UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
DOUTORADO

AS ILHAS "HIDRO-PEDO-GEOLÓGICAS" NO CONTEXTO DA REGIÃO SEMIÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO

Por

Franklin Mendonça Linhares

Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau de Doutor

João Pessoa – Paraíba **Fevereiro de 2019**

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
DOUTORADO

Franklin Mendonça Linhares

AS ILHAS "HIDRO-PEDO-GEOLÓGICAS" NO CONTEXTO DA REGIÃO SEMIÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Costa Guedes Vianna

Co-orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

João Pessoa – Paraíba **Fevereiro de 2019**

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L755i Linhares, Franklin Mendonça.
As ilhas "hidro-pedo-geológicas" no contexto da região Semiárida do Nordeste Brasileiro / Franklin Mendonça Linhares. - João Pessoa, 2019.
154 f. : il.

Orientação: Pedro Costa Guedes Vianna.
Coorientação: Richarde Marques da Silva.
Tese (Doutorado) - UFPB/CCEN.

1. Hidrogeologia. 2. Hidrogeografia. 3. Modelagem hidrológica. 4. Trabalho de campo. 5. Semiárido. I. Vianna, Pedro Costa Guedes. II. Silva, Richarde Marques da. III. Título.

UFPB/BC CDU 556.3(043)

Elaborado por MARILIA RIANNY PEREIRA COSMOS - CRB-15/862

"As Ilhas Hidro-pedo-geológicas no Contexto da Região do Semiárida do Nordeste Brasileiro"

por

Franklin Mendonça Linhares

Tese apresentada ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia do CCEN-UFPB, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Área de Concentração: Território, Trabalho e Ambiente

Aprovada por:

Prof. Dr. **Pedro Costa Guedes Vianna**
Orientador

Profª Drª **Richarde Marques da Silva**
Co-orientador

Prof. Dr. **Bartolomeu Israel de Souza**
Examinador interno

Prof. Dr. **Celso Augusto Guimarães Santos**
Examinador interno

Prof. Dr. **Victor Hugo Rabelo Coelho**
Examinador externo

Prof. Dr. **José Guimarães de Carvalho Neto**
Examinador externo

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Geografia
Curso de Doutorado em Geografia

Março/2019

Dedico aos meus pais Francisco Linhares de Aragão (*in memoriam*) e Francisca Mendonça de Aragão, que souberam ensinar o verdadeiro sentido da vida...

AGRADECIMENTOS

A toda a minha família, Françoise Aragão, Raissa Aragão e Miguel Aragão, por todo amor, cuidado e compressão.

A Juliana Rayssa por ter confiado e apoiado em toda a jornada desde o Mestrado até o Doutorado, e que está sempre ao meu lado em tudo.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Pedro Costa Guedes Vianna, por ter confiado e acreditado neste trabalho.

Ao meu amigo e Co-orientador, o Prof. Dr. Richarde Marques da Silva, por ter contribuído na estruturação e discussão da Tese ao longo desse Doutorado.

A todos os meus amigos do LEPPAN, em especial, Jorge Casé e Alexandro Medeiros; a meus colegas do PPGG, Pamela Stevens, Petrúcio (Cariri), Nayana Figueiredo (*in memoriam*), Ana Paula, Mariana, enfim, a todos que fizeram parte desta jornada.

Aos amigos do LEGAT, Cecilia, Francisco, Karina, Thiago, Andréa, Raquel, Camila e todos os outros alunos que passaram nesse ambiente de estudo.

Aos professores Celso, Victor, José Guimarães e Bartolomeu, pelas valorosas contribuições para a melhoria desta Tese de Doutorado.

Agradeço a CAPES pela a bolsa concedida ao longo do doutorado.

A FUNCEME, ANA, CPRM, UFPB, pelo o apoio à realização desta pesquisa.

A todos que me ajudaram direta ou indiretamente na realização desse trabalho. De forma geral, a todos que sempre estiveram ao longo da minha vida ao meu lado.

Não sei, só sei que foi assim!
(Em: O Auto da Compadecida)
Ariano Suassuna.

RESUMO

A região semiárida do Nordeste do Brasil constitui-se numa região marcada pela a escassez de recursos hídricos, decorrente de chuvas irregulares, altas taxas de evapotranspiração e solos rasos com pouca capacidade de armazenagem de água em aquíferos. Neste contexto, compreender a hidrologia, o solo, a geologia e a pedologia são essenciais para entender as áreas diferentes regiões do Nordeste. Essa região apresenta diferentes tipos de clima, diversidade ecológica e geológica. A região Nordeste é formada por dois contextos hidrogeológicos: (a) embasamento cristalino (52,3%), com rochas praticamente impermeáveis, e (b) bacia sedimentar, como rochas sedimentares (47,6%) onde ocorrem importantes aquíferos. Assim, conhecer as características da geologia é desmitificar os efeitos das secas que abrange essa região. Nesse sentido, o objetivo deste estudo é analisar a influência das ilhas hidro-pedo-geológicas na disponibilidade de água no semiárido do Nordeste com aplicação de modelagem hidrológica na Bacia do Rio Salgado. Neste trabalho, foram utilizados os seguintes procedimentos metodológicos: (a) visitas *in loco* nas diversas bacias hidrográficas no Nordeste do Brasil, para se analisar diferenças hidrológicas e geológicas, e (b) técnicas de modelagem hidrológica utilizando o modelo matemático *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para analisar o balanço hídrico de água no solo nas porções cristalina e sedimentar. Os resultados do balanço hídrico foram analisados para entender a influência da infiltração e do escoamento superficial em diferentes formações geológica do semiárido do Nordeste do Brasil. Com base nos resultados obtidos, o estudo confirmou que existem “ilhas” hidro-pedo-geológicas em diversas porções da região Semiárida do Nordeste do Brasil.

Palavras-chave: Hidrogeologia, hidrogeografia, modelagem hidrológica, trabalho de campo, semiárido.

ABSTRACT

The semi-arid region of Northeast Brazil is a region marked by the scarcity of water resources, due to irregular rains, high rates of evapotranspiration and shallow soils with little water storage capacity in aquifers. In this context, understanding hydrology, soil, geology and pedology are essential to understanding the different areas of the Northeast. This region has different types of climate, ecological and geological diversity. The Northeast region is formed by two hydrogeological contexts: (a) crystalline basement (52.3%), with virtually impermeable rocks, and (b) sedimentary basin, such as sedimentary rocks (47.6%) where important aquifers occur. Thus, knowing the characteristics of geology is to demystify the effects of droughts that cover this region. In this sense, the objective of this study is to analyze the influence of hydro-pedo-geological islands on the availability of water in the semi-arid region of the Northeast with the application of hydrological modeling in the Salgado River Basin. In this work, the following methodological procedures were used: (a) on-site visits in the different hydrographic basins in Northeast Brazil, to analyze hydrological and geological differences, and (b) hydrological modeling techniques using the Soil and Water Assessment Tool mathematical model (SWAT), which uses physical parameters of the soil, precipitation, flow and other elements of the hydrological cycle to analyze the water balance in the soil in the crystalline and sedimentary portions. The results of the water balance were analyzed to understand the influence of infiltration and runoff in different geological formations in the semiarid region of Northeast Brazil. Based on the results obtained, the study confirmed that there are hydro-pedo-geological “islands” in several portions of the Semi-arid region of Northeast Brazil.

Keywords: Hydrogeology, hydrogeography, hydrological modeling, field trip, semi-arid.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 17

1.1 Justificativa *19*

1.2 Hipóteses do Estudo *22*

1.3 Objetivos *23*

1.3.1 Objetivo Geral *23*

1.3.2 Objetivos Específicos *23*

1.4 Estruturação *23*

CAPÍTULO I 25

O SEMIÁRIDO NORDESTINO E AS ILHAS HIDRO-PEDO-GEOLÓGICAS 25

1. ASPECTOS FÍSICOS DO SEMIÁRIDO NORDESTINO 25

2. A HIDRO-PEDO-GEOLOGIA DO SEMIÁRIDO 31

2.1 Terrenos Cristalinos *34*

2.2 Bacias Sedimentares *34*

2.3 Bacias Interiores *34*

2.4 Bacia do Araripe *35*

2.5 Bacias de Iguatu/Malhada Vermelha/Lima Campos/Icó *37*

2.6 Bacias Lavras de Mangabeira *37*

2.7 Bacias de Coronel João Pessoa/Marrecas/Pau dos Ferros *37*

2.8 Cobertura Serra dos Martins *38*

2.9 Bacia Rio do Peixe *38*

2.10 Bacia de Cedro *38*

2.11 Bacia de São José do Belmonte *38*

2.12 Bacia de Mirandiba/Carnaubeira/Betânia/Fátima *39*

2.13 Bacia do Recôncavo/Tucano *39*

2.14 Bacia Jatobá *39*

2.15 Bacia Potiguar *42*

2.16 Bacia do Parnaíba *44*

2.17 Aquífero Serra Grande..... *44*

2.18 Aquífero Cabeça..... *45*

2.19 Sistema Poti-Piauí..... *45*

3. A GEOGRAFIA DAS ILHAS HIDRO-PEDO-GEOLÓGICAS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO 45

4. AS SECAS NO SEMIÁRIDO DO BRASIL 49

5. O CICLO HIDROLÓGICO 53

5.2 Processos Hidrológicos em Regiões Semiáridas *56*

6. MODELAGEM HIDROLÓGICA 58

7. INTEGRAÇÃO ENTRE MODELOS HIDROLÓGICOS E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS 60

CAPÍTULO II A ÁREA DO ESTUDO DE CASO: A BACIA DO RIO SALGADO 62

1. DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA BACIA DO RIO SALGADO..... 62

1.1 Geologia e Clima *65*

1.2 Solos e Relevo *66*

1.3 Uso do solo e da terra..... *66*

1.4 Águas Superficiais..... *68*

1.5 Águas subterrâneas..... *71*

CAPÍTULO III PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 77

1. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA HIDROPEDOGEOLÓGICA NO BALANÇO HÍDRICO 77

1.1 Identificação e Caracterização das Zonas de Profunda Aridez no Semiárido Devido às Limitações Físicas..... *77*

1.2 O Modelo SWAT..... *77*

1.2.1 Dados de Entrada do Modelo SWAT..... *81*

1.3 Dados de Entrada do Modelo SWAT *82*

1.4 Parametrização do Banco de Dados do Modelo SWAT *83*

1.4.1 Modelo Digital de Elevação *84*

1.4.2 Uso e ocupação do solo *84*

1.4.3 Mapa e parâmetros do solo *86*

1.4.4 Dados climáticos e de vazão observados *89*

1.4.1 Gerador Climático *92*

1.4.2 Unidades de Resposta Hidrológica *93*

1.4.3 Calibração e sensibilidade dos parâmetros *94*

1.4.4 Índices de Desempenho Para Validação do Modelo SWAT *98*

CAPÍTULO IV APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO 99

1. ANÁLISE DA SEMIARIDEZ CLIMÁTICA DO SEMIÁRIDO DO NORDESTE 99

2. ANÁLISE *IN LOCO* DAS ILHAS HIDRO-PEDO-GEOLÓGICAS 105

2.1 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da bacia do Alto Rio Paraíba *105*

2.2 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da bacia do Rio do Peixe *106*

2.2.1 Comportamento da vazão na Bacia do Rio do Peixe *110*

2.3 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da bacia sedimentar do Araripe *112*

2.4 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da Região de Picos *116*

2.5 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da Região de Campo Maior *117*

2.6 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da Região da Serra de Ibiapaba *117*

2.7 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da Bacia do Rio Moxotó *122*

3. AJUSTE DOS PARÂMETROS DA MODEGEM HIDROLÓGICA: O CASO DA ILHA HIDRO-PEDO-GEOLÓGICAS DA BACIA DO RIO SALGADO 128

3.1 Modelagem Hidrológica para o Posto Icó *128*

3.2 Modelagem Hidrológica para o Posto Lapinha *129*

3.3 Modelagem Hidrológica para o Posto Podimirim *130*

3.4 Análise do Espaço Temporal do Balanço Hídrico de Água no Solo na Bacia do Rio Salgado 132

CONSIDERÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES 141

REFERÊNCIAS 142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delimitação da região semiárida do Brasil. 27

Figura 2 – Províncias hidrogeológicas do Nordeste. 32

Figura 3 – Domínios de rochas cristalinas e rochas sedimentares e respectivas bacias sedimentares do semiárido do Nordeste. 33

Figura 4 – Representação esquemática das unidades estratigráficas da bacia do Araripe e suas conotações hidrogeológicas. 36

Figura 5 – Mapa dos domínios hidrogeológicos na região Semiárida do Nordeste do Brasil. 48

Figura 6 – Representação esquemática do ciclo hidrológico. 54

Figura 7 – Localização da sub-bacia do Rio Salgado, no estado do Ceará. 63

Figura 8 – Municípios inseridos na bacia hidrográfica do Rio Salgado e seus principais afluentes. 64

Figura 9 – Mapa geológico da bacia hidrográfica do Rio Salgado. 65

Figura 10 – Classes de vegetação existentes na bacia hidrográfica do Rio Salgado. 67

Figura 11 – Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do Rio Salgado..... 68

Figura 12 – Capacidade percentual de acumulação de água em cada bacia hidrográfica do estado do Ceará. 69

Figura 13 – Principais reservatórios da bacia hidrográfica do Rio Salgado. 70

Figura 14 – Localização dos principais sistemas aquíferos da bacia hidrográfica do Rio Salgado. 71

Figura 15 – Tipos de captação de água subterrânea, cadastrados na sub-bacia do Salgado 72

Figura 16 – Distribuição espacial dos pontos d'água cadastrados da bacia hidrográfica do Rio Salgado. 73

Figura 17 – Origem do modelo SWAT. 80

Figura 18 – Dados de entrada no SWAT e resumo dos processos. 81

Figura 19 – MDE utilizado para a delimitação automatizada das sub-bacias no modelo SWAT. 85

Figura 20 – Distribuição espacial dos postos fluviométricos, pluviométricos e estação climatológica na bacia do Rio Salgado usados neste estudo. 90

Figura 21 – Ilustração conceitual da relação entre as incertezas dos parâmetros e a incerteza na simulação. 95

Figura 22 – Distribuição espacial da precipitação no Semiárido Nordestino..... 100

Figura 23 – Mapa das formações com potencialidades aquíferas e localização geográfica dos poços com vazões acima de 100 m³/h no Semiárido. 103

Figura 24 – Vazões dos poços e precipitações no Semiárido. 104

Figura 25 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio do Peixe no estado da Paraíba. 106

Figura 26 – Precipitação média anual na bacia hidrográfica do Rio do Peixe. 107

Figura 27 – Mapa geológico bacia hidrográfica do Rio do Peixe. 108

Figura 28 – Localização geográfica dos postos fluviométricos Antenor Navarro e Aparecida e as declividades da bacia hidrográfica do Rio do Peixe. 109

Figura 29 – Poço jorrante localizado na bacia sedimentar do Peixe. 110

Figura 30 – Hidrograma e hietograma observados entre 2005–2014 para os postos: (a) Antenor Navarro e (b) Aparecida. 111

Figura 31 – Mapa geológico da bacia hidrográfica do Rio do Peixe. 112

Figura 32 – Localização da bacia sedimentar do Araripe. 113

Figura 33 – (a) Imagem de plantação de café e (b) instalação de torres de energia eólica na região da bacia do Araripe. 114

Figura 34 – Formação litológica da bacia sedimentar do Araripe. 115

Figura 35 – Sobreposição entre a distribuição espacial da precipitação e as vazões dos poços na bacia sedimentar do Araripe. 115

Figura 36 – Detalhes da Formação Pimenteiras na região de Picos, no Piauí. 116

Figura 37 – Formação geológica e nascente de água subterrânea, na região de Campo Maior, no Piauí. 117

Figura 38 – Perímetro de irrigação do Açude Araras, no município de Varjota, no Ceará. 118

Figura 39 – Vista do Canal da Integração, no município de Morada Nova, Ceará. 119

Figura 40 – Vista parcial do Rio Jaguaribe, no município de Limoeiro do Norte, Ceará. 120

Figura 41 – Vista parcial de uma plantação de arroz no município de Limoeiro do Norte, Ceará. 121

Figura 42 – Vista parcial da Chapada do Apodi, na cidade de Tabuleiro, Ceará. 122

Figura 43 – Hidrogeologia da bacia hidrográfica do Rio Moxotó. 123

Figura 44 – Interpolação espacial das vazões dos poços da bacia hidrográfica do Rio Moxotó, em Pernambuco..... 124

Figura 45 – Sobreposição da pluviometria e vazões dos poços da bacia hidrográfica do Rio Moxotó, em Pernambuco..... 125

Figura 46 – Distribuição espacial da pluviometria da bacia hidrográfica do Rio Moxotó. 126

Figura 47 – Localização geográficas dos poços da bacia hidrográfica do Rio Moxotó.... 127

Figura 48 – Modelagem hidrológica para o posto Icó, para o período entre 1986–2005 (calibração) e 2006–2017 (validação). 129

Figura 49 – Modelagem hidrológica para o posto Lapinha entre 1986–2005 (calibração) e 2006–2017 (validação). 130

Figura 50 – Modelagem hidrológica para o posto Podimirim entre 1986–2005 (calibração) e 2006–2017 (validação). 131

Figura 51 – Distribuição temporal da precipitação na bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017. 132

Figura 52 – Distribuição espacial da precipitação anual média para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017..... 134

Figura 53 – Distribuição espacial da percolação mensal média para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017..... 135

Figura 54 – Distribuição espacial da evapotranspiração potencial anual média para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017. 136

Figura 55 – Distribuição espacial da quantidade de água no solo média anual estimada pelo SWAT para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017. 137

Figura 56 – Distribuição espacial do escoamento média mensal estimada pelo SWAT para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017. 138

Figura 57 – Distribuição espacial da produção de água média anual estimada pelo SWAT para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017. 139

Figura 58 – Distribuição espacial e vazões dos poços no cristalino e na área sedimentar na bacia do Rio Salgado. 140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variáveis hidrológicas de bacias hidrográficas do Nordeste 29

Tabela 2. Quantificação das áreas por unidade hidrogeológica na região semiárida do Nordeste do Brasil 47

Tabela 3. Vazões médias dos poços localizados na região semiárida do Nordeste do Brasil 48

Tabela 4. Principais reservatórios da bacia do Rio Salgado e sua capacidade de acumulação 70

Tabela 5. Distribuição dos pontos de água por municípios inseridos na bacia do Rio Salgado 74

Tabela 6. Cálculo da disponibilidade efetiva instalada na bacia do Rio Salgado 76

Tabela 7. Classes de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Salgado e do banco de dados do SWAT. 86

Tabela 8. Classificação hidrológica dos solos para as condições brasileiras proposta por Sartori et al. (2005). 88

Tabela 9. Descrição dos postos da bacia hidrográfica do Rio Salgado utilizados neste estudo 91

Tabela 10. Descrição dos parâmetros físicos do solo, limites e método de alteração no processo de análise de sensibilidade utilizados neste estudo 97

Tabela 11. Classificação da eficiência da modelagem do modelo SWAT por meio da análise do R^2 e Nash 98

Tabela 12. Vazão média dos poços da região semiárida do Nordeste do Brasil 101

Tabela 13. Análise estatística das calibrações e validações para o posto Icó. 128

Tabela 14. Análise estatística das calibrações e validações para o posto Lapinha. 130

Tabela 15. Análise estatística das calibrações e validações para o posto Podimirim. 131

Tabela 16. Valores estatísticos das variáveis hidrológicas do balanço hídrico 133

1. INTRODUÇÃO

As estiagens no Nordeste do Brasil vêm sendo durante muitos períodos, um enorme problema socioeconômico, e ainda são reconhecidas atualmente como graves situações que geram calamidades públicas, desde as duas primeiras décadas do século XX. Desde então até a presente data passaram a ser uma questão tratada por órgãos instituídos para auxiliar na minimização os prejuízos causados pelos eventos de secas sobre a população nordestina (CIRILO, 2008). Das consequências das secas se originaram a Inspetoria de Obras Contra as Secas-IOCS, criada em 1909, e a Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas-IFOCS, instituída, no lugar daquela, em bases mais bem estruturadas no ano de 1919 (SOUZA FILHO, 2003).

Existe atualmente um conceito que todo o semiárido nordestino é caracterizado pela escassez hídrica. Todavia, este estudo discute que nessa região existem grandes áreas com condições climáticas, hidrológicas e pedológicas atípicas a grande porção do semiárido, as chamadas ILHAS "HIDRO-PEDO-GEOLÓGICAS".

Ao longo da última década, a associação entre os grupos de pesquisa Gestão em Água e Território e o grupo Recursos Hídricos, ambos da Universidade Federal da Paraíba, busca entender a distribuição espacial e os mais variados aspectos dos conflitos pelo uso da água no semiárido da Região Nordeste. É o caso deste estudo, onde apresentamos a hipótese de que a região semiárida do Nordeste do Brasil possui em seu espaço geográfico uma série de "ilhas-hidro-pedo-geológicas" que, de certa forma, desmistifica a ideia rígida de que todo o semiárido se caracteriza pela falta de água.

