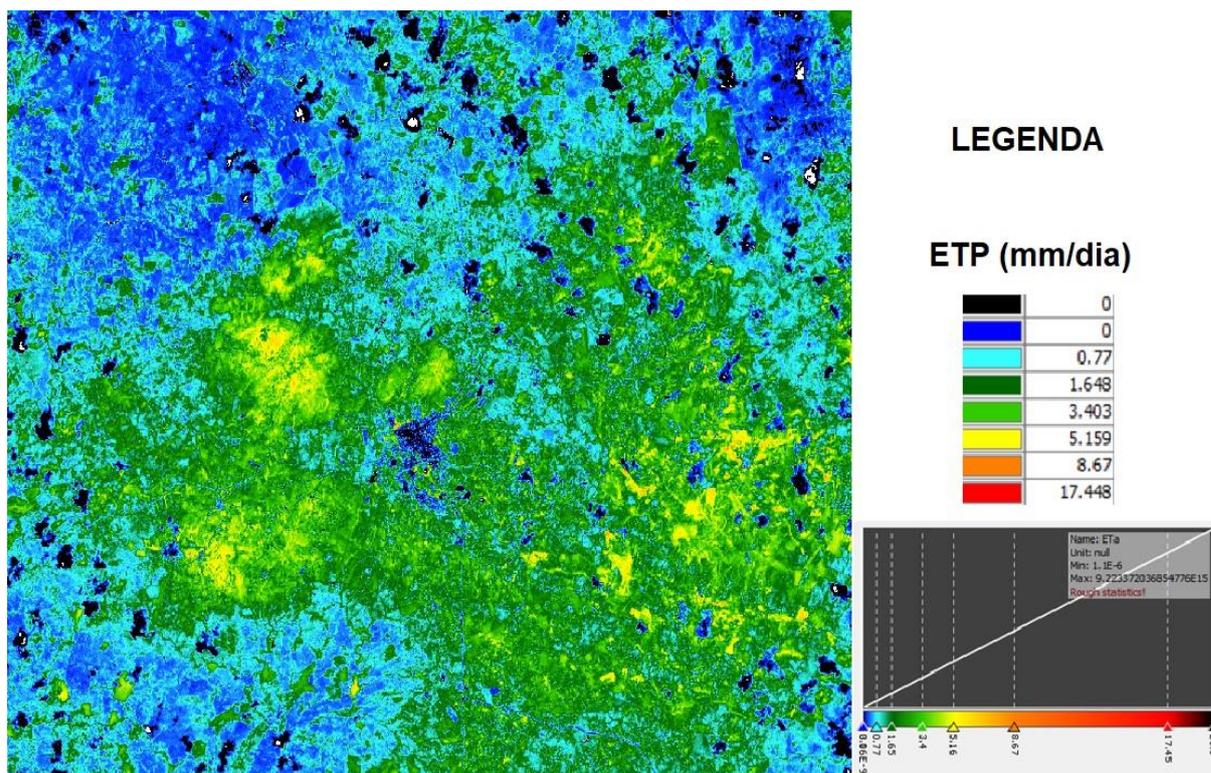


Após calcular todos os parâmetros necessários, foi computada a evapotranspiração potencial, para o município de Serrinha, os maiores valores de ETp foram identificados em áreas com a presença de uma vegetação mais intensa, com máximos de 5,159 a 6 mm dia⁻¹, no ano de 2013. Este é um comportamento esperado, considerando o alto suprimento hídrico à vegetação nesses locais (SANTOS et al., 2010). Menores valores foram encontrados no centro urbano e em faixas de solo exposto, onde há pouca ou nenhuma vegetação.

Quando comparamos os valores da figura 25 com os valores da tabela 3 podemos perceber que os mesmos não se distanciam em nenhum dos métodos utilizados para calcular a ETp na data selecionada que corresponde ao dia 01 de Dezembro de 2013, isso se deve ao fato de que é necessário