Sabe-se que as águas da Terra encontram-se em permanente movimento, constituindo o assim chamado "Ciclo Hidrológico". Efetivamente, desde os primórdios dos tempos geológicos, a água – liquida ou sólida - que é transformada em vapor pela a energia solar que atinge a superfície da Terra - oceano, mares continentes e ilhas – pela ação da gravidade, bem como pelo tipo e pela a densidade da cobertura vegetal e a transpiração pelos organismos vivos, sobe à atmosfera, onde esfria progressivamente, dando origem às nuvens. Essas massas de água voltam a cair na Terra, sob a ação da gravidade, na forma de chuva, neblina e neve, principalmente.

Em todos os lugares da terra, a presença de água é influenciada por quatro variáveis que controladoras: (a) precipitação (P), que formam um recurso para a vegetação

natural e culturas pluviais, (b) evapotranspiração real (ET), (c) escoamento superficial (R), (d) fluxos de água subterrânea, e (e) recarga de água.

A avaliação das perdas de água por escoamento e evapotranspiração são problemas complexos devido à grande amplitude dessas variáveis tanto no espaço como no tempo (REBOUÇAS, 2006). Dessa forma, torna-se necessário a realização de estudos que analisem as diferentes condições hidrológicas, pedológicas e geológicas do semiárido nordestino e suas diferentes capacidades de produção e escassez de água, para um melhor gerenciamento de água para a população. Essa carência é ainda mais importante nessa região, onde o déficit hídrico é elevado, devido aos altos valores de ET.

Vale ressaltar que, mesmo em regiões com excedente hídrico, a falta de condições geológicas para a formação de reservas importantes de água subterrânea, como ocorre no domínio de rochas cristalinas da zona semiárida do Nordeste do Brasil, pode originar um quadro de rios temporários ou intermitentes durante os períodos de estiagem (DANTAS et al., 2020).

A interação rio-água subterrânea é distinta para diferentes meios litológicos, principalmente devido à dinâmica do fluxo subterrâneo. Aquíferos fraturados são formados por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, onde a circulação da água ocorre em fraturas, aberta devido ao movimento tectônico. A capacidade dessas rochas de acumular água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação que permitem a infiltração e o fluxo da água (REBOUÇAS et al., 2002).

Aquíferos sedimentares são formados por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos não consolidados ou solos arenosos, onde a circulação da água ocorre nos poros entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada (REBOUÇAS et al. 2002). Nesses aquíferos, parte das águas das chuvas recarregam os aquíferos. Em seguida, essas águas fluem em direção às drenagens superficiais, correspondentes às áreas de descarga do aquífero, evidenciando potenciais ganhos hídricos no rio devido ao fluxo de base (FONTENELE, 2010; MENDONÇA, 1996).

Em regiões semiáridas existe uma demanda crescente de água, devido ao crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico, bem como uma redução na disponibilidade hídrica devido às possíveis mudanças climáticas, podendo agravar a escassez de água no futuro (GÜNTNER, 2002).

Regiões semiáridas sofrem frequentemente com chuvas abaixo da média, bem como de secas severas (MONTENEGRO e RAGAB, 2012). De acordo com estudos estatísticos realizados por Frischkorn et al. (2003), a cada década uma seca severa acomete a região semiárida do Nordeste do Brasil.

A hidrologia do semiárido é bastante diferente das regiões úmidas. As chuvas irregulares, os eventuais períodos de seca, o clima e as mudanças de uso da terra, adicionam complexidade à hidrologia de regiões semiáridas. Nesse contexto, compreender a hidrologia sob o clima atual e futuro, bem como sob a influência do uso e ocupação do solo, da geologia, da pedologia são essenciais para determinar as áreas de profunda escassez hídrica no semiárido do Brasil.

Assim, o presente trabalho se propõe a utilizar como área de pesquisa, a Bacia Hidrográfica do Rio Salgado, localizada no alto curso do Rio Jaguaribe para analisar as ilhas "hidro-pedo-geológicas" no contexto da região semiárida do nordeste brasileiro. A bacia do Rio Salgado é composta por duas formações hidrogeológicas: formação sedimentar do Araripe essa formação tem capacidade armazenar e ceder água em quantidade para o aproveitamento do homem, e na formação Cristalina que não forma bons aquíferos, uma vez que os minerais que constituem essa rocha estão fundidos uns aos outros, ou seja, não há poros, pelos menos para fins práticos para acumulação de água. Nesse sentido, pretende-se mostra que existe uma seca hidro-pedo-geológica na bacia hidrográfica do Rio Salgado.

1.1 Justificativa

Em um contexto global, as tentativas dos órgãos públicos para adequar a oferta à demanda mostraram nas mais diversas situações de penúria (superexploração, poluição urbana, entre outros), que a busca de soluções deve ser feita nas esferas locais (bacia hidrográfica, sub-bacias e até micro-bacias) após caracterização dos fatores externos (não influenciáveis) e internos, para que as ações possam ser mais eficientes (REBOUÇAS, 2006). Os recursos hídricos subterrâneos são particularmente solicitados na fase atual do crescimento mundial por causa da sua boa qualidade e da sua relativa proteção com relação às poluições superficiais e, nas regiões áridas, porque são menos sensíveis à evapotranspiração do que os recursos superficiais (CARVALHO, 2012).

A aridez é um conceito climático de forte déficit pluviométrico em relação à evapotranspiração, muitas vezes agravado pela baixa pluviometria anual, e tem referência

espacial (zonas semiáridas), o que a diferencia do conceito de seca, que é temporal. Cerca de 40% das áreas emersas são submetidas a algum grau de aridez e a sua intensidade pode ser definida a partir de índices pluviométricos como o *Standardized Precipitation Index* (MCKEE et al., 1995) ou de índice de aridez (PAULO e PEREIRA, 2006). Nestas regiões, os escoamentos superficiais são fracos e as vezes intensos e irregulares, os processos de erosão dos solos avançados, a vegetação escassa e adaptada aos rigores do clima, e a pluviometria anual é inferior a 50 mm nas regiões hiper-áridas, a 150 mm nas regiões áridas, e a 800 mm nas regiões semiáridas (WILHITE, 1993).

Nas regiões semiáridas, mesmo com um déficit hídrico pronunciado, as chuvas concentradas durante os poucos meses da estação chuvosa são geralmente suficientes para assegurar um ritmo sazonal para a vegetação e para os escoamentos nos rios – o que não é o caso nas regiões hiper-áridas ou áridas. No Nordeste do Brasil o principal nas regiões semiáridas o fator limitante do desenvolvimento é a água (BEZERRA, 2002). Para Campos (2002) isso não se dá pelo volume precipitado, mas sim pela evapotranspiração. As características edafoclimáticas da região são semelhantes às de outras regiões semiáridas quentes do mundo – com seca periódica e cheia nos rios intermitentes ocasionalmente, solos de origem cristalina, arenosos, rasos, salinos e pobres em elementos minerais e matéria orgânica.

A combinação de elevadas taxas de evapotranspiração, solos rasos com pouca capacidade de armazenagem de água em aquíferos, e o caráter concentrado das precipitações anuais leva à caracteriza a condição de clima semiárido, onde predomina o bioma caatinga no país. Portanto, a diferença sazonal da quantidade de água que precipita e que evapotranspira, durante a maior parte do ano, e o excedente hídrico durante o curto período chuvoso são importantes características do clima semiárido no Nordeste brasileiro, que estão associadas a fenômenos como o El Niño/Oscilação Sul e o Dipolo do Atlântico (aquecimento/esfriamento do Atlântico Norte/Sul) (MELO, 1999; ALVES et al., 2006).

Assim, enfrentar os problemas advindos da estiagem no Nordeste tem sido colocado na perspectiva da variabilidade climática, e também pelo fato de secas, sejam nas escalas anuais ou decadais. Neste trabalho, os problemas históricos ligados às secas foram alinhadas dentro de uma perspectiva do problema de armazenamento de água. Pode-se chamar a atenção também que as secas trouxeram enormes problemas e pressões sociais, como por exemplo, os casos de saques tão comuns em décadas passadas (CAMPOS, 1994).

Os períodos de seca ocorridos em 1915, 1932, 1958 e 1970, causaram diversos danos de grande envergadura para milhares de nordestinos residentes no Polígono das Secas, instituído como, território oficial que deveria ser protegido pelo governo. Antes das referidas secas, é preciso lembrar-se da seca do período 1877 e 1880 que foi reconhecidamente marcante pela dimensão dos seus desastres, com uma grande quantidade de óbitos e a dizimação da frágil economia da região (MARENGO et al, 2018).

De acordo com Albuquerque Jr. (2001), a palavra Nordeste foi primeiramente utilizada para criar a área de atuação do IFOCS, que foi criado no ano de 1919. Assim, a região Nordeste foi gerada como a parte do Norte do Brasil que era sujeita a eventos extremos de estiagens, recebendo assim, atenção especial do Estado. A partir de 1920, a separação pela via do discurso regional, entre o Norte e o Nordeste ainda não estava consolidado no aparelho do estado brasileiro.

O Brasil em 2001, com a extinção da SUDENE, iniciou o tratamento e análise de diversas metodologias, como índices de aridez e de secas para a delimitar a região do Semiárido Nordestino. A mais atual delimitacão, ocorrida em 2004/2005, levou-se em consideração os estudos realizados pelo Grupo de Trabalho Interministerial, que era formado por profissionais do Ministério da Integração Nacional, Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, além de outras entidades e instituições estaduais de referência na temática.

Enumera-se, a seguir, os critérios desta nova delimitação (MI, 2005)

i) Limites da isoieta de 800 mm (municípios com precipitação média anual igual ou inferior a 800 mm);

ii) Índice de aridez (municípios com índice situado entre os limites de 0,21 a 0,50);

iii) Déficit hídrico (municípios com déficits hídricos diários iguais ou superiores a 60%).

A vulnerabilidade das populações diante da estiagem, principalmente das populações rurais não beneficiárias da água dos grandes reservatórios, persiste com intensidade semelhante à das primeiras décadas do século passado. Os efeitos das secas são amenizados pelas ações assistenciais, âmbito no qual se contabilizam evoluções

(GUTIÉRREZ et al., 2014). Os benefícios financeiros, no entanto, concedidos ao longo das últimas décadas, sejam eles pagos pelo trabalho nas frentes de emergências (iniciados na década de cinquenta), pelo recente Programa Bolsa-Família ou pelo recém-implantado Seguro Safra, que têm como objetivo resolver problemas contingenciais e emergenciais no setor agrícola e para os pequenos produtores rurais (CASTRO, 2005)

Embora sujeito às secas, os estados do Nordeste ainda não institucionalizaram uma política de ações governamentais de convivência com a semiaridez e mitigação dos efeitos das secas. Isso indica a necessidade de uma política que permita reduzir a vulnerabilidade das populações diante das situações de escassez hídrica, que mantenha o suprimento de água para atendimento das necessidades básicas e das atividades produtivas, e que promova a redução do impacto socioeconômico das secas. A maioria das ações, suscetíveis às mudanças políticas, é desencadeada durante a ocorrência da estiagem, em caráter emergencial (BRAGA, 2004).

Decorrente da permeabilidade baixa das rochas que formam o embasamento cristalino, instalou-se nessa área uma rede de rios densa, que permite a formação de locais adequadas à edificação de açudes. Esses açudes constituem uma reserva hídrica de 31.215 hm^3, e formaram um valor simbólico para a paisagem do sertão nordestino.

As bacias sedimentares presentes no semiárido permitem uma captação anual de aproximadamente 20 bilhões m^3/ano de água subterrânea de boa qualidade, excetuando colocar em risco as reservas existentes. Esse valor é de aproximadamente 60% da capacidade do reservatório de Sobradinho, na Bahia, que é de 34 bilhões de m^3 (REBOUÇAS, 2005).

Assim, compreender o semiárido nordestino através do contexto hidro-pedo-geológico é desmitificar que a região Nordeste como um território homogêneo do ponto de vista climático e das secas recorrentes, mas, sim, de bolsões dentro do seu território com disponibilidade de águas durante todo o ano.

1.2 Hipóteses do Estudo

O semiárido do Nordeste do Brasil não é uma região uniforme e homogênea do ponto de vista da aridez, pois apresenta uma grande diversidade em relação à disponibilidade aos recursos hídricos tanto superficiais como subterrâneos. Do ponto de vista do armazenamento hídrico ele é fragmentado em diversas “zonas” e algumas delas

podem ser caracterizadas como “ilhas hidro-pedo-geológicas” de acumulação hídrica, devido ao fato de sua geologia e dos tipos de solo e não apenas pela condição climática.

Nesse sentido, a hipótese deste estudo é que as características de geologia e tipos de solo no semiárido nordestino são os principais fatores controladores do armazenamento e na disponibilidade de água no semiárido do Nordeste. Assim, aqui essa capacidade de receber, armazenar e disponibilizar água serão aqui tratadas como condições “hidro-pedo-geológicas”.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a influência das ilhas hidro-pedo-geológicas na disponibilidade de água no semiárido do Nordeste com aplicação de modelagem hidrológica na Bacia do Rio Salgado.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analisar as ilhas hidro-pedo-geológicas do semiárido do Nordeste;
- Estimar o escoamento superficial e a percolação da água na bacia hidrográfica do Rio Salgado;
- Identificar as áreas de seca hidro-pedo-geológica na bacia hidrográfica do Rio Salgado;
- Estimar o balanço hídrico da água no solo na bacia hidrográfica do Rio Salgado.

1.4 Estruturação

O trabalho está estruturado, da seguinte forma: se inicia com as considerações principias sobre o tema da pesquisa, o problema a ser estudado e a relação entre a escassez hídrica e as ilhas hidro-pedo-geológicas no Semiárido do Nordeste do Brasil, bem como os objetivos geral e específicos, e a hipótese levantada. No primeiro capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre as ilhas hidro-pedo-geológicas no contexto do semiárido do Nordeste. Expõe-se ainda, a forma como o tema é abordado de acordo com suas principais características ambientais, como o ciclo hidrológico, a caracterização das ilhas hidro-pedo-

geológicas, aspectos físicos do semiárido nordestino brasileiro, secas na região, o balanço hídrico no semiárido, modelagem hidrológica distribuída e integração entre modelos hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas.

O segundo Capítulo consiste na descrição geográfica e caracterização ambiental da região Semiárida, mais precisamente, a área do estudo de caso, a bacia hidrográfica do Rio Salgado. O capítulo três descreve a metodologia e os procedimentos utilizados na escolha da área e os parâmetros trabalhados, apresentando a base de dados utilizada e a forma como os indicativos foram tratados e analisados, relativos a caracterização das zonas de profunda aridez no semiárido devido às limitações físicas e a análise da influência hidro-pedo-geológica no balanço hídrico

No quarto capítulo são exibidos os resultados em forma de mapas, gráficos e tabelas, os quais são discutidos e analisados à luz da fundamentação. Por fim, a seção considerações finais e as sugestões traz as principais conclusões deste estudo e elenca sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO I

O SEMIÁRIDO NORDESTINO E AS ILHAS HIDRO-PEDO-GEOLÓGICAS

1. ASPECTOS FÍSICOS DO SEMIÁRIDO NORDESTINO

A porção semiárida do Nordeste do Brasil é a mais populosa do planeta com essa condição climática, possuindo aproximadamente 27,9 milhões de habitantes. Essa região possui baixa precipitação e uma alta taxa de evapotranspiração como características, resultando em escassez de água para o consumo humano, animal e vegetal (BRITO et al., 2017).

O Semiárido do Brasil recobre uma área de cerca de 1,1 milhão de km², apresenta uma grande diversidade ecológica, cultural, social e econômica. De acordo com a nova delimitação, realizada no ano de 2017, a área oficialmente classificada como a região Semiárida do Brasil possui 1.262 municípios inseridos nos estados de Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e em Minas Gerais (SUDENE, 2017).

As consequências trazidas pela escassez dos recursos hídricos e pela sua exploração insustentável são enormes no semiárido nordestino. A gestão das águas é um dos maiores desafios das regiões áridas e semiáridas do mundo (MARÇAL et al., 2019), onde a escassez de água provoca graves consequências socioeconômicas e ambientais (DE MEDEIROS et al., 2019). Os conflitos inerentes ao uso adequado dos recursos hídricos acentuam-se nos longos períodos de estiagem, ocasionando o confronto entre diversos setores usuários e intensificando a necessidade da racionalização do seu uso (CUNHA et al., 2018).

Ao longo da última década, a associação entre os Grupos de Pesquisa Gestão em Água e Território e Recursos Hídricos, ambos da Universidade Federal da Paraíba, busca entender a distribuição espacial e os mais variados aspectos dos conflitos pelo uso da água no semiárido da Região Nordeste, com enfoque na Paraíba. É o caso deste estudo, onde apresentamos a hipótese de que nosso semiárido possui em seu espaço geográfico, uma série de “ilhas hidro-pedo-geológicas”, que de certa forma desmistifica a ideia rígida de

que todo o semiárido se caracteriza pela falta de água, o que possibilita outras opções no que se refere à gestão dos recursos hídricos locais.

Assim, explorar de forma sustentável os recursos naturais será insuficiente para atender o aumento das demandas da população por esses recursos, pois, na maioria das regiões no qual o recurso água é escasso, grande parte das infraestruturas possíveis já está presentes. Nesse sentido, a gestão hídrica em regiões produtoras de água é vital para o desenvolvimento local e o consumo de água pela população. Portanto, as estimativas são de diminuição da quantidade de água disponível em todas as partes do mundo para as próximas décadas, assim, a garantia da continuidade do abastecimento exige um melhor gerenciamento da água consumida (LOUCKS et al., 2005).

Em todo o planeta, as ações dos órgãos públicos para melhor gerenciar a demanda de água mostraram em muitas situações (superexploração, poluição urbana, entre outros), que a procura por soluções necessita ser realizada de forma ampla e em todas as esferas (locais, regionais e nacionais) para a melhor eficiência das ações (REBOUÇAS, 2006). No que tange as água subterrâneas essas são principalmente necessários para o crescimento mundial em razão da excelente qualidade e também de sua proteção quanto as contaminações superficiais.

A escassez de água já faz parte do cotidiano da população que vive no semiárido nordestino, com volumes de chuva anual média < 800 mm (SANTOS et al., 2019b). Essa precipitação considerada baixa é também irregular, pois se concentra entre três e cinco meses. A semiaridez está presente também em uma pequena porção ao norte de Minas Gerais e em grande parte no Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Nestes seis últimos estados, a região semiárida não atinge a zona litorânea, conhecida como “zona da mata” (Figura 1).

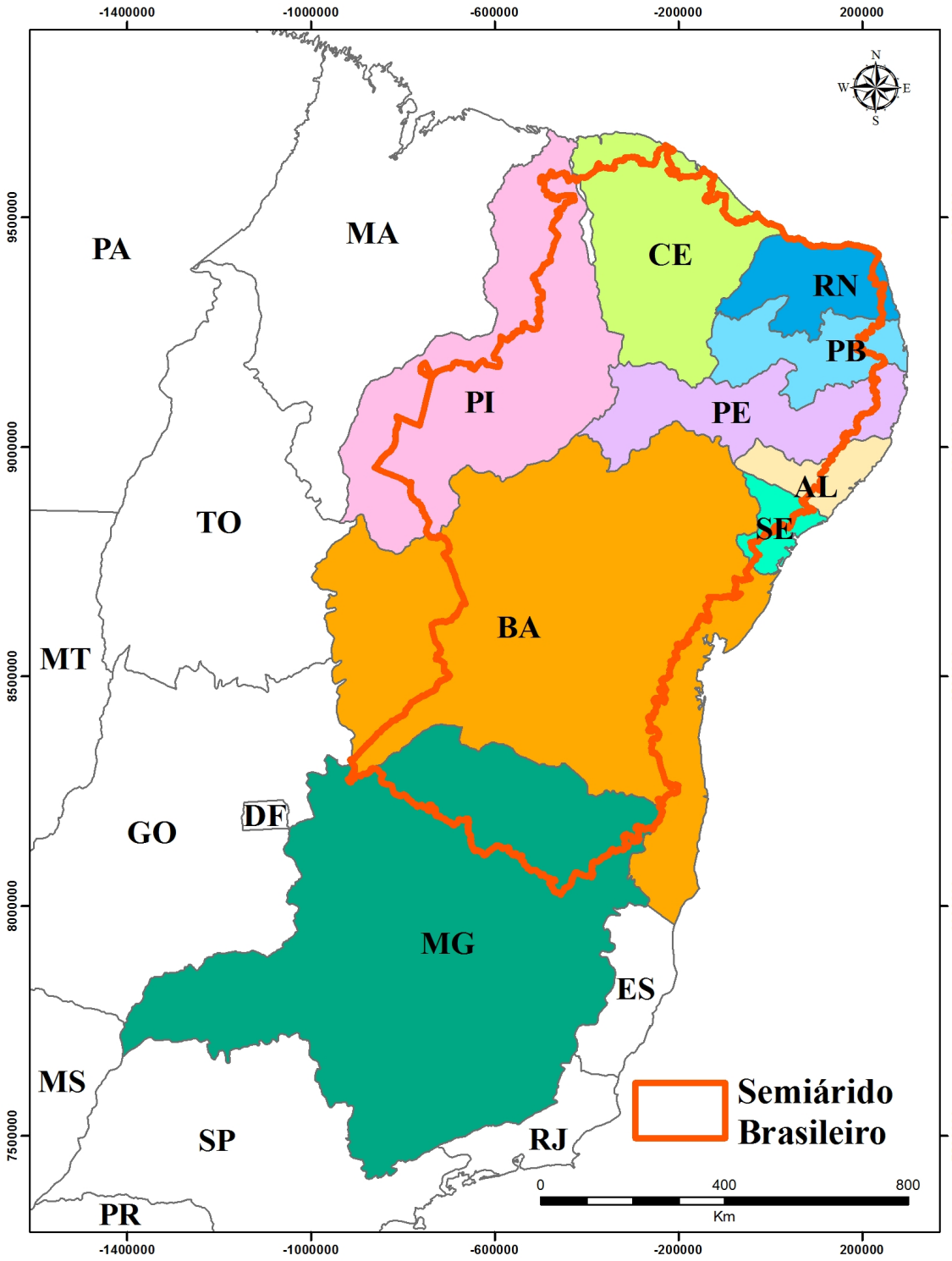


Figura 1 – Delimitação da região semiárida do Brasil .