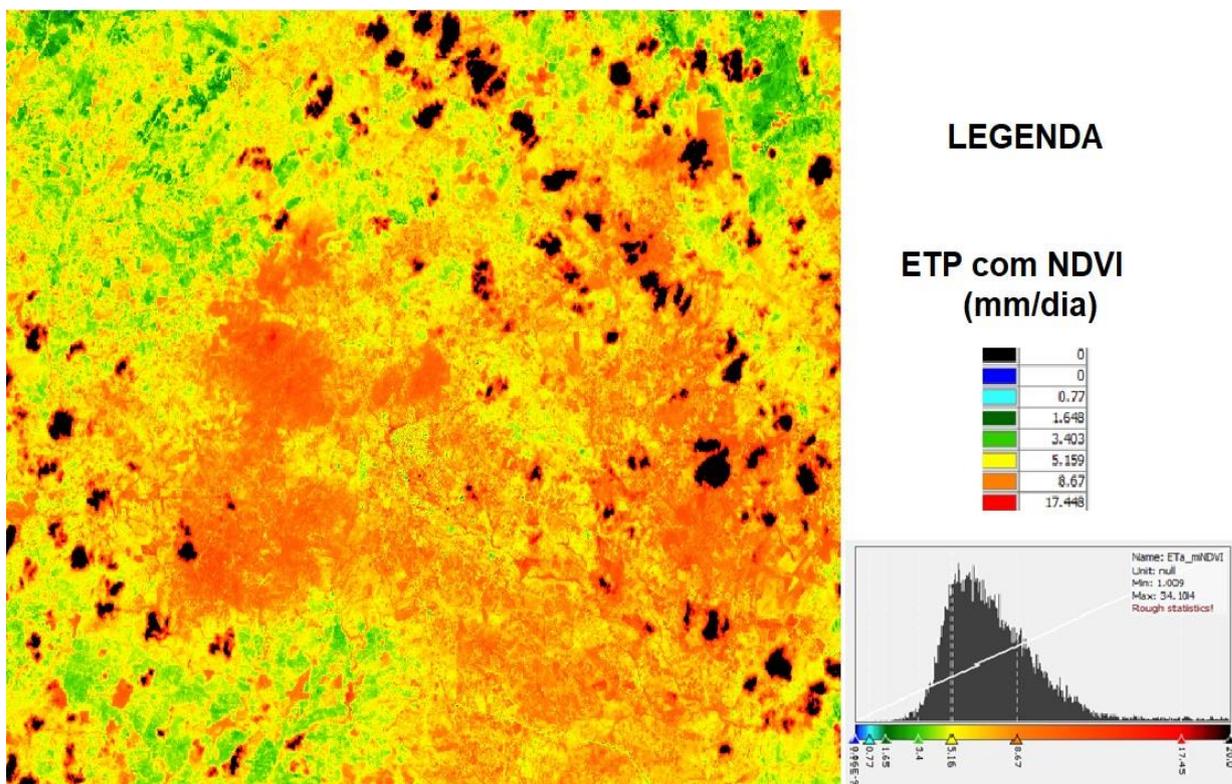
levar em consideração a sazonalidade uma vez que máximo de ETp ocorre no verão, quando há maior quantidade de energia solar para condicionar a evapotranspiração (Camargo, 2000).

Figura 25: Distribuição espacial da evapotranspiração potencial (ETp), em mm.dia-1, obtida a partir da temperatura da superfície (T0), do NDVI, do albedo da superfície (α_0) e da evapotranspiração potencial (ETp).



Analisou-se também o resultado da ETp colocando a evapotranspiração em função do NDVI, uma vez que a obtenção da mesma é condicionada a áreas onde há presença de vegetação, e neste caso, as áreas de caatinga presentes no município. Com a metodologia foi possível computar a evapotranspiração regionalizada a partir do algoritmo SAFER, entretanto esta não se mostrou como esperado. Isso porque, os valores encontrado de ETp nas áreas vegetadas mantiveram o seu comportamento em relação a área urbano e de solo exposto, porém são superiores aos valores calculados para a ETo de Penman-Monteith, o que pode ser constatado na figura 26 em consonância com a tabela 3.

Figura 26: Distribuição espacial da evapotranspiração potencial (ETp), em mm.dia-1, em função do NDVI.



Observamos que o valor de 5,159 mm que antes correspondiam as áreas de vegetação densa na imagem acima elas aparecem com 8,67, ou seja com mais de 3 mm de diferença, a área urbana que na figura (25) correspondia aos valores de 0,77 a 1,648, na figura (26) apresenta o valor de 5,159. Sendo assim,

entende-se que para os objetivos da pesquisa não é viável estimar a evapotranspiração em função do NDVI, pois, os valores são superestimados quando comparados aos obtidos através da equação de PM.

Porém se o objetivo da pesquisa estiver pautado em uma melhor visualização da imagem de ET, essa é uma metodologia recomendável.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O clima se constitui um dos elementos naturais fundamentais para a composição do espaço e, portanto, torna-se necessário compreender de que forma esse elemento natural se inter-relaciona com as ações antrópicas, na perspectiva de construção e transformação desse espaço.

Com o passar dos anos surge a necessidade crescente de técnicas que auxiliem o homem na busca pelo conhecimento, pela necessidade de entender e transformar o mundo a seu redor, para isso o mesmo faz uso de ferramentas, fórmulas, e tecnologias que se modernizam cada vez mais. Com o surgimento do sensoriamento remoto foram obtidos progressos nos estudos ambientais, técnicos e sociais voltados para a perspectiva de conhecer e identificar problemáticas e tencionar possíveis soluções, melhorar e fazer previsões com relação ao planejamento urbano/municipal, Identificação e avaliação do uso da terra, Monitorar desmatamentos e áreas suscetíveis a desertificação estão dentre das múltiplas possibilidades do uso dessa ferramenta.

Destaca-se aqui a importância dessa pesquisa, pela necessidade de compreensão da realidade que envolve a dinâmica produtiva no semiárido, entendendo que a mesma não é estática, sofrem interferências de suas características naturais peculiares, mas sobretudo de políticas públicas e organização social, ações estas potencialmente transformadoras. No entanto, antecedendo intervenções, também se faz essencial o conhecimento da dinâmica natural, no qual o estudo dos elementos climáticos pode contribuir na perspectiva do planejamento e gestão, principalmente para as áreas que não dispõe recursos e suporte tecnológico, a exemplo da região semiárida, historicamente marginalizada.

Podemos perceber no desenvolvimento da pesquisa que todos os objetivos foram alcançados, uma vez que, ao buscar diferentes metodologias de custo zero, utilizando de dados secundários de bancos digitais que estão à disposição do seu público de interesse, sem a necessidade de utilizar ferramentas e máquinas específicas para o estudo, estimou-se a evapotranspiração com um grau aceitável de confiabilidade.

Ao utilizar os métodos de Thornthwaite, Penman-Monteith-FAO e Samani e Hargrave podemos obter os valores diários de Evapotranspiração

Potencial observou-se que não houve diferença acentuada entre os três métodos utilizados, sendo que os valores permaneceram entre 6,4 e 4,8 mm/dia.

O algoritmo SAFER aplicado no Landsat 8 estimou com alto nível de confiança as variáveis evapotranspiração potencial, temperatura da superfície, saldo de radiação, NDVI e albedo, como produto final no balanço de energia em larga escala, obtendo-se resultados apropriados para a área de estudo, que está inserida na dinâmica do semiárido, lembrando que todos os métodos aqui utilizados foram criados e testados para áreas áridas e semiáridas do globo.

Nessa perspectiva a pesquisa traz novas possibilidades de se estimar evapotranspiração potencial, utilizando diferentes abordagens as quais não requer a utilização de técnicas onerosas ou de altos custos, possibilitando estudos em áreas mais amplas a partir de metodologias que utilizam dados secundários e de alta confiabilidade.

O algoritmo SAFER já foi testado em diferentes áreas com dinâmicas climáticas completamente diferentes, como por exemplo Silva (2018), que teve por objetivo estimar a evapotranspiração real da soja no nordeste do estado de São Paulo e o trabalho de Texeira (2013) nas áreas de Petrolina (PE), Juazeiro (BA) e Noroeste de São Paulo (Fazenda comercial Bonança), no qual os mesmo demonstraram desempenhos diferenciados, pois como citado anteriormente o algoritmo possui um melhor desempenho nas áreas semiáridas. Ao observarmos os resultados obtidos a partir desta pesquisa podemos concluir que o algoritmo SAFER apresentou um excelente desempenho, podendo essa metodologia ser replicada em diferentes áreas com características de climas secos e semiáridos.

REFERÊNCIAS

AB´SABER, Aziz Nacib. O Domínio Morfoclimático Semiárido das Caatingas brasileiras. **Geomorfologia**. São Paulo: Instituto de Geografia/Universidade de São Paulo, n. 43, 1974.

AB´SABER, Aziz Nacib. **Os Domínios de Natureza no Brasil**: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Cropevapotranspiration: guidelines of computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300p (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALLEN, Richard G.; TASUMI, Masahiro; TREZZA, Ricardo. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. **Journal Of Irrigation And Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p.380-394, ago. 2007. American Society of Civil Engineers (ASCE).

ANGELOCCI, L.R.; CAMARGO, M.B.P.; SENTELHAS, P.C. Evapotranspiração - Meteorologia Agrícola 306 1º Semestre/2007.