A disponibilidade de água com qualidade e em quantidade necessária continua a ser um fator inibidor do desenvolvimento da região semiárida do Nordeste do Brasil. As ações para garantir o abastecimento hídrico, como, por exemplo, a construção de reservatórios para armazenamento de água para uso humano, dessedentação animal e irrigação ainda não são, de forma global, suficientes para superar esse entrave. Parte

considerável da população do Nordeste ainda continua vulnerável quando da ocorrência de secas (GUTIÉRREZ et al., 2014. Principalmente no que concerne ao pequeno produtor rural, que não tem água suficiente para irrigação e/ou para a criação de animais e, por vezes, a água é insuficiente até para o abastecimento humano.

Na região semiárida do Nordeste do Brasil, o clima é considerado um dos mais complexos do mundo, principalmente, devido a seu sistema de circulação atmosférica. Essa região sofre com a influência dos fenômenos do sistema oceano-atmosfera, e pela sua proximidade à linha do Equador, o padrão climático é diferente da maioria das regiões semiáridas. As variáveis climáticas como temperatura e índice pluviométrico interferem significativamente na hidrologia da região. A temperatura apresenta certa homogeneidade espacial e a precipitação pluviométrica sofre oscilações, acarretando em períodos de estiagem que podem variar de 9 a 11 meses (SANTOS et al., 2019a).

De acordo com Vieira (1994), devido às elevadas taxas de perdas por evaporação, a eficiência hidrológica dos açudes nessa região é estimada em torno de 20% do volume armazenado. Convém salientar que a evaporação intensa produz processos de salinização cíclica das águas estocadas, os quais são provenientes, em sua grande maioria, da não utilização de critérios de uso e proteção da qualidade das águas acumuladas nos açudes (SANTIAGO et al., 1986). Para melhor quantificar essas informações, a Tabela 1 apresenta os valores das variáveis hidrológicas das principais bacias hidrográficas da região Nordeste.

Vieira (2003) apresenta algumas especificidades regionais do Nordeste e da região semiárida brasileira:

- Precipitação pluvial: no Nordeste, a precipitação média anual é da ordem de 950 mm, enquanto no semiárido é de apenas 650 mm.
- Escoamento superficial: o deflúvio médio anual no Nordeste é de aproximadamente 160 bilhões de m^3, e no semiárido cerca de 90 bilhões de m^3.
- Coeficiente de escoamento: o coeficiente de escoamento superficial no semiárido é muito baixo, variando entre 0,06 a 0,26, com média aproximada de 0,12.

Tabela 1. Variáveis hidrológicas de bacias hidrográficas do Nordeste

Bacias hidrográficas	Área (km²)	Precipitação		Escoamento		Coeficiente de escoamento	Evapotranspiração	
		mm/ ano	hm³/ ano	mm/ ano	hm³/ ano		mm/ ano	hm³/ ano
Tocantins Maranhense	32900	1500	49350	181	5960	0,121	1319	43400
*Gurupí	50600	1840	93104	352	17800	0,191	1488	75304
Mearim-Grajau-Oindare	97000	1550	150350	181	17570	0.117	1369	132780
Itapecuru	54000	1450	78300	172	9300	0,119	1278	690000
Minim-Barreirinha	27700	1750	48475	318	8810	0,182	1432	39665
Parnaíba	330000	1030	339900	122	40120	0,118	908	299780
Acaraú-Coreaú	30500	970	29585	173	5270	0,178	797	24315
Curu	11500	880	10120	205	2360	0,233	675	7760
Fortaleza	14700	990	14553	154	2270	0,156	836	12283
Jaguaribe	72000	790	56880	58	4150	0,073	732	52730
Apodi-Mossoró	15900	710	11289	52	820	0,073	658	10469
Piranhas-Açu	44100	640	28224	62	2720	0.097	578	25504
Leste Potiguar	24440	690	16863,6	69	1680	0,100	621	15183,6
Oriental Paraibano	23760	690	16394,4	92	2190	0,133	598	14204,4
Oriental Pernambuco	25300	1040	26312	171	4330	0,164	869	21982
Bacia Alagoana	17100	1280	21888	180	3080	0,141	1100	18808
*São Francisco	487000	910	443170	84	41100	0,092	826	403070
Vaza-Barris	22330	760	16970,8	54	1200	0,071	706	15770.8
Itapicuru-Real	46100	770	35497	45	2080	0,058	725	33417
Paraguaçu-Salvador	81560	930	75850,8	103	8420	0,111	827	67430,8
Contas-Jequié	62240	870	54148,8	89	5560	0,102	781	48588,8
Pardo-Jequié	42000	1260	52920	170	7160	0,135	1090	45760
*Jequitinhonha	23200	1030	23896	269	6250	0,261	761	17646
*Extremo Sul da Bahia	27300	1320	36036	256	6980	0,194	1064	29056

Nota:(*) Área da Unidade de Planejamento dentro do Nordeste da SUDENE

Fonte : SUDENE (1980) apud Projeto Áridas (1994).

- Evapotranspiração potencial: bastante elevada, variando entre 1400 a 2000 mm.
- Déficit de evapotranspiração potencial: o déficit de evapotranspiração real em relação à evapotranspiração potencial (bom indicador de aridez) varia entre 50 mm até valores superiores a 1000 mm.
- Intermitência dos rios: todas as grandes bacias que constituem a região Nordeste possuem rios intermitentes, à exceção dos rios São Francisco e Parnaíba.

- Vulnerabilidade natural hídrica das bacias: pode ser definida por meio de dois parâmetros: intermitência dos rios e relação entre o déficit de evapotranspiração potencial e precipitação média.
- Frequência de secas: a estatística das grandes secas ocorridas no Nordeste indica 30% de anos secos no século XVIII, 16% de anos secos no século XIX e 23% de anos secos no século XX.
- Variabilidade de deflúvios: as vazões naturais dos rios possuem elevado coeficiente de variação, com valor médio para o semiárido em entorno de 1,4.

Nessa região, o bioma Caatinga abrange 7% do território brasileiro, aproximadamente 734.478 km², sendo que menos de 1% está sob proteção de unidades de conservação (MMA, 2007). A vegetação natural do bioma Caatinga é bastante diversificada por apresentar vários outros ambientes associados. Pode-se dizer que é uma vegetação xeromórfica com plantas adaptadas ao clima, com muitas cactáceas, cutículas altamente impermeáveis e caules suculentos, entre outros mecanismos perdem as folhas na estação das secas (espécies caducifólias), desenvolvidos para reter, armazenar e diminuir a perda de água nos períodos de estiagem (SILVA et al., 2018). Nesse bioma há arvores baixas e arbustos que, em geral, as espécies mais comuns do bioma são: umburana; aroeira; umbu; baraúna; maniçoba; macambira; mandacaru; e juazeiro (MMA, 2007).

Na região semiárida brasileira, localiza-se o Polígono da Secas, que representa um dos mais antigos desafios na área de recursos hídricos no que tange a gestão e a previsão climática. Segundo Campos (2002), a ocorrência de secas se verifica desde antes da chegada dos europeus ao continente, sendo observado mesmo antes da ocupação dos sertões pelos colonizadores europeus.

O Polígono das Secas é um território reconhecido pela a legislação como sujeita a períodos críticos de prolongadas estiagens. Trata-se de uma divisão regional efetuada em termos político-administrativos e não corresponde à zona semiárida, pois apresenta diferentes zonas geográficas, com distintos índices de aridez, abarcando desde áreas com características estritamente de seca, como paisagens típicas de semideserto, a área com balanço hídrico positivo (DANTAS et al., 2020). Situa-se, majoritariamente, na região Nordeste, porém estende-se até o Norte de Minas Gerais (MI, 2005).

2. A HIDRO-PEDO-GEOLOGIA DO SEMIÁRIDO

O entendimento hidrogeológico, que é a base para a gestão das águas subterrâneas, sendo alicerçada por diversas ciências, dentre elas podem-se destacar a geologia e a hidrologia. A ciência geológica analisa a ocorrência da água nas camadas inferiores, definindo limites e compartimentações tridimensionais das unidades aquíferas. Já a hidrologia analisa a circulação da água nos aquíferos, recarga, descarga, variação de nível, dentre outros (FEITOSA, 2008).

No semiárido nordestino existe, atualmente, um conhecimento sobre a geologia na escala 1:250.000, que pode ser considerado bom, permitindo estudar a região de ocorrência de todos os aquíferos presentes na região. Todavia, o entendimento dessas áreas de armazenamento de água, são baseados na análise de poços estratigráficos, entretanto, pela geofísica ainda é pouco utilizado na região (FEITOSA, 2008).

Apesar de não se destacar a potencialidade das águas subterrâneas no semiárido, tal recurso apresenta uma potencialidade igual às águas superficiais. No Estado do Ceará a área total irrigada é cerca de 55 mil há (56% com água de açudes e 44% com água subterrânea) (LEITE, 1996). A presença de água no subsolo é gerida pelas características da geológica e também pelo clima. As áreas formadas por rochas cristalinas apresentam sistemas aquíferos do tipo fissural e com baixa produtividade de água. As melhores condições de armazenamento dos recursos hídricos subterrâneos estão presentes nas bacias sedimentares.

Rebouças (2005) mostra que o semiárido nordestino tem um potencial hidrogeológico de 1 milhão de m^3/ano nas áreas que compõem o embasamento cristalino. Nas áreas sedimentares, esse potencial da ordem de 20 bilhões de m^3/ano, de água subterrânea de boa qualidade. Este fato não teria grandes consequências se as distribuições dos aquíferos fossem igualitárias.

No entanto, os ambientes de domínio cristalino ocupam cerca de 511.827 km^2 (52,3 %) do semiárido, tornando-se quase sempre a única alternativa viável de exploração da população que vive nas áreas rurais. Nestas regiões, muitas vezes, durante os períodos críticos, as populações se valem das águas extraídas dos poços rasos construídos nos aluviões, que constituem-se um verdadeiro oásis, assumindo importância vital para o abastecimento humano e a dessedentação animal, bem como para a irrigação de pequenas plantações. Estima-se que as manchas aluvionares depositados ao longo de riachos e rios

da região semiárida não ultrapassem 35.000 km² (LOPES et al., 2013). Em virtude da geologia, características cronológicas e similaridades da região Nordeste, a ocorrência de águas subterrâneas, podem ser divididas em 3 conjuntos de rochas que formam áreas hidrogeologicamente homogêneas (Figura 2).

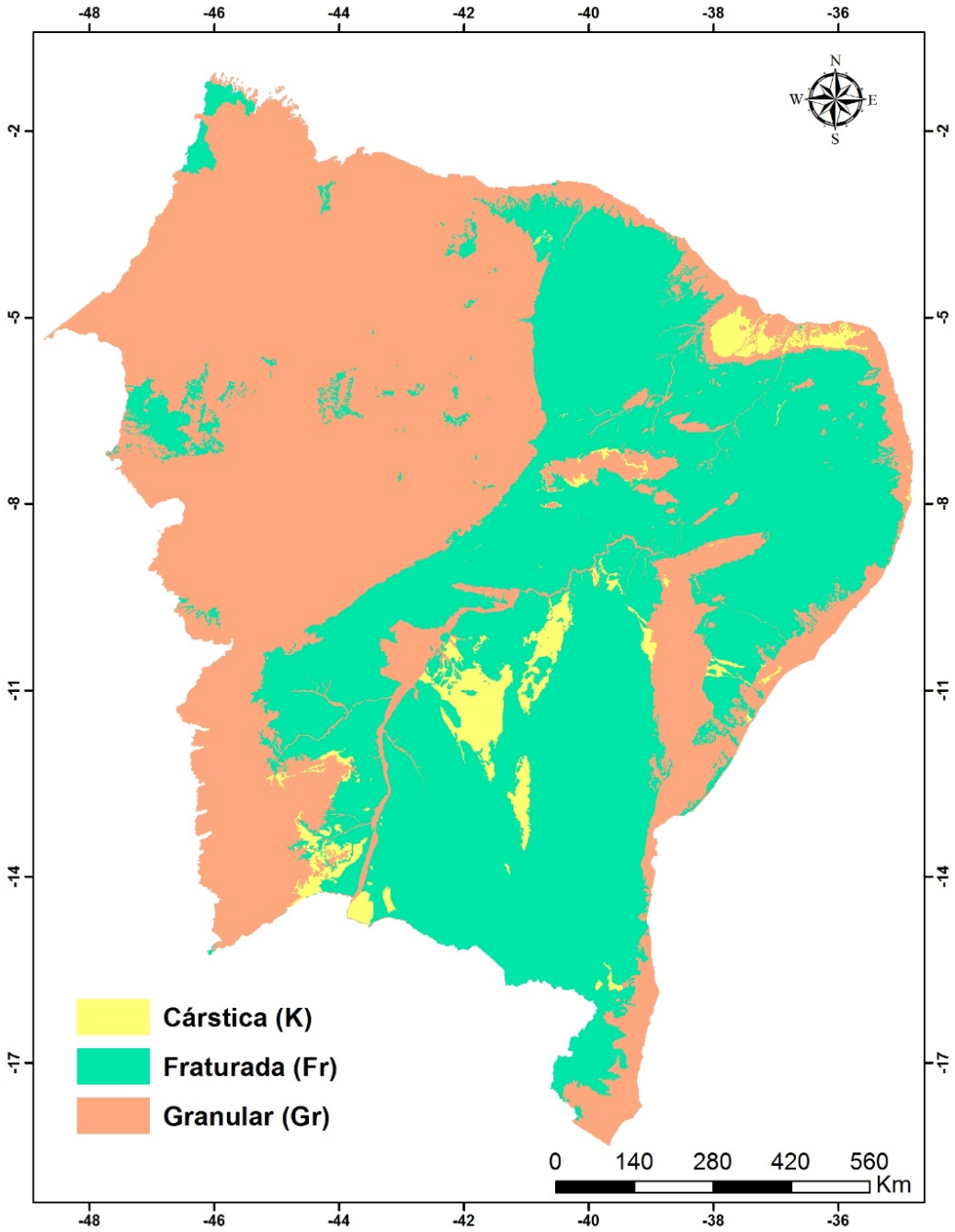


Figura 2 – Províncias hidrogeológicas do Nordeste.

Devido à área de estudo está localizada no semiárido brasileiro, analisamos o agrupamento das constituições da Geologia com a presença de água no subsolo, com base no conceito de litopermeabilidade. Assim, podemos mostrar as águas subterrâneas do semiárido divididas em dois grandes domínios no semiárido do Brasil: rochas cristalinas e rochas sedimentares. Para melhor representar geograficamente as bacias sedimentares, a Figura 3 apresenta as principais bacias sedimentares do semiárido brasileiro.

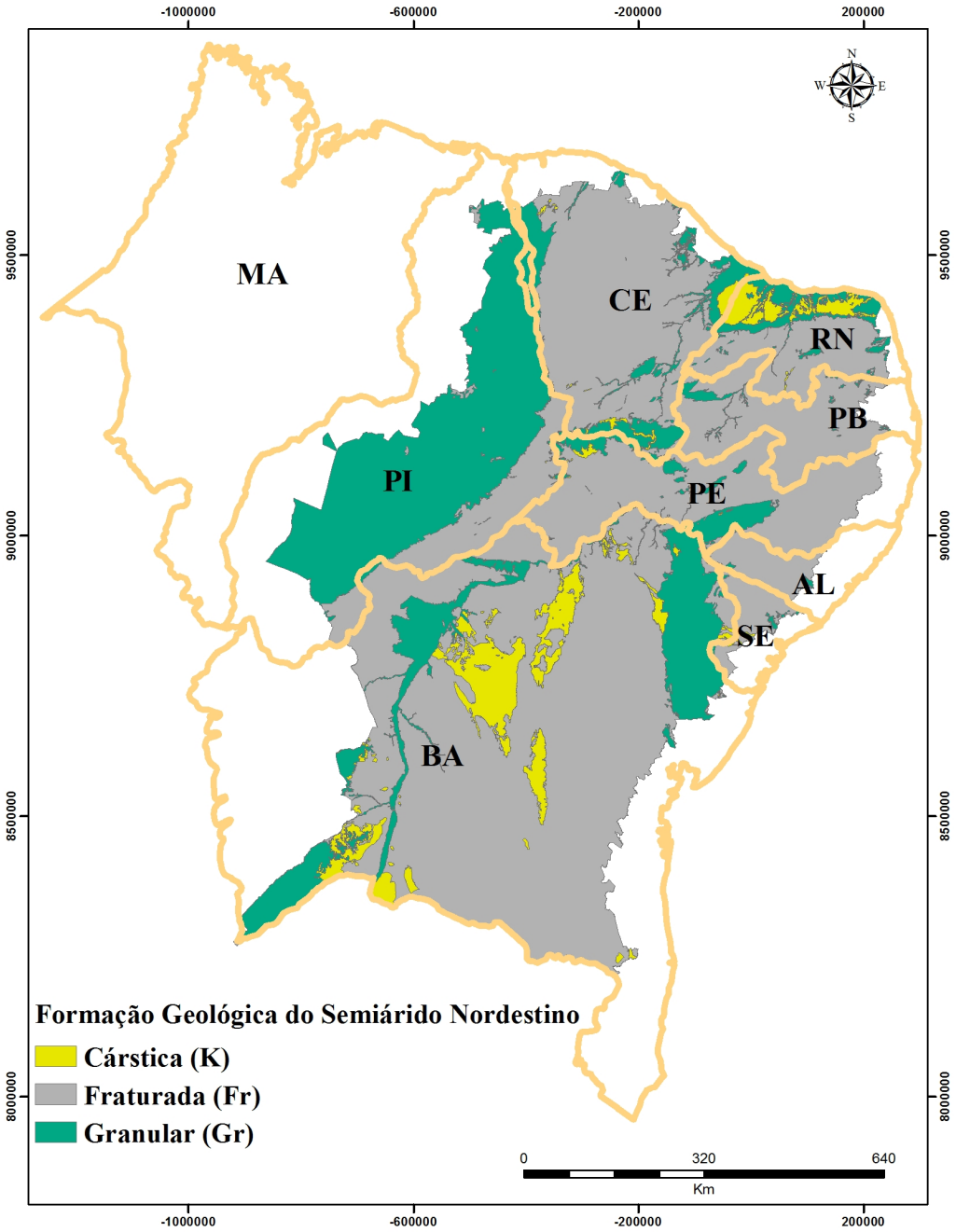


Figura 3 – Domínios de rochas cristalinas e rochas sedimentares e respectivas bacias sedimentares do semiárido do Nordeste.

2.1 Terrenos Cristalinos

O semiárido tem grande parte do seu subsolo constituído por rochas ígneas e metamórficas, genericamente chamadas cristalinas, da era pré-cambriana. No semiárido, a pequena presença de vegetação e a pouca espessura pedológica acarretam em um geosistema que pode ser considerado frágil, com características naturais que diminuem seu potencial produtivo (TORRES et al., 2017).

No embasamento cristalino, as águas nas camadas inferiores ocorrem em fendas e fraturas conectadas e descontínuas na região. Essas características criam áreas descontínuas no espaço que armazenam água na região (MONTENEGRO et al., 2003). O uso dessas reservas sempre está associado a situações de risco, uma vez que não se pode determinar com segurança um valor mínimo de escoamento da explotação. Porém, as águas subterrâneas vêm sendo usadas no semiárido a partir de meados do século XX, e há poços produzindo sem interrupção a partir de sua perfuração. Segundo Andrade et al. (2012), nessas situações, os aquíferos livres, na sua maioria, e as altas condutividades hidráulicas juntamente com as fraturas, fendas, etc. (descontinuidades) toleram uma recarga rápida e direta, propiciando condições para a explotação, que somente são mudadas em anos consecutivos de estiagem.

2.2 Bacias Sedimentares

Diferentemente das rochas do embasamento cristalino, essas bacias mostram uma excelente condição hidrogeológica e são aquelas onde existem os maiores volumes de água nas camadas subterrâneas armazenadas nessa região.

2.3 Bacias Interiores

Essas bacias estão distribuída em toda a região semiárida onde se encontram os terrenos cristalinos. Entretanto, nessa região existem pequenas porções com rochas sedimentares que podem juntar água mais expressivamente que as rochas cristalinas que as margeiam. Em virtude das condições permissíveis para a existência de água no interior da terra, essas tênues bacias são de extrema importância, quando consideramos a água e a variabilidade do clima da região. Essas bacias têm mostrado potenciais hidrogeológicos considerados bons em alguns casos, servindo relativamente bem às demandas locais.

2.3.1 Bacia do Araripe

Essa bacia está situada na bacia do Rio Jaguaribe. A bacia sedimentar do Araripe tem uma área de aproximadamente 11.000 km², abrangendo porções de Pernambuco, Ceará e Piauí, sendo um divisor das bacias dos rios Jaguaribe (CE) ao norte, São Francisco (PE) ao sul e Parnaíba (PI) a oeste. Nessa bacia, a água subterrânea é a mais relevante fonte de recurso hídrico utilizado pela população. A precipitação nessa região é típica de uma região tropical, apresentando duas estações (chuvoso e seco). O primeiro período se inicia no verão e atinge o seu auge na transição verão-outono. As chuvas registradas mostram precipitação anual média de aproximadamente 940 mm/ano, com os valores mais altos ocorrendo entre janeiro e abril, e tendo os mais baixos de junho a novembro (KIMURA, 2003).

Na parte pedológica, a bacia sedimentar do Araripe é formada pelos os seguintes solos de acordo com o estudo realizado pela IPLANCE (1997): (a) Latossolos Vermelho-Amarelo, (b) Argissolos Vermelho-Amarelo, (c) Neossolos Fluvico, e (d) Neossolos Litólicos. De acordo com IPLANCE (1997), o relevo da bacia possui duas formas predominantes: (a) Planalto Sedimentar (Chapada do Araripe), e (b) Depressão Periférica do Ceará.

A CPRM (2005) divide essa bacia em 3 domínios geomorfológicos, a saber: Zona de Chapada, Zona de Talude e Zona de Pediplano. Essa compartimentação é devido às características típicas da litologia, relevo, clima, hidrografia e vegetação.

No contexto geológico e estrutural essa bacia sedimentar está localizada sobre os terrenos pré-cambrianos da Província Borborema, lateralmente ao Lineamento da Paraíba (PONTE et al, 1996), um significante cinturão de cisalhamento do Nordeste, mais precisamente na região de fronteira entre o Ceará, Pernambuco, Piauí e Paraíba. O embasamento cristalino pré-cambriano é concebido por unidades litoestratigráficas do Arqueano ao Proterozóico Superior (RIBEIRO, 1995).

Na divisão hidrogeológica, essa bacia é dividida em três sistemas aquíferos principais: Aquífero Superior (formações Exu e Arajara); Aquífero Médio (formações Rio da Batateira, Abaiara e Missão Velha), e Aquífero Inferior (Formação Mauriti e parte basal da Formação Brejo Santo). Os depósitos sedimentares dessa bacia representam diferentes unidades hidroestratigráficas, que são baseadas nas suas propriedades hidrodinâmicas.

Assim, os aquíferos e aquitardos na bacia são, em geral, coincidentes com seus representantes estratigráficos (Figura 4). A principal unidade aquífera que garante o fornecimento de água na área de estudo é coincidente aos arenitos da Formação Missão Velha, definido como pertencente ao Sistema Aquífero Médio (DNPM, 1996).

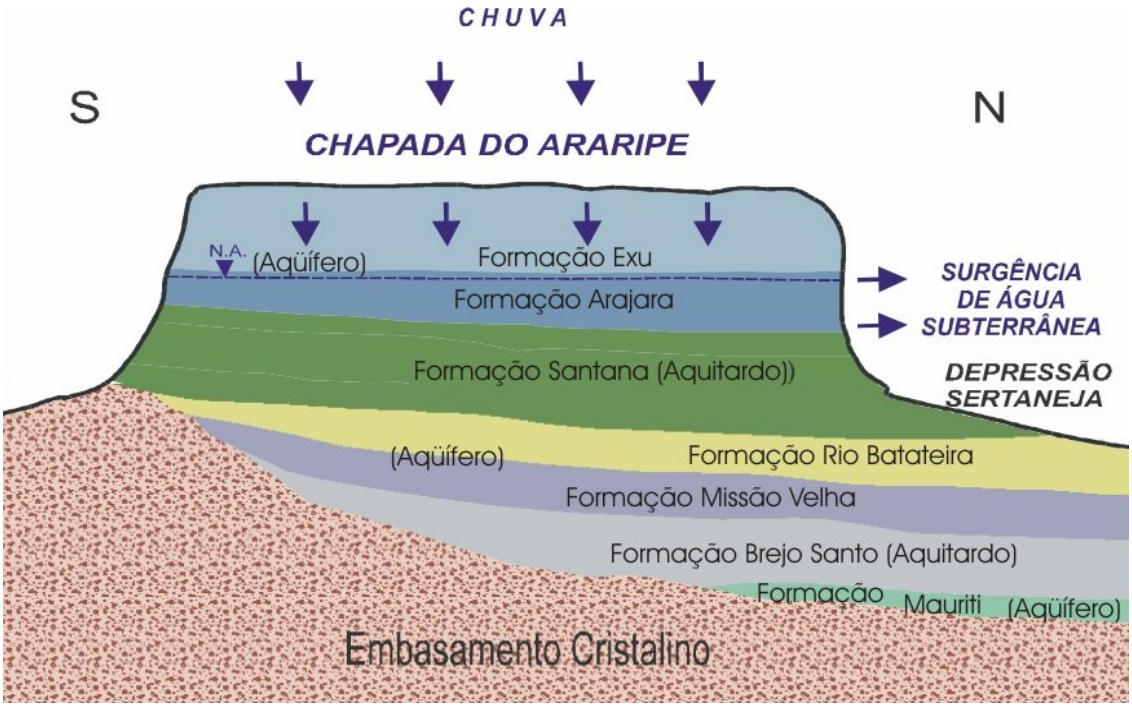


Figura 4 – Representação esquemática das unidades estratigráficas da bacia do Araripe e suas conotações hidrogeológicas.
Fonte: COGERH (2018).

Baseado em Ponte (1993) *apud* DNPM (1996), os vários perfis sísmicos feitos na área confirmam uma espessura média de sedimentos de 295 m na sub-bacia do Cariri, no Ceará (Sistema Aquífero Médio) para uma área de 2.830 km². A recarga desse aquífero é advinda de cerca de 98% de água da chuva que infiltra no solo, e também das provenientes de surgências de águas subterrâneas (2%), totalizando aproximadamente 112×10^6 m³/ano (para as reservas reguladoras, em uma área de recarga de 2.100 km²) (DNPM, 1996). De acordo com CPRM (2005), a descarga do Sistema Aquífero Médio ocorre, sobretudo, pelo bombeamento de profundos poços tubulares, que totalizam uma vazão de cerca de 40×10^6 m³/ano na sub-bacia do Cariri.

As reservas de água subterrânea são divididas entre contínuas e reguladoras. As contínuas representam os volumes de água acumulados que independem da sazonalidade, enquanto as reguladoras é o volume de água renovável a cada período anual ou interanual,

o que corresponde à recarga do aquífero. As reservas reguladoras são calculadas em 112×10^6 m^3/ano, e totalizam somente 0,13% das reservas permanentes.

No que tange o volume de sedimentos para esse aquífero, segundo a CPRM (2005) foi da aproximadamente 833×10^9 m², distribuídos em 2.830 km², tendo uma espessura mediana de cerca de 295 m, usando um coeficiente de armazenamento de 2×10^{-4}, e porosidade efetiva de 10%, obtidas mediante as equações específicas:

- $Rp_1= 2.83x10^9\times295\times210^{-4} = 166,9\times10^6$ m³ (Aquífero confinado);
- $Rp_2= 2,83x10^9 \times 295\times0,1= 83,48\times10^9$ m³ (Aquífero livre);
- $Rp = Rp_1 + Rp_2 = 166,9x10^6 \times 83,48\times10^9 = 83,65x10^9$ m³.

2.5 Bacias de Iguatu/Malhada Vermelha/Lima Campos/Icó

Essa bacia é composta por quatro pequenas bacias situadas na porção sudeste do Ceará e ocupa uma área de 1.000 km². Os sedimentos existentes nessa bacia são formados por clásticos com formações areno-argilosas não consolidadas (SIVA e SCARDIA, 2016). Os poços são perfurados indiscriminadamente em várias unidades litológicas, geralmente com profundidades < 100 m. Todavia, a explotação de água é pequena na região, devido ao fato da enorme oferta de água nessa região, como o reservatório Orós.

2.6 Bacia Lavras de Mangabeira

Essa bacia representa é formada por 3 pequenas bacias localizadas na porção sudeste do Ceará, e possui área de 60,27 km². Os aquíferos Serrote do Limoeiro e Iborepi representam boa potencialidade para o uso de águas subterrâneas. CPRM/UFC (2008) realizou estudos executados para estudara a potencialidade nessa bacia e os resultados obtidos mostraram que é $4,6\times10^6$ m^3/ano, como uma disponibilidade média de aproximadamente 1×10^6 m^3/ano.

2.7 Bacias de Coronel João Pessoa/Marrecas/Pau dos Ferros

Essas bacia podem ser consideradas como pequenas, pois, possuem áreas de 16,27 e 65 km², respectivamente. As bacias de Coronel João Pessoa/Marrecas/Pau dos Ferros estão inseridas no setor oeste do Rio Grande do Norte, e são constituídas em sua maior parte por sedimentos constituídos de arenitos finos a grossos, siltitos e argilitos da

Formação Antenor Navarro. Mesmo devido a falta de trabalhos sobre poços e água subterrâneas, considera-se que nas zonas arenosas dessas bacias, assim como em outras bacias, esses reservatórios podem apresentar potencial hidrogeológico entre baixo e médio.

2.8 Cobertura Serra dos Martins

Essa bacia possui uma área de 405 km² e está inserida no Rio Grande do Norte, mais precisamente na porção centro-sudoeste. A Cobertura Serra dos Martins é formada por arenitos de granulometria média. Essa bacia é considerada como uma bacia sedimentar, mas sim uma cobertura terciária.

2.9 Bacia Rio do Peixe

A bacia sedimentar do Rio do Peixe área é de 1.300 km² e está inserida na porção noroeste da Paraíba (NASCIMENTO et al., 2018). Essa bacia é preenchida pelas formações Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas, que são formadas por arenitos finos a grossos, siltitos, argilitos, folhelhos, e arenitos calcíferos, (LIMA FILHO, 1991). Esta estratigrafia condiciona a existência de dois aquíferos, o Rio Piranhas e o Antenor Navarro, que são separados pelo aquitardo Sousa (BRANDÃO, 2005). De acordo com CPRM/UFCG (2008), que realizaram estudos a cerca da recarga durante os anos de 2005 e 2006, e indicaram uma potencialidade de 55×10^6 m^3/ano e outra disponibilidade entre 27 e 33×10^6 m^3/ano.

2.10 Bacia de Cedro

A bacia de Cedro possui área geográfica de 168 km² e inserida na porção noroeste de Pernambuco. Essa bacia é formada pela Formação Mauriti, que possui comportamento hidrogeológico similar a da bacia do Rio do Peixe. Quanto ao potencial hídrico dessa bacia, pode-se ressaltar que não há informações estudos detalhados acerca esta região, e para Costa Filho e Costa (2008) o potencial deve ser baixo.

2.11 Bacia de São José do Belmonte

A bacia de São José do Belmonte possui área de 755 km^2, está localizada na porção centro-norte de Pernambuco, e o aquífero predominante é a formação Tacaratu,

que é formada por arenitos médios a grosseiros, heterogêneos, com níveis caulínicos e forte diagênese. Essa bacia mostra um desempenho das águas subterrâneas considerado heterogêneo, pois apresenta extrema variação de produtividade dos poços perfurados neste aquífero (de 1,0 a > 50,0 m³/h).

2.12 Bacia de Mirandiba/Carnaubeira/Betânia/Fátima

Estas bacias estão localizadas na porção central do estado de Pernambuco e apresentam as seguintes dimensões: 143, 136, 280 e 270 km², respectivamente; o potencial hidrogeológico, em todas elas, está representado pela Formação Tacaratu. Esta unidade geológica é constituída de arenitos médios a grosseiros, heterogêneos, com níveis caulínicos e forte diagênese e comportamento similar ao aquífero Mauriti, em termos de ocorrência e fluxo da água subterrânea. O conhecimento ainda é incipiente e se pode considerar um potencial de baixo a médio. Em alguns casos, é possível obter poços com boas produtividades em torno de 30 $m^3 h^{-1}$ (SILVA et al., 2010).

2.13 Bacia do Recôncavo/Tucano

Essas bacias sedimentares do Recôncavo e Tucano cobrem uma área de cerca de 50.000 km², distribuída desde o litoral baiano (bacia do Recôncavo), até o limite estadual entre a Bahia e Pernambuco (bacia de Tucano). Nessas duas bacias podem ser considerados três sistemas aquíferos: superior, representado pelas formações Marizal e São Sebastião; médio, representado pelo Grupo Ilhas e a formação Candeias e o sistema inferior, constituído pelas formações Sergi e Aliança. O sistema aquífero superior é o mais explotado, sendo a Formação São Sebastião a de maior potencial, com poços que atingem até 100 $m^3 h^{-1}$ e espessura estimada em cerca de 3.000 m.

2.14 Bacia Jatobá

A bacia do Jatobá é um prolongamento da Bacia do Recôncavo-Tucano e corresponde a uma bacia sedimentar de afundamento bastante restrita e situada na zona centro-sul do Estado de Pernambuco, e na bacia hidrográfica do Rio Moxotó. Ocupa uma superfície de aproximadamente 5.600 km², tendo como limites a falha de Ibimirim (a norte); a falha de São Francisco que a separa da sub-bacia de Tucano Norte (a oeste); e a

borda flexural, nas demais direções (ARRUDA e CORRÊA, 2018). Climatologicamente a bacia sedimentar do Jatobá é bem diversificada segundo as característica morfológica, sendo classificado em BShw' (classificação de Köppen) nas depressões, com o regime de chuva de verão-outono. Nessa área a média pluviométrica é de 400 mm. Nas áreas serranas o clima é classificado em As' nas bordas orientais desde Tacaratú até Buíque, com regime de chuva de outono-inverno, a precipitação média é em torno de 800 mm (ARRUDA e CORRÊA, 2018).

Sedimentos de idades siluro-devoniana e permiana ocorrem junto à borda leste da sub-bacia de Tucano Norte e a sul e sudeste da Bacia do Jatobá, sugerindo a existência de uma depressão nesta área desde o Paleozóico, do qual fazem parte as formações Inajá e Tacaratu que consistem nos principais sistemas aquíferos da bacia (CPRM/UFPE, 2007).

A Formação Tacaratu forma a base da sequência paleozóica da bacia e constitui o aquífero de maior importância da região, especialmente da faixa compreendida entre os municípios de Petrolândia e Buíque, ocorrendo em condições de confinamento pelos sedimentos da Formação Inajá, sendo esta representada por arenitos fluviais finos a grossos, caulínicos, com estratificação cruzada, aos quais se intercalam pelitos. Estima-se espessura média de 350 m (CPRM, 2007).

O contato da Formação Tacaratu com o embasamento cristalino subjacente é marcado por Falhas extensionais ou discordâncias angulares e erosionais, enquanto que com a Formação Inajá Sobrejacente mostra-se concordante e gradativo. Analisando-se as características litológicas, associadas com as estruturas internas deste pacote sedimentar, pode-se concluir que a formação Tacaratu representa um ciclo deposicional continental originado de um sistema fluvial entrelaçado (braided), onde inicialmente predominou a fácies proximal com nítida influência de leques aluviais, evoluindo para uma fácies mediana a distal, com características de planície de inundação e retrabalhamento eólico (CPRM/UFPE, 2007).

Em termos litológicos, a formação Tacaratu é caracterizada por uma sequência predominantemente arenosa, onde se destacam arenitos grosseiros, arenitos conglomeráticos e níveis de conglomerados, com intercalações pelíticas subordinadas, muitas vezes a média, localmente fina, constituída essencialmente por grãos de quartzo, angulosos a subarredondados. Os níveis conglomeráticos, como também os pavimentos de seixos, bastante comuns nesta formação, são formados por clastos imaturos, sustentados pela matriz arenosa a areno-argilosa (CPRM/UFPE, 2007). Morfologicamente, compõe um

relevo bastante acidentado, com encostas abruptas, em função da sua composição psamo-psefítica, com forte diagênese, e da ocorrência de porções extremamente silicificados, principalmente em zonas de falha (CPRM/UFPE, 2007).

Os poços existentes que explotam o principal aquífero desta bacia – o Tacaratu – apresentam profundidades variando entre 50 a 250 m, com vazões de explotação de 4,0 a 30,0 m^3/h e, em alguns casos, como no município de Inajá, com vazão de explotação de até 90,0 m^3/h (ANA, 2005). Destaca-se a perfuração de um poço no Sítio Frutuoso – Ibimirim, pela CPRM no final da década de 90, com 757,0 m, que capta os aquíferos Tacaratu com 350 m e Inajá com 150 m, tendo sido medido, na época, nível estático de +1,23 m e com vazão estimada em 250 m^3/h. Em outras regiões, condicionadas pelo comportamento tectono-estrutural, as produtividades variam entre 18,0 e 150,0 m^3/h. O tectonismo é, aliás, apontado como um dos principais fatores responsáveis pela heterogeneidade do aquífero que se reflete nas variações de espessura e na formação de zonas de porosidade secundária, resultantes do cisalhamento dos arenitos silicificados Tacaratu.

Considerando apenas o aquífero Tacaratu, os valores de transmissividade variam de $1{,}52\times10^{-6}$ até $5{,}58\times10^{-3}$ m^2/s, com condutividade hidráulica média da ordem de $7{,}9\times10^{-5}$ m/s, e coeficiente de armazenamento médio de $1{,}7.10^{-4}$ (LEITE et al., 2001). A capacidade específica ocorre no espectro de 0,024 a 7,3 $m^3/h/m$. Para o sistema Inajá/Tacaratu, apresenta coeficiente de transmissividade variando entre $1{,}4\times10^{-6}$ a $1{,}6\times10^{-3}$ m^2/s, com condutividade hidráulica média de 3.10^{-6} e coeficiente de armazenamento médio de $3{,}9\times10^{-4}$. A capacidade específica exibe valores entre 0,14 e 6,9 $m^3/h/m$ (LEITE et al., 2001).

Assim, a avaliação da reserva realizada pela UFPE/CPRM/FINEP (2007) para a área de afloramento do sistema aquífero Tacaratú/Inajá, considerando condições variáveis de espessura saturada e porosidade efetiva de 0,03 foi obtido o valor de 6,2 km^3. O cálculo da Vazão de Escoamento Natural (VEN) foi realizado pela UFPE/CPRM/FINEP (2007) utilizando o gradiente hidráulico médio entre as linhas potenciométricas 440 e 460 metros (0,008), o comprimento da frente de escoamento (41.000 m) e transmissividade de $3\times10^{-4}m^2/s$.

A Formação Inajá compõe juntamente com a Formação Tacaratu, um sistema aquífero único. A exemplo da Formação Tacaratu, aflora também de forma bastante contínua, com área de exposição se estendendo desde a região a SW do povoado de Moderna, extremo norte da bacia, até a sul da cidade de Inajá (CPRM/UFPE, 2007).

O cálculo da disponibilidade instalada a partir do cadastro de poços realizado pela CPRM em 2002/2003 resultou no valor de 1930 m^3/h ou 0,7 hm^3/ano, o que corresponde a 22,6% dos recursos renováveis e 5,64% da potencialidade (UFPE/CPRM/FINEP, 2007). Os recursos explotáveis são considerados como a diferença entre a potencialidade e a disponibilidade (UFPE/CPRM/FINEP, 2007), o que equivale a 9,3 hm^3/ano, para os próximos 50 anos.

2.15 Bacia Potiguar

A bacia Potiguar está localizada na extremidade Nordeste do Brasil, mais precisamente na margem costeira Norte do estado do Rio Grande do Norte e Nordeste do Ceará. Apresenta área total de 60.000 km², sendo 40% localizados na porção emersa (ARARIPE et al. 1994, *apud* UFPE/CPRM/FINEP, 2007). É limitada a Oeste pelo Alto de Fortaleza, a Sudoeste e ao Sul pelo embasamento cristalino da faixa Seridó, e ao Norte e a Nordeste pela cota batimétrica de 200 m.