BAPTISTA, G. M. M. Sensores imageadores na faixa do Termal (8 - 14 μ m). In: _____. MENESES, P. R; ALMEIDA, T. (Orgs.). **Introdução ao processamento de imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: Unb, 2012, p. 47-56.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENETI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. **Formulation**. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198–212, 1998.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais LANDSAT 5-TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v .23, n. 3, p. 305-317, 2008.

BRUZZONE, Lorenzo; SMITS; Paul C.; TILTON, James C.. Foreword Special Issue on Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images. In: **IEEE: Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. 2003, Vol. 41. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01245229>>. Acesso em: 10 Jul. 2013.

BUAINAIN, Antonio Marcio; GARCIA, Junior Ruiz. Desenvolvimento rural do semiárido brasileiro: transformações recentes, desafios e perspectivas. **Confins** [Online]. 2013. Disponível em: <http://confins.revues.org/8633?lang=pt#tocto1n1>>. Acesso em 24 abril 2015.

CAMARGO, Ângelo Paes de; CAMARGO, Marcelo Bento Paes de. **Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial**. *Bragantia*[online]. 2000,

vol.59, n.2, pp.125-137. ISSN 0006-8705. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052000000200002>.

CENTRO de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: Acesso em: 3 set. 2014.

CHEN, S.; CHEN, J.; LIN, G.; ZHANG, W.; MIAO, H.; WEI, L.; HUANG, J.; HAN, X. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.149, p.1800-1809, 2009. DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.06.009.

CIRILO, J.A.; MONTENEGRO, S.M.G. L.; CAMPOS, J.B. **A questão da água no semiárido brasileiro**. 2013. Disponível em <http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-811.pdf>>. Acesso dia: 24 abr 2015.

COMPAORÉ, H.; HENDRICKX, J.M.; HONG, S.; FRIESEN, J.; GIESEN, N.C. van de; RODRIGUES, C.; SZARZYNSKI, J.; VLEK, P.L.G. Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v.33, n. 2, p.127-140, 2008.

COLWELL, R. N. *Manual of Remote Sensing*. 2. ed. Falls Church: American Society of Photogrametry, 1983.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

FRANCO, Tasso. **Serrinha: A colonização Portuguesa numa cidade do serão da Bahia**. – Salvador: EGBA/ Assembleia Legislativa do Estado, p.386, 1996.

FRANCISCO, P. R. M.; MEDEIROS, R. M.; MATOS, R. M.; SANTOS, D. S.; SABOYA, L. M. F. **Evapotranspiração de Referência mensal e anual pelo Método de Thornthwaite para o Estado da Paraíba**. *Revista Brasileira de Climatologia* _____ ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica), *Ano 13 – Vol. 20 – JAN/JUL 2017*.

GOERGEN, G. **Utilização do índice de área foliar obtido por sensoriamento remoto para a estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Prata**. 2010. 89f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

GUTIÉRREZ, A.P.A.; ENGLE, N.L.; NYS, E.D.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E.S. Drought preparedness in Brazil. *Weather and Climate Extremes*, v.3, p.95-106, 2014. DOI: 10.1016/j.wace.2013.12.001.

Hastenrath, S. and Heller, L. (1977) Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 103, 77–92.

Hounsou-Gbo, G.A., Servain, J., Araujo, M., Martins, E.S., Bourles, B. and Canaix, G. (2016) Oceanic indices for forecasting seasonal rainfall over the

northern part of Brazilian northeast. *American Journal of Climate Change*, 5, 261–274.

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **BRASIL:** Informações Gerais sobre as diferentes regiões. 1999. Disponível em: <<http://dc.itamaraty.gov.br/publicacoes/textos/portugues/revista1.pdf>>. Acesso em: 09 jan 2015.

KLAR, Antonio Evaldo. **Irrigação:** Frequência e quantidade de aplicação. - São Paulo: Nobel, 1991.

JACOMINE, P.K.T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS, Cruz das Almas, 1996. Pesquisa e desenvolvimento para os Tabuleiros Costeiros. **Anais**. Aracaju: EMBRAPA; CPATC; CNPMF; EAUFBA; IGUFBA, 1996. p.13-24.

MARENGO, José A.; ALVES, Lincoln M.; BESERRA, Elder A.; LACERDA, Francinete F. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande – PB, 2011.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; SOARES, W. R.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M.; BRITO, S. S. B.; CUARTAS, L. A. LEAL, K. **Increase Risk of Drought in the Semiarid Lands of Northeast Brazil Due to Regional Warming above 4 °C**. In_____. *Climate Change Risks in Brazil*, pp.181-200, January 2019, DOI: 10.1007/978-3-319-92881-4_7

MENESES, C. H. S. G.; LIMA, L. H. G. M.; LIMA M. M. A.; VIDAL, M. S. Aspectos genéticos e moleculares de plantas submetidas ao déficit hídrico. *Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas*, v. 10, n. 1/2, p. 1039-1072, 2006.