A área de trabalho no qual a UFPE/CPRM/FINEP desenvolveu estudo do comportamento do aquífero da Bacia Sedimentar Potiguar está situado na Borda Sudoeste da bacia Potiguar no Estado do Rio Grande do Norte, em uma faixa de cerca de 90 km de extensão (este-oeste) por 30 km (norte-sul), portanto com superfície total de 2.700 km², no qual aproximadamente 800 km², efetivamente corresponde a zona de afloramento da Formação Açu.

A sedimentação da bacia foi iniciada no Período Neocomiano a partir da geração de uma série de *riftes* estruturalmente controlada por grandes falhamentos. Uma grande transgressão marinha, no início do Albiano, marca a sedimentação das formações Açu, Ponta do Mel, Membro Quebradas e Formação Jandaíra. A Formação Açu aflora na borda sul da bacia, sendo composta por espessas camadas de até 1.000 metros de arenito médio a grosseiro, esbranquiçado, intercalado com folhelho e argilito verde-claro e siltito castanho avermelhado. Apresenta-se essencialmente arenosa na base, graduando para sedimentos mais pelíticos em direção ao topo. Possui mergulho suave para norte, quando aumenta gradativamente de espessura, chegando a atingir uma média de 500 m, em subsuperfície. Os calcários da Formação Jandaíra ocorrem sobrepostos à unidade Açu (ANGELIM et al., 2006).

O aquífero Açu corresponde à porção inferior, essencialmente arenosa da formação e constitui a unidade hidrogeológica mais importante da bacia Potiguar. Ocorre em uma faixa de espessura média de 150 m na área de afloramento, que acompanha a borda desta bacia. Este aquífero mostra-se livre em sua faixa de afloramento, apresentando uma vazão média de 10,0 m³/h. Quanto encoberto, em condições de confinamento ou semi-confinamento, as vazões chegam a atingir 200,0 m³/h.

A área de recarga do aquífero Açu ocupa uma faixa, de direção leste-oeste, desde João Câmara a Apodi, com aproximadamente 255 km de extensão e 5 a 30 km de largura possuindo uma superfície total aproximada de 2.300 km². Segundo Morais et al. (2005), o aquífero Açu na região de Mossoró possuía 68 poços em 1996, com descarga total da ordem de $45{,}9\times10^6$ m^3/ano. Nesse estudo, estimou-se que essa descarga anual pudesse ser mantida, considerando bombeamento contínuo, durante os 20 anos seguintes, embora à custa de níveis dinâmicos profundos, entre 130 e 205 metros. Para a CPRM (2005), a descarga do fluxo subterrâneo natural do aquífero Açu foi avaliada em 0,35 m³/s, o que equivale a $10{,}5\times10^6$ m^3/ano, que em termos de lâmina de água corresponde a 9,5 mm.

Na borda sul da bacia Potiguar foram cadastrados e selecionados 493 poços em cinco municípios do Rio Grande do Norte, sendo 248 em Açu; 85 em Ipanguaçu; 81 em Afonso Bezerra; 71 em Upanema; e 8 em Angicos.

O cadastramento de poços revelou (REIS, 2012): profundidade variável de 15,0 a 148,00 m, com média de 44,9 m; vazão de referência entre 0,3 e 60 m^3/h, com média de 10,2 m^3/h; nível estático desde 4,0 até 138,00 m, com média de 25,7 m; e capacidade específica variando de 0,08 a 23,2 m^3/h/m, com média de 2,8 m^3/h/m.

As informações sobre transmissividade do aquífero Açu foram obtidas com base em resultados de testes de bombeamento de poços parcialmente penetrantes (REIS, 2012). Este parâmetro mostrou variação de 15 a 242 m²/s, alcançando 2065 m^2/dia por influência da recarga induzida do aquífero aluvial que recebe aporte permanente das águas do fluxo superficial perenizado. A condutividade hidráulica exibiu valores desde $1{,}43x\times0^{-6}$ até $1{,}24\times10^{-3}$ m/s.

A vazão do fluxo subterrâneo foi avaliada para uma condição no qual o aquífero estava sendo explotado, e assim sendo, o montante correspondente a explotação anual por poços deve ser considerado na recarga anual, o qual corresponde a $3{,}0 \times 10^6$ m^3/ano (equivalente a 2,7 mm/anuais). A recarga de água subterrânea, neste caso, será o somatório

da vazão de fluxo obtida com o correspondente volume anual explotado, ou seja, 13,5x106 m^3/ano ou aproximadamente 12,0, mm de lâmina de água infiltrada. A taxa de infiltração, portanto, é de 2,0%, tomando por base a precipitação pluviométrica média de 595,00 mm/ano (CPRM,2005).

As cidades de Apodi, Upanema, Felipe Guerra, Rodolfo Fernandes e Severiano Melo são abastecidas pelo aquífero Açu. A captação d'água, em geral, é feita através de poços com profundidades em torno de 100 m e vazões de até 80 m^3/h. O volume total bombeado é da ordem de 10 milhões de m^3/ano. O uso da água na irrigação é ainda pouco expressivo, mas mostra tendência de crescimento. Águas classificadas como minerais ou potáveis de mesa são explotadas nos municípios de Apodi e Upanema (MELO et al., 2008).

A avaliação das reservas do aquífero Açu foi efetuada por Reis (2012). Foram estimadas as reservas reguladoras, permanentes e totais, assim definidas:

- Reserva Reguladora: correspondem às variações sazonais dos níveis potenciométricos;
- Reserva Permanente: volume de água situado abaixo do nível potenciométricos mínimo. Também denominado reserva reculares;
- Reservas Totais: somatório das reservas regulares com as reservas permanentes.

2.16 Bacia do Parnaíba

A bacia sedimentar do Parnaíba constitui o maior potencial de água subterrânea do Nordeste. As formações geológicas se apresentam conforme uma série alternada de camadas permeáveis e menos permeáveis, dando origem a sistemas aquíferos regionais, em condições hidráulicas livres e confinadas (às vezes surgentes). Os principais aquíferos, ordenados conforme uma hierarquia de produtividade são Cabeças, Serra Grande e o sistema Poti-Piauí.

2.17 Aquífero Serra Grande

É formado por conglomerados e arenitos conglomeráticos caulínicos com intercalações de arenitos finos a médios, siltitos e folhelhos assentados sobre o

embasamento cristalino. Sua área de recarga ocupa uma faixa muiato estreita ao longo da borda da bacia, com largura variando de 2 a 15 km; no restante da bacia é confinado pela formação Pimenteiras e apresenta potencial variável, sendo explotado intensamente em algumas regiões (Picos por exemplo, onde já surgem indícios de sobre-explotação) e praticamente sem explotação em outras (vale do Gurguéia por exemplo).

2.18 Aquífero Cabeça

O Aquífero Cabeça está sobreposto ao aquitardo Pimenteiras. Esse aquífero é formado por uma sequência de arenitos grosseiros a médios, frequentemente conglomeráticos e muito pouco argilosos, com intercalações de siltitos e folhelhos; apresenta extensa área de recarga, numa faixa de direção aproximada NE-SW, com largura variando de 20 a 60 km; em sua área confinada, é recoberto pelo aquitardo Longá; de forma similar, este aquífero também apresenta um potencial variável ao longo da bacia; é usado principalmente para abastecimento, mais intensamente que o Serra Grande, devido à menor profundidade de captação.

2.19 Sistema Poti-Piauí

As formações Poti e Piauí constituem um sistema aquífero indiviso, formado por sequências de arenitos finos a grosseiros, argilosos, com intercalações de siltitos e folhelhos. Esses sedimentos ocorrem em superfície, formando chapadas na região centro-sul do Piauí com poucos vestígios de sua presença ao norte. A morfologia aliada às características litológicas reduz o potencial hídrico deste sistema aquífero que é utilizado, em geral, para demandas localizadas. A área de maior potencial para a produção de água subterrânea é o vale do rio Gurguéia, no sul do estado do Piauí. Nesta região as espessuras do Cabeças atingem 300 m e os poços têm capacidade de produzir vazões muito elevadas (500 m^3/h). Estudos realizados por Morais (2005) indicam a possibilidade da explotação de 420×10^6 m^3/ano, através da captação simultânea do Cabeças e Serra Grande.

3. A GEOGRAFIA DAS ILHAS HIDRO-PEDO-GEOLÓGICAS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Apresentam-se aqui os dados levantados na forma de mapas interpretativos em duas escalas de trabalho. A primeira é a escala regional, compreendendo o semiárido como

um todo e tendo o polígono das secas como recorte espacial. Embora restrito a esta conformação espacial, em determinados momentos, a análise extrapola os limites do denominado polígono das secas. Os dados foram coletados na escala de todo o semiárido, muitas vezes compactados e ou extrapolados para poder cobrir toda a área.

Outro aspecto a ser tomado em consideração é que nesta escala de análise, ultimamente desprezada na Geografia, tendo sido de certa forma abandonada em prol de escalas maiores e com maior detalhe, o que segundo a "moda" da Geografia atual dá aos estudos certo ar de "maior cientificidade" e aos textos dele derivados. Assim estes textos tem uma característica mais próxima dos artigos exigidos pelas Revistas cientificas.

A presença dos quatro mapas em pequena escala nos apresenta o problema de forma Regional, tal como ele efetivamente é, sem, porém, deixar de lado o conjunto dos inúmeros dramas em escala local, exatamente onde a semiaridez releva o seu caráter mais agressivo com as populações locais, que resistem à semiaridez natural e à falta de uma gestão hídrica que possibilite a convivência mais adaptada com a escassez hídrica. Os mapas refletem o que a proposta de análise geográfica em escala regional considera fundamental para o entendimento das questões hídricas no semiárido nordestino, ou seja, as condições hidro-pedo-geológicas, embasados em seus substratos geológicos, nas precipitações e nas vazões dos poços.

Importante ressaltar que, os mapas aqui apresentados são a expressão cartográfica de bases de dados em Sistema de Informações Geográficas, que permitem inúmeros cruzamentos e sobreposições de níveis de informações ainda por serem executados. Porém, neles já é possível antever os contornos do que aqui será denominado de Ilhas hidro-pedo-geológicas. Na segunda parte serão apresentados exemplos de análises em bacias sedimentares de menor tamanho, mas não de menor importância local, com os mesmos dados dos apresentados na escala Regional.

A Tabela 2**Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra que aproximadamente a metade do território do semiárido tem potencial para receber e armazenar água, ou seja, possuem um potencial aquífero. A distribuição destas áreas demonstra exatamente quais são as áreas mais atingidas pela semiaridez, que são aquelas em que predominam as formações que a princípio poderiam ser chamadas de aquífugos ou aquitardos, segundo a classificação proposta por Castany (1967).

Tabela 2. Quantificação das áreas por unidade hidrogeológica na região semiárida do Nordeste do Brasil

Domínio	Área (km²)	Área (%)	Aquitardo/ Aquífugos (%)	Potenciais aquíferos
Cristalino	326.473	33,4	33,4	–
Metassedimentos-Metavulcânicas	181.038	18,5	18,5	–
Formações Cenozoicas	180.869	18,5	–	18,5
Bacias Sedimentares	163.801	16,8	–	16,8
Poroso/Fissural	67.466	6,9	–	6,9
Carbonatos-Metacarbonatos	52.561	5,4	–	5,4
Vulcânicas	4.316	0,4	–	0,4
Total	**976.524**	**–**	**51,9**	**48,0**

Fonte: CPRM (2003).

A Figura 5 apresenta a distribuição geográfica dos domínios hidrogeológicos na região Semiárida do Nordeste do Brasil. Os estados da Paraíba, Pernambuco, a porção central do Ceará e Rio Grande do Norte, são os que apresentam menor índice de precipitação. Assim, neste caso se aliam os problemas da ausência de aquíferos com a baixa precipitação. A

Tabela 12 3 expressa numericamente a ocorrência de áreas com predominância de classes de vazões e a quantidade e poços existentes em cada uma destas classes, além de apresentar uma classificação qualitativa, baseada nas vazões reais medidas. Nessa tabela percebe-se que quase a metade do território natural do semiárido tem potencial para receber e armazenar água, ou seja, possuem um potencial aquífero.

A distribuição destas áreas demonstra exatamente quais são as áreas mais atingidas pela semiaridez, que são aquelas em que predominam as formações que a princípio poderiam ser chamadas de Aquífugos ou Aquitardos segundo a classificação proposta por Castany (1967).

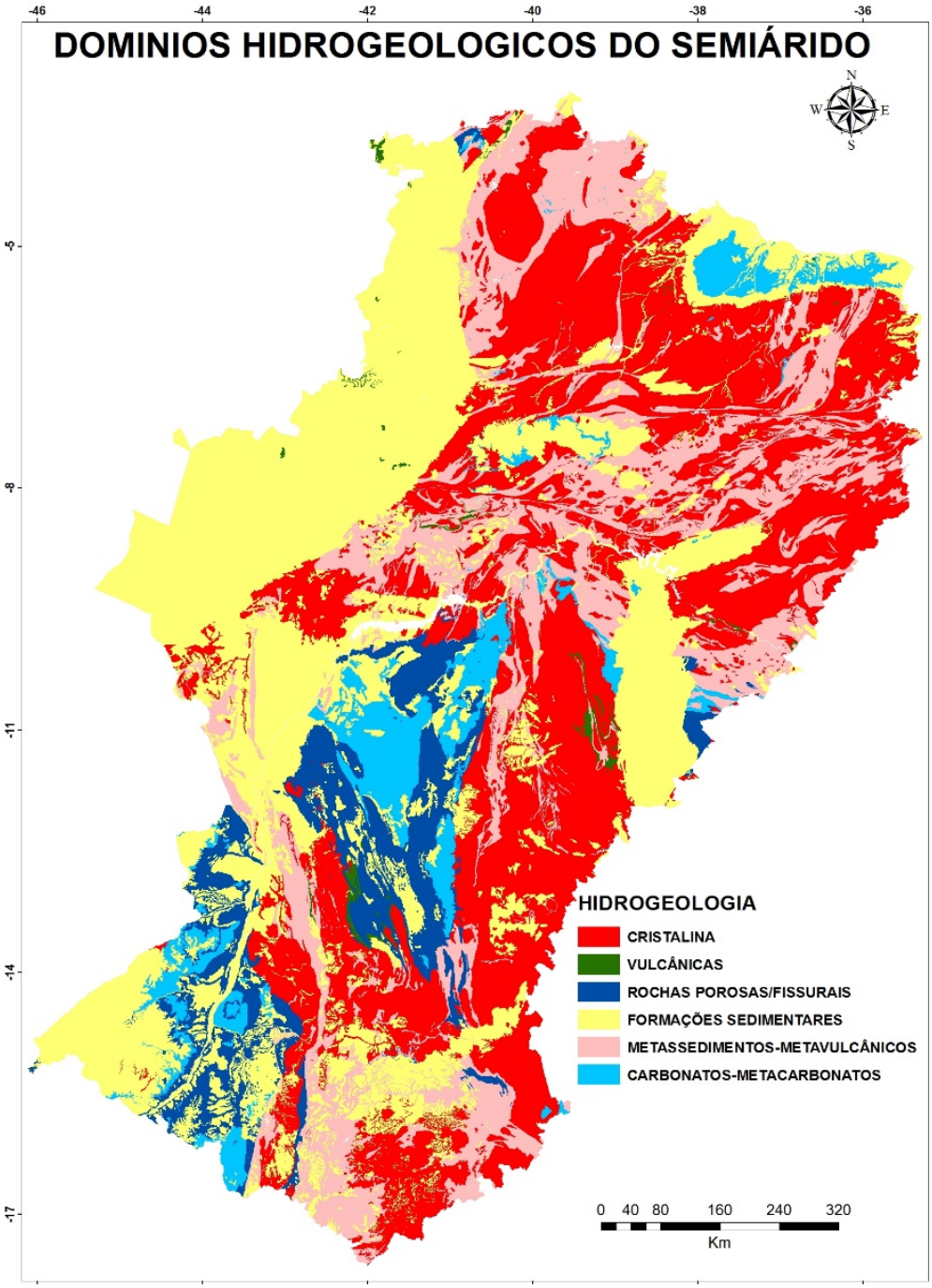


Figura 5 – Mapa dos domínios hidrogeológicos na região Semiárida do Nordeste do Brasil.
Fonte: CPRM (2003).

Tabela 3. Vazões médias dos poços localizados na região semiárida do Nordeste do Brasil

Vazões (m³/h)	Área (km²)	Área (%)	Número de poços	%	Classificação
< 3	410.854	47,2	66.383	77,3	Baixa
3 a 10	246.334	28,3	11.676	13,6	Mediana
10 a 40	188.836	21,7	6.620	7,7	Boa
40 a 100	23.437	2,7	828	1,0	Muito boa
> 100	1.320	0,2	424	0,5	Excepcional

Fonte: CPRM (2003).

Segundo de Lima (2010), há na região Nordeste uma falta de uma política de uso correto das águas subterrâneas na região é produto do desconhecimento em escala regional das potencialidades aquíferas, como também discutida nesta tese. Por outro lado, fica também evidente as zonas onde o domínio das rochas cristalinas e com pouca capacidade natural de armazenamento e transmissão de águas, revela os problemas causados pelas suas características pedogeológicas. Assim a maior parte dos territórios dos estados de Pernambuco, Paraíba, Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte e Ceará refletem nos índices de disponibilidade destes estados, que estão entre os mais baixos do país (REBOUÇAS, 2000).

Quanto à expressão espacial das zonas de vazões, as mais baixas correspondem a 47,3% da área, o que demonstra uma "afinidade" numérica com os 51,8% de zonas hidrogeológicas classificadas como aquífugos e aquitardos. De alguma forma também as vazões medianas e boas expressam o potencial de armazenamento já demonstrado na Figura 5, havendo, portanto, uma correspondência espacial entre os potenciais de armazenamento. Porém, quando compararmos os dados do número de poços existentes e suas vazões de teste, observa-se que 77,3% deles estão abaixo de 3 m³/h.

As fraturas existentes no domínio das rochas cristalinas contribuem de forma expressiva para o armazenamento de água subterrânea. As reservas hídricas são limitadas e as vazões apresentam medias inferiores a 3 m³/h. No cristalino, só existem duas condições de ocorrência de água no subsolo: na fraturas das rochas e nos aluviões próximos aos riachos e rios. Essa região apresenta facilidade de escoamento superficial e baixa capacidade de infiltração de água no solo. Essas características contribuíram para a construção de um número expressivo de açudes e barragens.

4. AS SECAS NO SEMIÁRIDO DO BRASIL

A seca é provavelmente, o mais complexo e menos entendido fenômeno da natureza, afetando um número maior de pessoas do que qualquer outro fenômeno natural. Nas últimas décadas, verificou-se a inabilidade da maioria dos governos de mitigar seus efeitos (curto prazo) e de reduzir a vulnerabilidade da sociedade em geral (longo prazo) para o convívio com o fenômeno que é parte do clima, onde sua recorrência como outros eventos climáticos extremos, é inevitável. A seca difere de outros desastres naturais por ser um processo que acontece de forma lenta e ter seu início e fim de difícil determinação, além de cobrir grande extensão territorial (QUIRING, 2009). Por essas razões, a

quantificação dos impactos e a previsibilidade dos desastres são tarefas difíceis para esse fenômeno do que para os demais (WILHITE, 1993).

O conceito de seca está intimamente relacionado ao ponto de vista do observador (CAMPOS, 1994; AB'SÁBER, 1987). Palmer (1965) definiu a seca como intervalo de tempo, geralmente da ordem de meses ou até mesmo de ano, durante o qual a precipitação diminui consideravelmente em relação ao valor climatologicamente esperado ou apropriado. Apesar do baixo volume e irregularidade das chuvas é considerada a principal causa das estiagens, há outros fatores e efeitos que causam as secas (CAVALCANTI, 2002).

As secas são o principal obstáculo ao crescimento e à melhoria do bem-estar das populações do semiárido. O fenômeno provoca grandes desequilíbrios econômicos, sociais e ambientais, afetando a pequena agricultura de sequeiro, predominantemente de subsistência e fortemente associada a situações de extrema pobreza.

Wilhite (1999), em sua publicação "Lidando com secas – Em busca de um plano de ação", considera a seca como uma característica normal e decorrente do clima que, de certa maneira afeta praticamente todos os países. Afirma ainda que, no mundo, os desastres naturais induzidos pela seca aumentaram significativamente desde os anos de 1960, os quais em sua maioria são motivados pela vulnerabilidade crescente diante de períodos prolongados de escassez de precipitação, do que propriamente pelo aumento da frequência de seca meteorológica. Esta preocupação é intensificada pela ocorrência em vastas áreas de longas secas, que geraram sérias consequências socioeconômicas e ambientais em escala global.

Os efeitos mais graves das secas decorrem de um descompasso momentâneo entre a oferta de água, provida irregularmente pela natureza, e as necessidades para uma determinada atividade gerada pela sociedade. Santos et al. (2018) analisam que "a seca não deve ser considerada como uma condição seca, mas uma condição de secura anormal em relação às necessidades. Em qualquer área, a natureza geralmente produz uma vegetação em harmonia com o ciclo de umidade disponível para o crescimento da planta. O homem frequentemente viola essa harmonia introduzindo culturas de pouca adaptação e a crença de seca é aumentada pelo mau uso da terra".