MOURA, A. C.; MONTENEGRO, S. M^a. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G.; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M^a. M. **Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em Bacia Experimental no Estado de Pernambuco – Brasil**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.28, n.2, 181 - 191, 2013

MOURA, M.S.B.; GALVÍNCIO, J.D.; BRITO, L.T. de L.; SOUZA, L.S.B. de; SÁ, I.I.S.; SILVA, T.G.F. da. Clima e água de chuva no Semiárido. In: 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 Semi-Árido, 2007. p.37-59.

MU, Q., HEINSH, F. A., ZHAO, M., RUNNING, S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing Environment**, v.111, p.519-536, 2007.

NOVO, Evelyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento remoto:** princípios e aplicações. 2.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

OLIVEIRA, M.B.L. de; SANTOS, A.J.B.; MANZI, A.O.; ALVALÁ, R.C. dos S.; CORREIA, M. de F.; MOURA, M.S.B. de. Trocas de energia e fluxo de carbono

entre a vegetação de caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, p.378-386, 2006.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag, 2013. P. 323.

PRADO JÚNIOR, Caio. **História econômica do Brasil**. São Paulo : Brasiliense, 2004.

SANTOS, T. V. **Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na Bacia do Jacuí por meio de imagens orbitais**. 2009. 85f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SANTOS, C. A. C. D.; BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. D.; RAO, T. V. R. Assessment of daily actual evapotranspiration with SEBAL and S-SEBI algorithms in cotton crop. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos – SP, v. 25, n. 3, p. 383-392, 2010.

SANTOS, S. de A.; CORREIA, M. de F.; ARAGÃO, M.R. da S.; SILVA, P.K. de O. Aspectos da variabilidade sazonal da radiação, fluxos de energia e CO₂ em área de caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.4, p.761-773, 2012.

SANTOS, Diego. Entenda a disponibilidade hídrica e a evapotranspiração no Brasil. Disponível em: <<https://www.agrosmart.com.br/blog/disponibilidade-hidrica-evapotranspiracao/> > Acesso em: 23 de outubro de 2017.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea: Diagnóstico do Município de Serrinha Estado da Bahia. Salvador: CPRM/PRODEEM, 2005.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. P. S. E.; PRECKER, J. W.; SILVA, D. P. S. Influência da temperatura do ar de secagem no calor latente de vaporização de água em feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), variedade sempre-verde. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 2, p. 315-324, 2008.

SILVA, M.A.O.; LIPORACE, F.S.. DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE NUVEM E SOMBRA DE NUVEM EM IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 2, p.369-388, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702016000200021>.

SILVA, Yane de Freitas da. **Uso do algoritmo safer para evapotranspiração real na cultura da soja**. 73 p. Dissertação (mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista: São Paulo, 2018.

SOUZA, Vanessa de Arruda. **Utilização de técnicas de sensoriamento remoto para a estimativa da evapotranspiração em uma cultura de arroz irrigado**. 88 p. Dissertação (mestrado Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande Do Sul: Porto Alegre, 2013.

SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA – SEI. Perfis dos Territórios de Identidade da Bahia. Disponível em: <<http://www.sei.ba.gov.br/index>> Acesso em: 16 de julho de 2016.

TEIXEIRA, A.H. de C.; BASTIAANSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D.; MOURA, M.S.B.; BOS, M.G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology*, v.362, p.110-127, 2008. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.08.011.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing an Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, Bellingham WA, USA, v. 2, n. 5, p. 1287–1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C. Modelling Evapotranspiration by Remote Sensing Parameters and Agrometeorological Stations. In. **Remote Sensing and Hydrology**; NEALE, C.M.U., COSH, M.H., Eds.; IAHS Publ. 352; IAHS Press: Wallingford, UK; pp. 154–157, 2012.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L. **Application of Landsat images for quantifying the energy balance under conditions of fast land use changes in the semi-arid region of Brazil**. In: SPIE Remote Sensing, 2012, Edinburgh. Proc. SPIE 8531, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, XIV, v. 8531. p. 1-10, 2013.

TORRES, F.T.P; MACHADO, P.J.O. Brasil caracterização Climática: clima semiárido. In: _____. **Introdução a Climatologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre (RS): Ed. da UFRGS, 2000. 943p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**, Recife: Versão Digital 2, 2006. 463 p.