Há muito se reconhece que as secas periódicas que castigam a zona semiárida do Nordeste são naturais, assumindo dimensões de calamidade pública por causa da situação

de pobreza em que vive a maior parte de seus habitantes (NOBRE, 2012). A diminuição drástica e as vezes associada à concentração em curto período da precipitação anual, observadas quando da ocorrência de uma grande seca, frustram as safras agrícolas, debilitam ou dizimam a pecuária e exaurem as reservas de água de superfície (CARVALHO, 2012). Em alguns casos os impactos da seca são tão fortes que ainda permanecem os efeitos residuais forçando famílias a se desfazerem de parte de seus bens móveis, e imóveis, o que acentua a concentração de terras numa área já com problemas neste aspecto (SOUZA et al., 2000).

As secas ocorrem em qualquer região climática e são caracterizadas pelo déficit entre a precipitação pluvial e a evapotranspiração potencial (WILHITE, 2000). A gravidade da seca aumenta com a associação de temperatura do ar elevada, ventos fortes, baixa umidade do ar e com condições locais do solo, relacionadas, principalmente, a taxa de infiltração e retenção de água e a sua erodibilidade potencial (FREITAS, 2005). A ocorrência de seca varia de região para região, devido aos diferentes sistemas climáticos atuantes em cada localidade (WILHITE, 2000).

Para Redmond (2002), não existe um conceito universal para definir a seca, o que permite que suas definições sejam dependentes da temática de abordagem. Alguns autores como Wilhite (1999) e Blain e Brunini (2005) classificaram a seca em quatro diferentes categorias, de acordo com seus efeitos: Meteorológica, Agrícola, Hidrológica e Socioeconômica. Essas definições estão de acordo que a seca é uma condição de insuficiência de água no solo, causada por déficit de precipitação durante um período de tempo.

Para Souza et al. (2000), a seca meteorológica é uma consequência do efeito de fenômenos atmosférico na redução da pluviometria da região. Segundo Pires (2003), a seca meteorológica é caracterizada pelo déficit da precipitação em relação ao valor normal; caracteriza-se pela falta de água induzida pelo desequilíbrio entre a precipitação e a evaporação, a qual depende de outros elementos como a velocidade do vento, temperatura, umidade do ar e insolação. A definição de seca meteorológica deve ser considerada como dependente da região, uma vez que as condições atmosféricas que resultam em deficiência de precipitação podem ser muito diferentes de região para região. A seca meteorológica é expressa apenas como base no grau de secura e na duração do período seco comparados a algum estado “normal”, ou seja, é caracterizado pelo déficit da precipitação em relação ao valor normal (FERNANDES et al., 2009).

A *Wold Meteorological Organization* (1975) define a seca agrícola como a baixa disponibilidade de umidade no solo, a qual torna o suprimento de água às culturas insuficientes para repor as perdas por evapotranspiração das mesmas. Para Pires (2003), a seca agrícola geralmente manifesta-se antes da seca hidrológica e após a seca meteorológica. A combinação dos tipos de seca, meteorológica e hidrológica estão diretamente ligadas aos impactos na agricultura, ocasionando assim, a seca agrícola.

Esse tipo de seca está basicamente associado à disponibilidade de água no solo para suportar o crescimento e desenvolvimento das plantas. Além de estar relacionada às fases críticas do desenvolvimento/crescimento dos vegetais, o início de uma seca agrícola pode se distanciar do de uma meteorológica, pois depende quase que exclusivamente da água disponível na zona radicular das culturas no solo (FERNANDES et al., 2009).

A seca hidrológica é um dos tipos de seca que caracteriza-se por um período mais longo de tempo e por um déficit de chuva. Esse tipo de seca está associada à redução dos níveis médios de água nos reservatórios superficiais e subterrâneos por um determinado espaço de tempo. Uma das metodologias para se de identificar secas hidrológicas é através da utilização de índices que permitem identificar a episódios e também classificá-los no que tange a intensidade do evento prolongado (MEDEIROS et al., 2016).

Para Fernandes et al. (2009), a seca socioeconômica está relacionada com o impacto da seca sobre as atividades humanas, incluindo os impactos diretos e indiretos na produção agrícola e outras atividades econômicas. Ocorre quando o déficit de água induz a falta de bens ou serviços (energia elétrica, alimentos, entre outros) devido a um volume de água inadequado, resultante de uma má distribuição das chuvas, de um aumento no consumo, ou ainda de um mau gerenciamento dos recursos hídricos.

A seca socioeconômica está relacionada aos prejuízos financeiros e socioambientais causados pela ausência continua de água em uma região ou determinada localidade, destacando-se os impactos e a vulnerabilidade desses locais (SANTOS, 2008). A seca socioeconômica é uma consequência dos demais tipos de secas, sendo caracterizada monetariamente (KEYANTASH e DRACUP, 2002).

A seca, além de ser um problema climático, é uma situação que gera dificuldades sociais para a população que habita a região. A falta de água torna difícil o desenvolvimento da agricultura e a criação de animais. Entretanto nos últimos anos, observa-se que esse fenômeno climático tem sido agravado por influências antrópicas,

como, por exemplo, o uso de métodos inadequados de agricultura, sobrepastoreio, queimadas, desmatamento e excessiva exploração de águas subterrâneas.

5. O CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico ou ciclo da água é um fenômeno global de circulação fechada da água entre a sub-superfície da terra e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela ação da energia solar associada à gravidade e à rotação da Terra (TUCCI, 2009). Trata-se de um processo dinâmico que representa os diferentes caminhos que a água pode percorrer, transformando-se ao longo do tempo. Integra três partes do sistema que compõem a Terra: a atmosfera, onde é encontrada principalmente água no estado gasoso; a hidrosfera, representando a água na fase líquida ou sólida na superfície do planeta; e a litosfera, abrangendo todos os tipos de águas subterrâneas (CASTRO, 2013). O ciclo hidrológico pode ser dividido em etapas para uma melhor compreensão: precipitação, interceptação, infiltração e percolação, escoamento superficial, escoamento subterrâneo, e evapotranspiração, demonstrado na Figura 6.

De acordo com Martins e Bronstert (2018), a partir da ação das chuvas, parte dela fica retida temporariamente nas superfícies vegetativas, depois é para a atmosfera (perda por interceptação) ou segue seu caminho para o solo. Após alcançar o solo, parte da água tende a infiltrar. A infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo. É um processo que depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da superfície e das quantidades de água e ar inicialmente presentes no interior do solo (TUCCI, 2009).

A taxa de infiltração superficial depende da umidade e condições superficiais do solo, enquanto a movimentação da água na camada depende da condutividade hidráulica do solo (SANTOS, 1994). De Freitas et al. (2018) observaram que mudanças na superfície do solo possuem impacto significante na infiltração de água no solo e na capacidade de retenção.

(Santos, 1994). O movimento descendente da água p
denominado de percolação (Tucci, 2009).

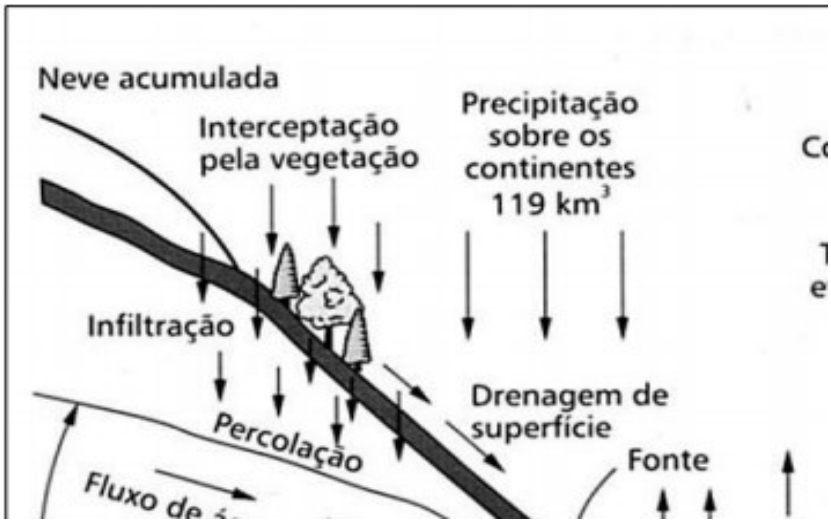


Figura 6 – Representação esquemática do ciclo hidrológico.
Fonte: Tundisi (2003).

À medida que a água se infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão se umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há entrada de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade. Normalmente as precipitações naturais não são capazes de saturar todo o perfil, saturando em geral apenas as camadas próximas à superfície, formando um perfil típico onde a umidade do solo decresce com a profundidade (SANTOS, 1994).

A partir do momento em que for excedida a capacidade de retenção de água pela vegetação e a superfície do solo já estiver saturada, passa a ocorrer o escoamento superficial, que se caracteriza como o movimento da água sobre a superfície do solo. O escoamento superficial é regido por leis físicas (conservação de massa, energia e quantidade de movimento) e representado quantitativamente por variáveis como vazão, profundidade e velocidade. O escoamento é influenciado pelas características da precipitação (intensidade e duração), pelas características do solo (textura, capacidade de infiltração, frequência e umidade) e pelo tipo de cobertura vegetal. Quanto maior for a capacidade de infiltração do solo, menor será a parcela da precipitação que irá escoar (SILVA et al., 2018).

No processo de escoamento superficial, a água é impulsionada pela gravidade para cotas mais baixas, formando pequenos filetes que tendem a se unir e formar cursos d'água, que continuam fluindo até encontrar riachos, os quais formarão rios, de porte cada vez maior, até atingirem um oceano ou lago (PAIVA et al., 2010). De acordo com Tucci e Cabral (2003), o escoamento dentro do solo ocorre em duas camadas principais: meio não saturado e meio saturado. O meio não saturado é a parcela próximo da superfície onde o solo não está saturado de água, escoando por percolação até o meio saturado ou volta para a superfície. Esse escoamento é conhecido como subsuperficial.

O meio saturado é a parcela do solo saturada de água que se encontra imediatamente abaixo da zona não saturada. O escoamento subterrâneo é o que se produz como resultado do fluxo saturado através dos estratos do solo ou rocha. A velocidade do escoamento subterrâneo é muito lenta em comparação com a velocidade dos escoamentos superficiais. O aquífero é uma unidade geológica capaz de armazenar e transmitir água em quantidade significativa, de modo a permitir o acúmulo de um volume de água superior ao que é drenado em um longo prazo (MONTE-MOR, 2012).

Parte da água armazenada no solo será consumida pela vegetação, voltando, em seguida, à atmosfera (no estado gasoso) pelas folhas das plantas em um processo conhecido como transpiração. Já o fenômeno da evaporação se inicia antes mesmo da precipitação atingir o solo, atuando na água que foi interceptada pela vegetação. A evaporação ainda ocorre diretamente no solo desprovido de vegetação, nos lagos, rios, oceanos e outros corpos hídricos (PAIVA et al., 2010).

Dentre os componentes do ciclo da água citados anteriormente, um dos mais importantes e objeto da maioria dos estudos hidrológicos é o escoamento superficial. O conhecimento dos processos relacionados a essa importante variável hidrológica possibilita o planejamento da utilização das águas superficiais para diversas finalidades, como construção de reservatórios, hidrelétricas, entre outras, além de ser o escoamento superficial, um dos principais processos que ocasionam a erosão dos solos.

O escoamento superficial ocorre quando a taxa de água aplicada à superfície do solo excede a taxa de infiltração. Horton (1933) descreveu o escoamento sobre a superfície da seguinte forma: "Omitindo a interceptação pela vegetação, escoamento superficial é aquela parte da chuva que não é absorvida pelo solo por infiltração. Se o solo tem uma capacidade de infiltração 'f', expressa em altura absorvida por hora, então quando a

intensidade da chuva ‘i’ for menor do que ‘f’, a chuva é toda absorvida e não existe escoamento superficial (SANTOS, 2007).

Ainda, de acordo com Santos (2007), juntamente com o escoamento sobre a superfície existe o armazenamento em depressão nas superfícies côncavas e armazenamento de retenção. Horton considerou que o escoamento superficial teria a forma de um escoamento raso (laminar) cuja profundidade deveria ser medida em milímetros. Como o escoamento se acumula na descida, sua profundidade aumenta até que o desaguamento num canal ocorra. O solo guarda água infiltrada e então lentamente libera-a como escoamento subsuperficial para entrar no curso como escoamento de base durante períodos sem chuvas. Escoamento hortoniano sobre a superfície é aplicável para superfícies impermeáveis em áreas urbanas e para superfícies naturais com camadas rasas de solo e com baixa capacidade de infiltração, como terras semiáridas e áridas.

5.2 Processos Hidrológicos em Regiões Semiáridas

A superfície da Terra possui como uma de suas caraterísticas típicas a heterogeneidade em termos de variabilidade espacial e de parâmetros de controle físicos/hidrológicos, biológicos e outros processos relacionados. Para a modelagem de processos hidrológicos, precisam ser tomadas diferentes formas e graus de heterogeneidade.

Os processos hidrológicos em regiões áridas e semiáridas são ainda mais heterogêneos, isto é, variáveis no tempo e no espaço. Nessas regiões, as oscilações no climáticas são preponderantes no comportamento das vazões (SILVA et al., 2018). Os fatores do clima que controlam as chuvas na região semiárida são complexos, principalmente, quando somados a fatores como orografia da região, sistemas atmosféricos de mesoescala, além do clima de maritimidade. O regime de chuvas na região pode ser definido pela falta, variação e concentração das precipitações num curto período de três meses (SANTOS et al., 2019).

Os fatores primordiais que controlam a variabilidade climática na região, de acordo com Marengo et al. (2017), são posição geográfica, relevo, características da superfície e os sistemas de tempo que atuam na região. Já para Souza et al. (2000), as características físicas pela variabilidade no semiárido são a forte relação entre os padrões atmosféricos e oceânicos de mesoescala que juntos controlam o clima na região.

Em regiões semiáridas e áridas, a evapotranspiração é uma componente chave do ciclo hidrológico, que consome, respectivamente, mais de 80% e mais de 95% das chuvas no longo prazo (PELGRIM et al. 1988). Uma das características dessa região que afeta a evapotranspiração é a escassez de sua cobertura vegetal. Segundo Günter (2002), dois típicos da cobertura do solo podem ser distinguidos na avaliação desse fenômeno nas regiões semiáridas: a vegetação ser uniformemente distribuída, ou seja, caracterizada por uma cobertura continua, mas escassa; e a vegetação ser heterogeneamente distribuída sem cobertura continua, mas com distintas manchas de vegetação, intercaladas por manchas de solo nu.

Na maioria dos ecossistemas do semiárido brasileiro, o conteúdo de água no solo é resultado da diferença entre as entradas (chuva) e saída (evapotranspiração). De acordo com Ceballos et al. (2002), no caso de um solo com cobertura vegetal mínima, as taxas de evapotranspiração são controladas não só pela temperatura do ar e pela umidade, mas também pelas características físicas do solo, especialmente sua textura.

No semiárido nordestino, a capacidade de infiltração é geralmente baixa, porque o solo é compactado, (GÜNTER, 2002; SIMMERS, 2003). Uma das principais razões é a cobertura vegetal esparsa, típicas desses ambientes, que pode proteger apenas parcialmente a superfície do solo contra compactação devido à energia cinética das gotas da chuva. Nessas regiões, a infiltração de água e o escoamento são mais complexos, quando comparados a algumas áreas úmidas (REBOUÇAS, 2005).

Em áreas úmidas, as taxas de infiltração são governadas pela distribuição espacial da umidade do solo. Nas regiões semiáridas, fatores como extensão de afloramentos de leito rochoso, a extensão da cobertura do solo, áreas de encostas, a diferenças na compactação do material controlam a variabilidade espacial da infiltração e a formação do escoamento.

O conhecimento sobre o escoamento da água em regiões semiáridas é de suma importância. Nessas regiões o escoamento geralmente é dominado por componentes de escoamento rápido de superfície, durante e imediatamente após a chuva. A razão principal desse evento ocorre por causa das características da precipitação, principalmente a alta intensidade, o que acaba excedendo a capacidade de infiltração do solo. Nestas regiões, o balanço hídrico favorável é alcançado somente em certa época do ano, na estação chuvosa. Nessa estação, a precipitação infiltra no solo recarregando o armazenamento subterrâneo, que foi esvaziado durante o período seco (GÜNTNER, 2002).

A principal característica dos cursos d' água nessa região do Brasil é o caráter intermitente de seus rios. Os rios do semiárido apresentam dois tipos de regime hidrológico: o temporário e efêmero. Enquanto os rios temporários estão marcados pela presença de um fluxo de água superficial maior ao longo do seu ciclo hidrológico, e um período de seca estacional, os rios efêmeros apresentam fluxo de água superficial somente após uma precipitação.

As aguas subterrâneas são um dos componentes importantes do ciclo hidrológico em regiões áridas e semiáridas, mas a estimativa de volume de recarga subterrânea e uma das maiores e mais difíceis demanda a serem atendidas em estudos de quantificação desse recurso (CARLING et al., 2012).

As aguas subterrâneas, seu deslocamento e eventual ressurgimento natural ou artificial na superfície envolvem problemas extremamente variados e complexos nos domínios da geologia e da hidráulica do escoamento em meios porosos, constituindo um amplo campo de estudo especializado.

O Brasil apresenta uma grande deficiência quanto ao conhecimento do potencial hídrico de seus aquíferos e do seu atual estágio de exploração. Em rochas cristalinas, em regiões úmidas, com espesso manto de alteração, as capacidades especificas variam entre 1 e 5 $m^3/h.m^{-1}$: já no domínio de rochas cristalinas do semiárido, a capacidade especificas são inferiores a 1 $m^3/h.m^{-1}$ (TUCCI e CABRAL, 2003).

A estimativa do balanço hídrico e do fluxo de água subterrânea para um ambiente semiárido requer múltiplas abordagens para fornecer consenso por causa da falta generalizada de água e esparsos dados hidrológicos. Para De Medeiros et al. (2019), a estimativa do balanço hídrico é possível, embora diferentes graus de incertezas sejam criados em função dos esparsos dados hidrológicos, da variabilidade espacial e temporal da precipitação e evapotranspiração, e da repartição das águas de superfície em escoamento e recarga subterrânea.

6. MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica se caracteriza como uma ferramenta que possibilita a representação de processos hidrológicos. Algumas de suas vantagens principais estão relacionadas à previsão de condições diferentes das observadas, para prevenção de situações futuras, e a reprodução do passado pata dar suporte ao processo de tomada de

decisão (MACHADO, 2002; TUCCI, 1998), tem-se a vantagem do baixo custo e da rapidez do processamento.

De modo geral e considerando a natureza de cada modelo, as principais limitações da modelagem hidrológica estão relacionadas às condições quantitativas e qualitativas dos dados hidrológicos, os problemas de formular matematicamente alguns processos e a simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos. A dificuldade de se modelar uma bacia devido à heterogeneidade dos processos envolvidos tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização, prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados (TUCCI, 1998).

O grau de representação das variações espaciais e temporais dos parâmetros de entrada e saída, talvez represente a propriedade mais importante de um modelo hidrológico. Enquanto nos modelos concentrados assumem que os parâmetros e variáveis variam somente com o tempo, os modelos distribuídos são aqueles em que os parâmetros e variáveis variam tanto no espaço quanto no tempo (SANTOS, 2002).

Para Beven (1985), a utilização de modelos distribuídos se enquadra potencialmente para previsão de fenômenos, principalmente previsão dos efeitos de uso da terra, previsão dos efeitos de localização espacial das variáveis de entrada e saída, previsão do movimento de poluentes e sedimentos, e previsão de resposta hidrológica não monitorada.

De acordo com Tucci (1998), de forma pragmática nenhum modelo é puramente distribuído, já que são utilizadas discretizações numéricas que de alguma maneira tornam um modelo distribuído em concentrado numa pequena subdivisão. Os modelos distribuídos não garantem, necessariamente, melhores resultados do que alguns modelos semiconceituais concentrados. Entretanto, permitem realizar com maior embasamento a modificação das características do sistema, o que é praticamente impossível através dos modelos semiconceituais devido ao excesso de empirismo e da característica concentrada de sua formulação (TUCCI, 1998).

7. INTEGRAÇÃO ENTRE MODELOS HIDROLÓGICOS E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

A principal limitação dos modelos hidrológicos seja a de manipular uma grande quantidade dados, que possuem grande variabilidade espacial e temporal, devido às características climáticas e físicas de uma bacia hidrográfica (VIANA et al., 2019). A qualidade de um modelo hidrológico está diretamente relacionada com a capacidade de representar as variáveis e parâmetros.

Por volta das décadas de 1960 e 1970, surgiram as primeiras ideias de se integrar o SIG aos estudos hidrológicos (MELO et al., 2008). Os primeiros esforços do uso de SIG se concentraram paralelamente em duas áreas: a aplicação da ferramenta para a obtenção de parâmetros de entrada para os modelos hidrológicos e a utilização do SIG como interface para modelos de simulação (MARTIN et al., 2005).

O primeiro modelo hidrológico que se baseou em SIG para a obtenção de seus parâmetros foi o Topmodel. Ele é um modelo de predição de vazão baseado na topografia obtida através de um Modelo Digital de Elevação (MDE). Desde então, muitos outros modelos têm sido desenvolvidos de alguma forma integrada aos SIG, buscando não única e necessariamente processar a modelagem dentro do SIG, mas sim uma melhoria na estimativa dos parâmetros dos modelos conceituais, a preparação das unidades espaciais para o uso de modelos distribuídos, a subdivisão automatizada da bacia em unidades menores, a apresentação espacial dos resultados e a simplificação da aplicação do modelo (COELHO, 2006).

Atualmente, os SIGs têm sido utilizados para a geração do banco de dados, que servem como a entrada para os modelos hidrológicos, permitindo, através dessa integração. O estudo das variáveis hidrológicas para qualquer ponto da bacia, auxiliando de uma forma mais complexa a tomada de decisão a partir de diversas informações geradas, seja através de mapas, tabelas ou gráficos.

Além disso, segundo Calijuri et al. (1998), a integração do SIG com os modelos hidrológicos e sua aplicação em estudos de bacias hidrográficas permite a realização de um grande número de operações, como projeto, simulação, calibração e comparação entre as modelagens, com uma grande vantagem que é a velocidade desses processos. Essa integração permite ainda, a predição de cenários das condições hidrológicas, através da alteração dos dados de entrada em virtude das mudanças do uso do solo, clima e outros

fatores como reservatórios. Algumas integrações conhecidas e de uso atualmente difundido são as dos modelos SWAT (GEORGE e LEON, 2008; OLIVERA et al., 2006) e HEC-GeoHMS (USACE, 2009). Ambas utilizam um SIG para preparação dos dados de entrada e como interface de aplicação do modelo.

CAPÍTULO II
A ÁREA DO ESTUDO DE CASO: A BACIA DO RIO SALGADO

Para a realização desse estudo, diversas áreas dentro do Semiárido foram estudadas, a saber: (a) bacia do Alto Rio Paraíba, (b) bacia do Rio do Peixe, (c) bacia sedimentar do Araripe, (d) região de Picos, (e) região de Campo Maior, (e) região da Serra de Ibiapaba, (f) bacia do Rio Moxotó, e (g) bacia do Rio Salgado. Essa última destacada para ser utilizada como estudo de caso para a modelagem hidrológica do balanço hídrico para comprovação da hipótese desse estudo.

Nessa bacia foi escolhida porque é dividida em dois compartimentos (sedimentar e cristalino) e possui três postos fluviométricos, o posto Icó localizado na porção sedimentar da bacia e os postos Lapinha e Podimirim localizados na porção cristalina da bacia.

1. DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA BACIA DO RIO SALGADO

A bacia do Rio Salgado posiciona-se na porção meridional do Estado, limita-se a oeste com a sub-bacia do Alto Jaguaribe, ao sul com o estado de Pernambuco, ao leste com o estado da Paraíba e a nordeste com a sub-bacia do Médio Jaguaribe (Figura 7). O principal rio desta sub-bacia é o rio Salgado. Seu trajeto dá-se no sentido sul-norte, até encontrar com o rio Jaguaribe, próximo à cidade de Icó, logo à jusante da barragem do açude Orós. Possui uma extensão de 308 km e drena uma área de 12.623,89 km², o equivalente a 9% do território cearense.

A bacia do Rio Salgado está inserida na Província Borborema, entidade tectônica Neoproterozóica (Brasiliana – Pan-Africana), parcialmente encoberta por sedimentos Fanerozóicos de bacias interiores e marginais do Nordeste brasileiro - na área em estudo, da Bacia Sedimentar do Araripe. Essa bacia sedimentar está inserida sobre terrenos pré-cambrianos da Zona Transversal da Província Borborema, no domínio do Sistema de Dobramento Piancó-Alto Brígida, no seu limite com a zona geotectônica de Teixeira (BRITO NEVES et al., 2005), e tem seu arcabouço estrutural constituído por sequências estratigráficas, limitadas por discordâncias regionais. Segundo Assine (2007) estas

discordâncias “representam o registro fragmentário de embaciamentos gerados em ambientes tectônicos distintos”.

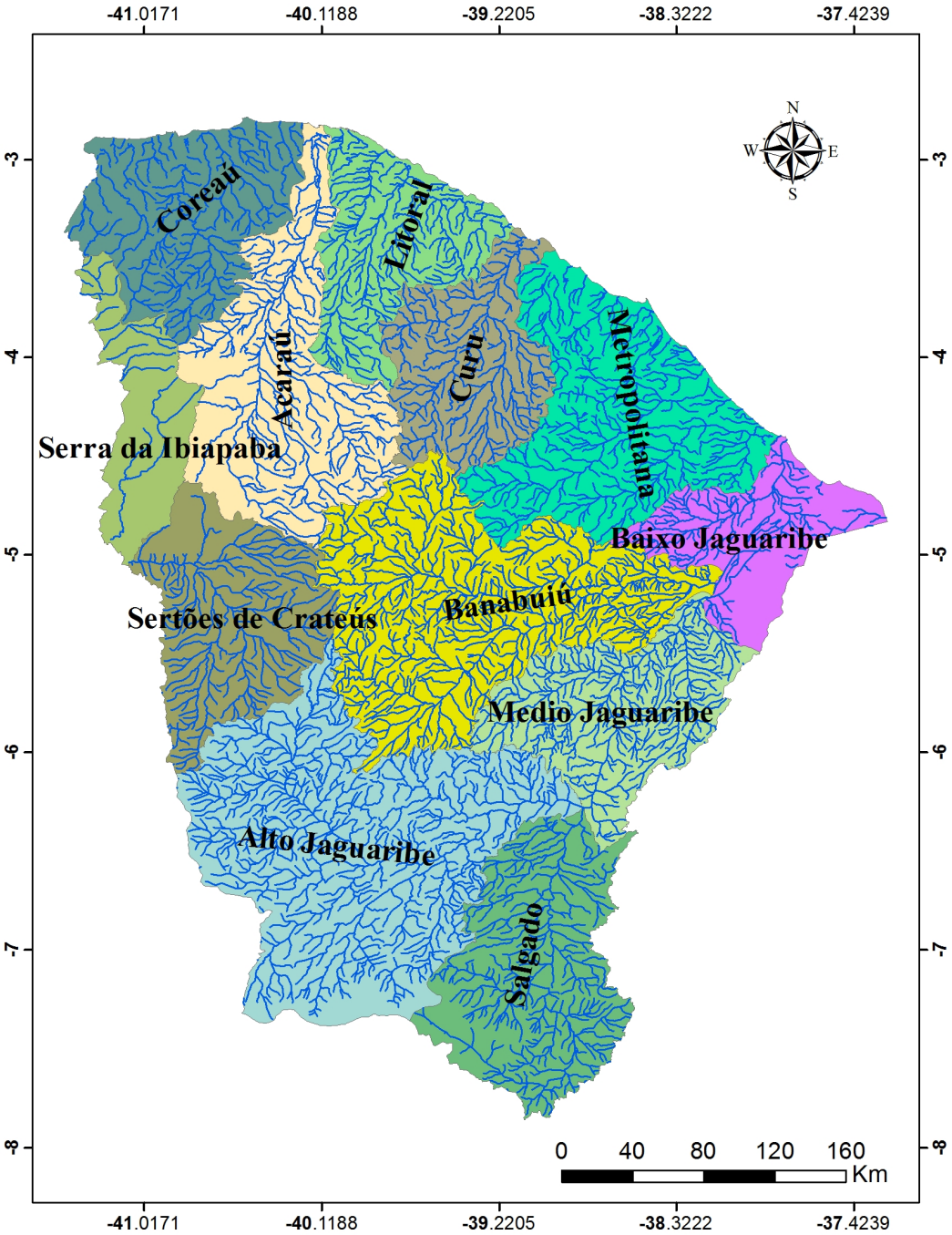


Figura 7 – Localização da sub-bacia do Rio Salgado, no estado do Ceará.

A Província Borborema, também chamada de Região de Dobramentos do Nordeste, de idade neoproterozóica, apresenta estruturação bastante complexa, onde predominam dobramentos intensos e intrusões batolíticas ígneas (na maioria granitóides),

sendo dividida por grandes lineamentos. Na área basal da bacia do Araripe, são distintos dois tipos de domínios: terrenos metassedimentares e metavulcano-sedimentares (sistemas de dobramentos) e terrenos gnáissicos-migmatíticos (maciços) (RIBEIRO, 2012).

O Rio Salgado é formado pela confluência dos riachos dos Porcos e Rio das Batateiras, e é o principal afluente da margem direita do Jaguaribe. A sub-bacia do Salgado compreende 24 sub-bacias formadas pelos rios (Figura 8): Abaiara, Aurora, Baixio, Barbalha, Barro, Brejo Santo, Caririaçu, Cedro, Crato, Granjeiro, Icó, Ipaumirim, Jardim, Jati, Juazeiro do Norte, Lavras da Mangabeira, Mauriti, Milagres, Missão Velha, Penaforte, Porteiras Umari, Várzea Alegre.

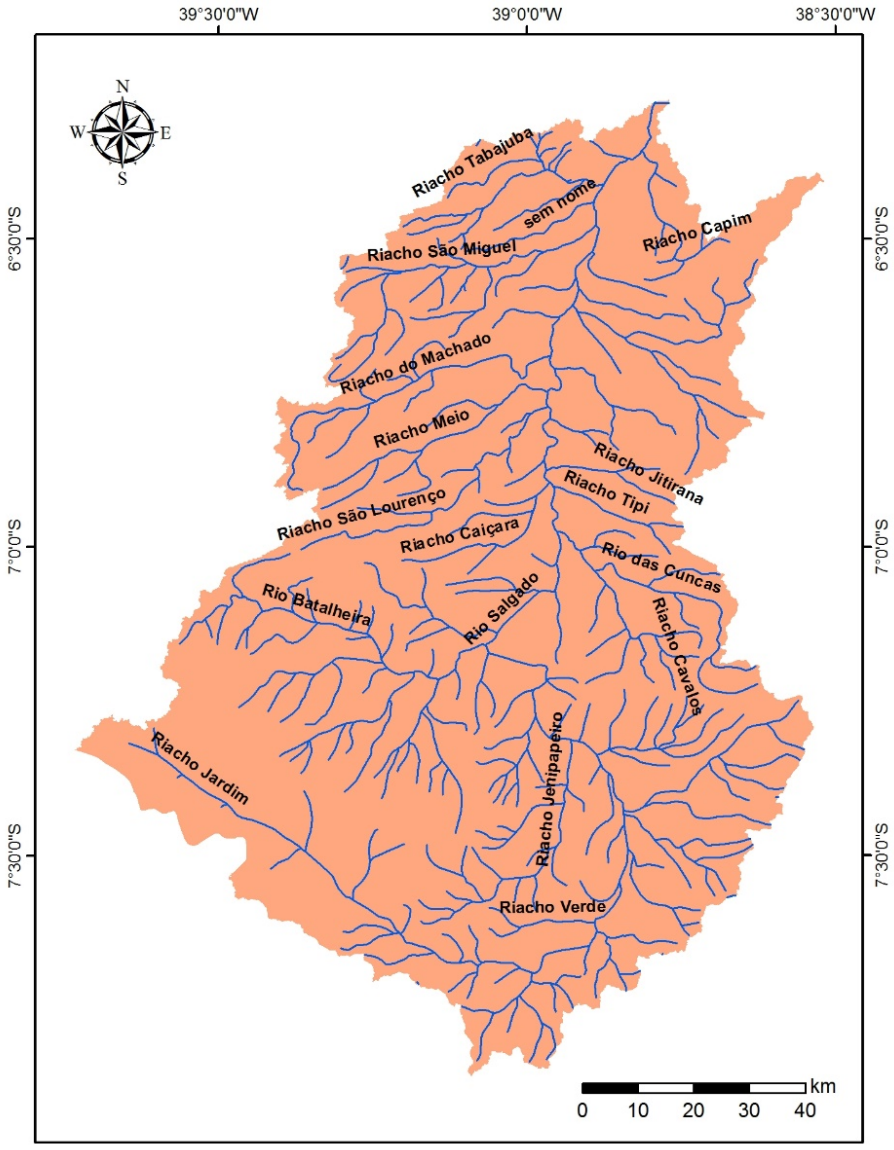


Figura 8 – Municípios inseridos na bacia hidrográfica do Rio Salgado e seus principais afluentes.

Fonte: COGERH (2018).

1.1 Geologia e Clima

A bacia do Rio Salgado é constituída de rochas do embasamento cristalino pré-cambriano (58,96%), representado por rochas do Arqueano ao Proterozóico Superior. Sobre esse substrato repousam depósitos sedimentares (41,04%) como os da Bacia Sedimentar do Araripe, que apresenta uma diversificação litológica caracterizada por sequências alternadas de arenitos, siltitos, calcários, argilitos e folhelhos, podendo alcançar uma espessura total da ordem de 1.600 m; das coberturas de idade terciária constituídas de areia, argilas e cascalhos e das quaternárias (aluviais), formadas por areias, siltes, argilas e cascalhos que se distribuem ao longo dos principais cursos d'água que drenam a sub-bacia (Figura 9).

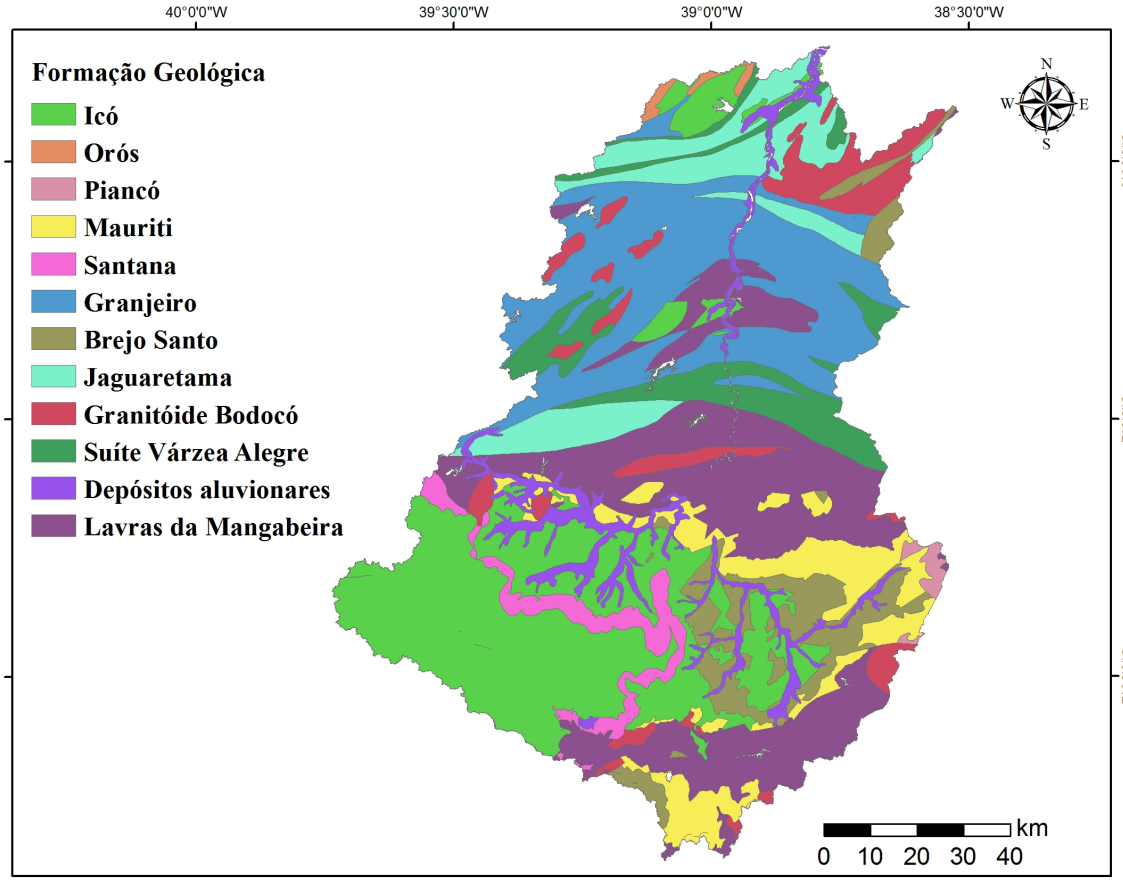


Figura 9 – Mapa geológico da bacia hidrográfica do Rio Salgado.
Fonte: CPRM (2003).

A Bacia Sedimentar do Araripe, encontra-se a Chapada do Araripe, que possui níveis altimétricos entre 80 e 900 m e tem os arenitos Cretáceos da Formação Exu como mantenedor do relevo. Além disso, sua drenagem é de caráter intermitente e rica em

recursos hídricos subterrâneos. Ao longo da borda norte-oriental desta chapada desenvolve-se a região do Cariri cearense, que se apresenta como um brejo de encosta e de vales espraiados decorrentes de uma ramificação generalizada da drenagem. A bacia apresenta totais pluviométricos superiores a 900 mm (FUNCEME, 2009).

No que tange o clima da bacia, este é do tipo Semiárido Quente, que condiciona médias térmicas anuais que variam entre 24°C e 26°C. A precipitação anual média é de 967,6 mm. Há um contraste nítido no que diz respeito ao relevo entre os dois macrocompartimentos: o da Superfície de Cimeira da Chapada do Araripe (800 – 900 m) e a Depressão Sertaneja (350 – 450 m) (COGERH, 2019). Na Depressão Sertaneja emergem, topograficamente, níveis serranos dos maciços cristalinos e as cristas residuais, e expandem-se as planícies fluviais. Nas vertentes da chapada, o Rio Salgado possui declividades muito acentuadas, que vão se tornando mais suaves à medida que se aproxima da Depressão Sertaneja as declividades do talvegue variam de 0,1% a 8%, sendo a média 0,18% (COGERH, 2019).

1.2 Solos e Relevo

Devido às variações geológicas existe uma grande variedade de solos nesta sub-bacia. Os solos predominantes na sub-bacia são os Neossolos Flúvicos, Litossolos, Luvissolos, Argissolos, Planossolos, Nossolos Litólicos e Vertissolos. Na região da Chapada do Araripe, parte sul da bacia, há predomínio de solos mais profundos com domínio de Latossolos derivados de arenito da Formação Exu (COGERH, 2019). No sopé da chapada no entorno de municípios como Crato, Juazeiro e Barbalha, predominam solos profundos, avermelhados, com média fertilidade natural e boas condições para o uso agrícola. Na Depressão Sertaneja, localizada mais ao norte da sub-bacia, onde predominam rochas cristalinas ácidas, devido às condições climáticas, ocorrem solos rasos a pouco profundos, com diversas restrições para uso agrícola (FUNCEME, 2009).

1.3 Uso do solo e da terra

Das relações que se estabelecem entre os fatores do potencial ecológico (fatores abióticos) e da exploração biológica (fatores bióticos), resultam as características do recobrimento vegetal. Na depressão periférica, onde há maior escassez de umidade e maiores taxas de evapotranspiração, há primazia de vegetação de caatingas que ostentam variados padrões fisionômicos e florísticos (FUNCEME, 2009).

As matas ciliares que recobriam primariamente as planícies aluviais estão fortemente descaracterizadas pelos desmatamentos desordenados. No acesso ao nível de Cimeira da Chapada do Araripe, os patamares se revestem de matas secas ou de faixas de transição com as matas de encostas e com os cerrados, cerradões e carrascos do altiplano sedimentar (Figura 10). A análise integrada da paisagem e dos componentes geoecológicos (geologia, geomorfologia, hidrologia, clima, solos e fitoecologia) que compõem o potencial natural e a exploração biológica derivada, realizada pela FUNCEME.

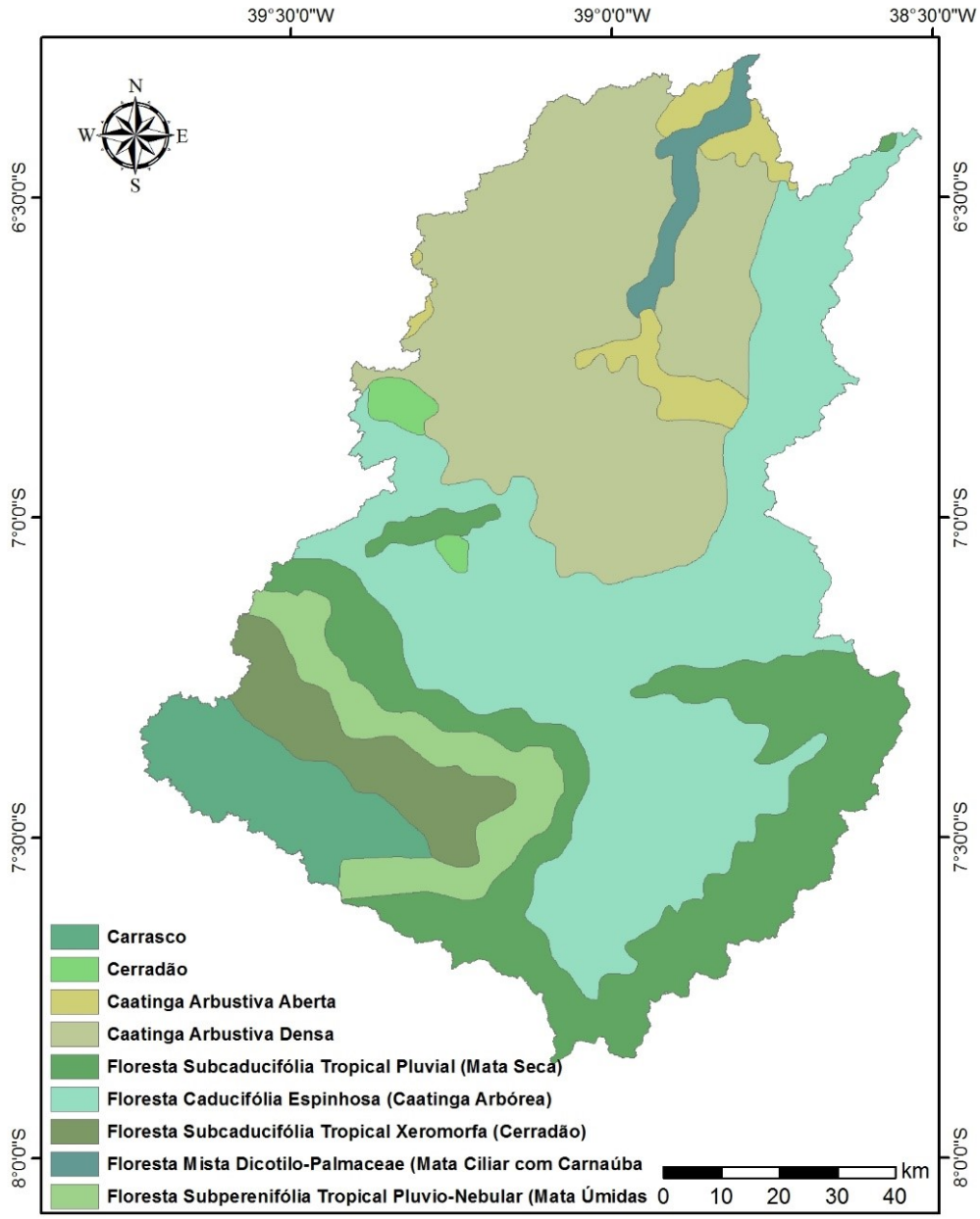


Figura 10 – Classes de vegetação existentes na bacia hidrográfica do Rio Salgado.
Fonte: Funceme (2009).

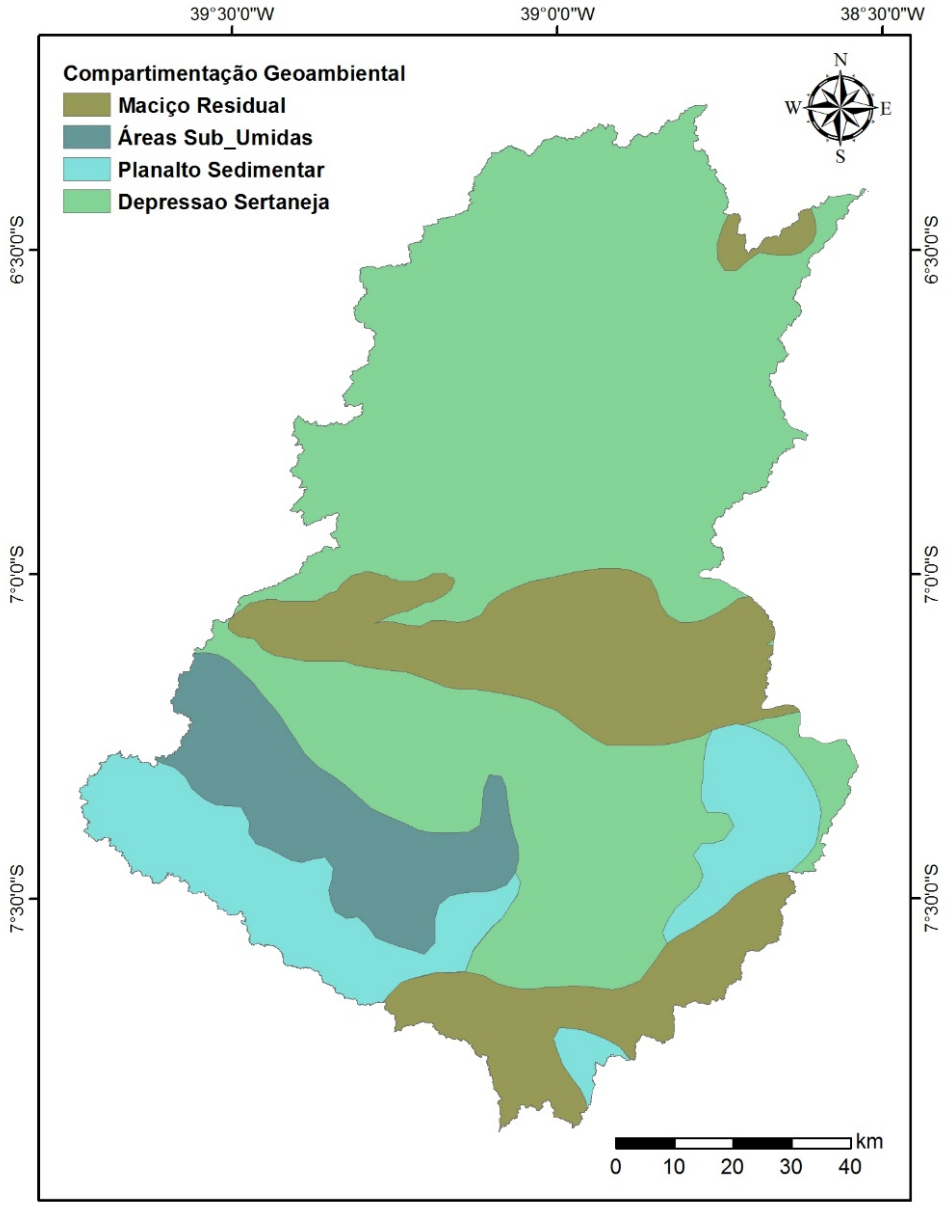


Figura 11 – Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do Rio Salgado.
Fonte: Funceme (2009).

1.4 Águas Superficiais

Esta sub-bacia apresenta baixa capacidade de acumulação em termos de águas superficiais no estado do Ceará (Figura 12), possui um total de 1.695 reservatórios (COGERH, 2018), destes, 254 apresentam área superior a 5 ha (FUNCEME, 2008). Destacam-se os açudes Atalho e Lima Campos, que juntos respondem por 39% da capacidade de acumulação.

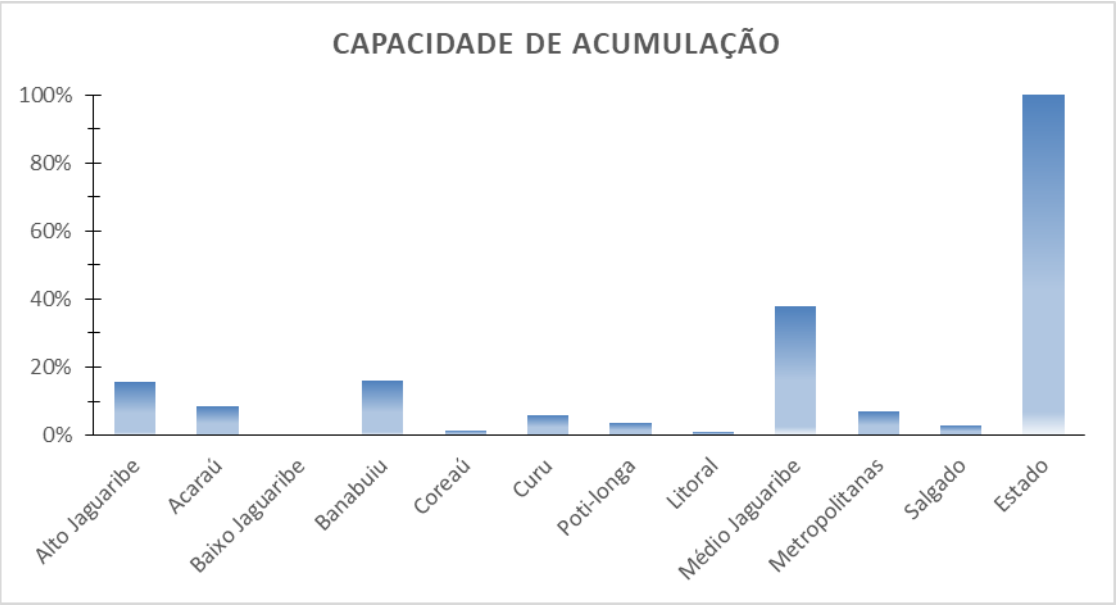


Figura 12 – Capacidade percentual de acumulação de água em cada bacia hidrográfica do estado do Ceará.
Fonte: COGERH (2018).

É importante considerar que parte da água acumulada no açude Lima Campos provém da transferência das águas do açude Orós, localizado na sub-bacia do Alto Jaguaribe, por meio de um túnel (COGERH, 2018). A consolidação da oferta hídrica no Salgado engloba 10 (dez) dos 13 (treze) principais reservatórios da sub-bacia (Figura 13), aqueles que possuem capacidade maior que 10 milhões de m³, tendo em vista que os açudes da região têm como principal função a acumulação de volumes de água que ficam estocados após a estação chuvosa (de fevereiro a maio), para serem depois utilizados na estação seca (demais meses) do mesmo ano.

Deve-se destacar ainda que os açudes servem como reservas interanuais, pois, quando da ocorrência de anos secos consecutivos, tais reservatórios não apresentam volumes para o atendimento às demandas (CEARÁ, 2005). A Tabela 4 apresenta a capacidade de acumulação dos principais reservatórios localizados nesta sub-bacia.

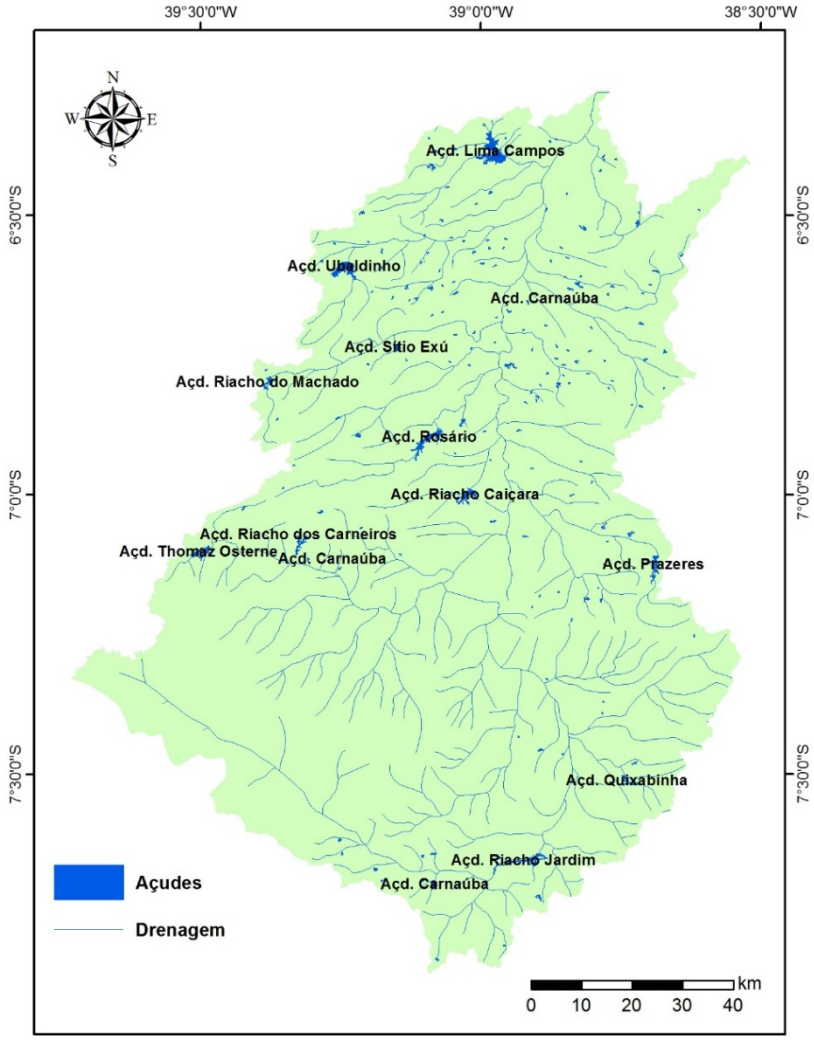


Figura 13 – Principais reservatórios da bacia hidrográfica do Rio Salgado.
Fonte: CEARÁ (2005).

Tabela 4. Principais reservatórios da bacia do Rio Salgado e sua capacidade de acumulação

Nome do açude	Município	Capacidade de acumulação (m³)
Atalho	Brejo Santo	108.250.000
Cachoeira	Aurora	34.330.000
Estrema	Lavras da Mangabeira	2.900.000
Gomes	Mauriti	2.390.000
Lima Campos	Icó	66.380.000
Manoel Balbino	Juazeiro do Norte	37.180.000
Olho d´Água	Várzea Alegre	21.000.000
Prazeres	Barro	32.500.000
Quixabinha	Mauriti	31.780.000
Rosário	Lavras da Mangabeira	47.200.000
Tatajuba	Icó	2.720.000
Thomas Osterne	Crato	28.780.000
Ubaldinho	Cedro	31.800.000
	Total	**447.210.000**

Fonte: CEARÁ (2005).

1.5 Águas subterrâneas

A sub-bacia do Salgado apresenta dois Sistemas Aquíferos: o das rochas sedimentares (porosos, cársticos e aluviais) e os das rochas cristalinas (fissurais), representados na Figura 14. Os sedimentares se caracterizam como mais importantes por possuírem uma porosidade primária e, nos terrenos arenosos, uma elevada permeabilidade, traduzindo-se em unidades geológicas com excelentes condições de armazenamento e fornecimento d'água (COGERH, 2018).

Os cristalinos (fissurais) apresentam um "baixo potencial", pois se encontram inseridos em áreas de rochas do embasamento cristalino, sendo as zonas de fraturas, os únicos condicionantes da ocorrência d'água nestas rochas. A recarga destas fraturas se dá através dos rios e riachos que estão encaixados nestas estruturas, o que ocorre somente no período chuvoso (CEARÁ, 2005).

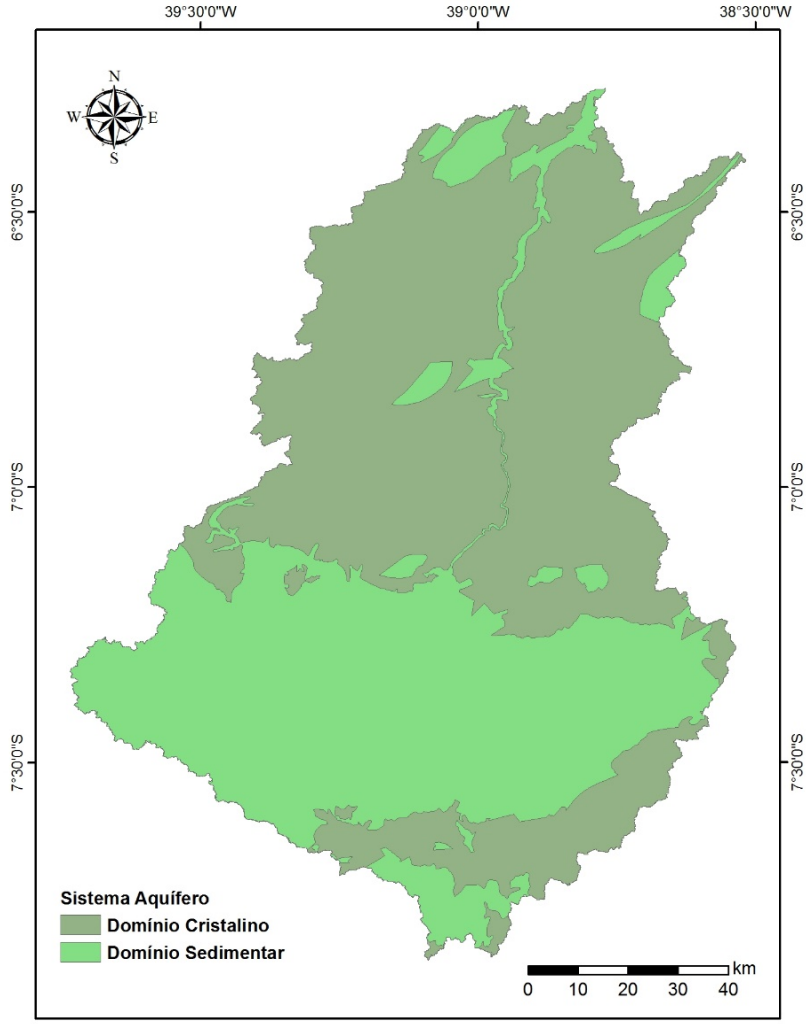


Figura 14 – Localização dos principais sistemas aquíferos da bacia hidrográfica do Rio Salgado.
Fonte: CPRM (2003).

A quantificação e caracterização das captações de água subterrânea na sub-bacia, geradas a partir da sistematização do cadastro dos pontos d'água da CPRM, cadastro de fontes do DNPM e nos cadastros de poços da FUNCEME, SOHIDRA, COGERH, DNOCS, FUNASA, SDR e empresas privadas, até 2006, mostram a existência de 3.645 pontos d'água, sendo: 3.370 poços tubulares; 23 poços amazonas; e 252 fontes naturais (Figura 15), captando água tanto em rochas sedimentares como cristalinas.

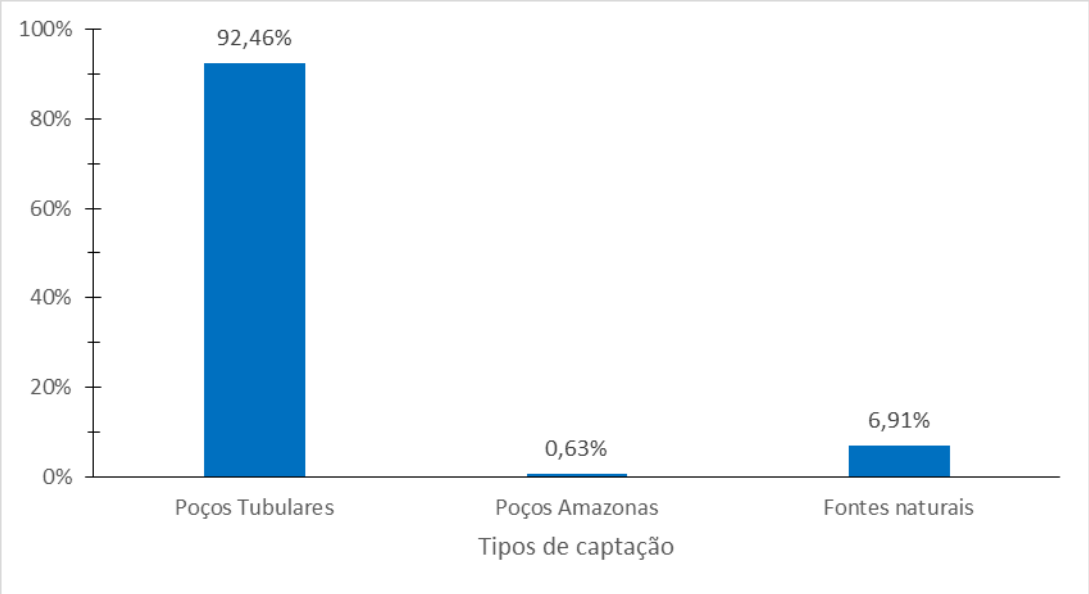


Figura 15 – Tipos de captação de água subterrânea, cadastrados na sub-bacia do Salgado
Fonte: CPRM (2003).

Tabela 5 apresenta a quantidade de pontos de água por município e a Figura 16 a distribuição espacial destes, com destaque para os municípios de Juazeiro do Norte e Crato, que detêm 19,73% e 12,70% dos pontos de água, respectivamente. Entretanto, a área de encosta da Chapada do Araripe, entre os municípios de Crato e Jardim, apresenta surgências de água subterrânea em pontos coincidentes com fraturas e falhas geológicas, condicionadas também pela zona de contato entre o Sistema Aquífero Superior (Formações Exu e Arajara) e o Aquiclude Santana. Estas fontes naturais (252 cadastradas) representam para a região do Cariri uma importante fonte de abastecimento, com destaque para as duas maiores: a da Batateira, no Crato, com 380,00 m³/h e a da Pendência, em Missão Velha, com 352,00 m³/h.

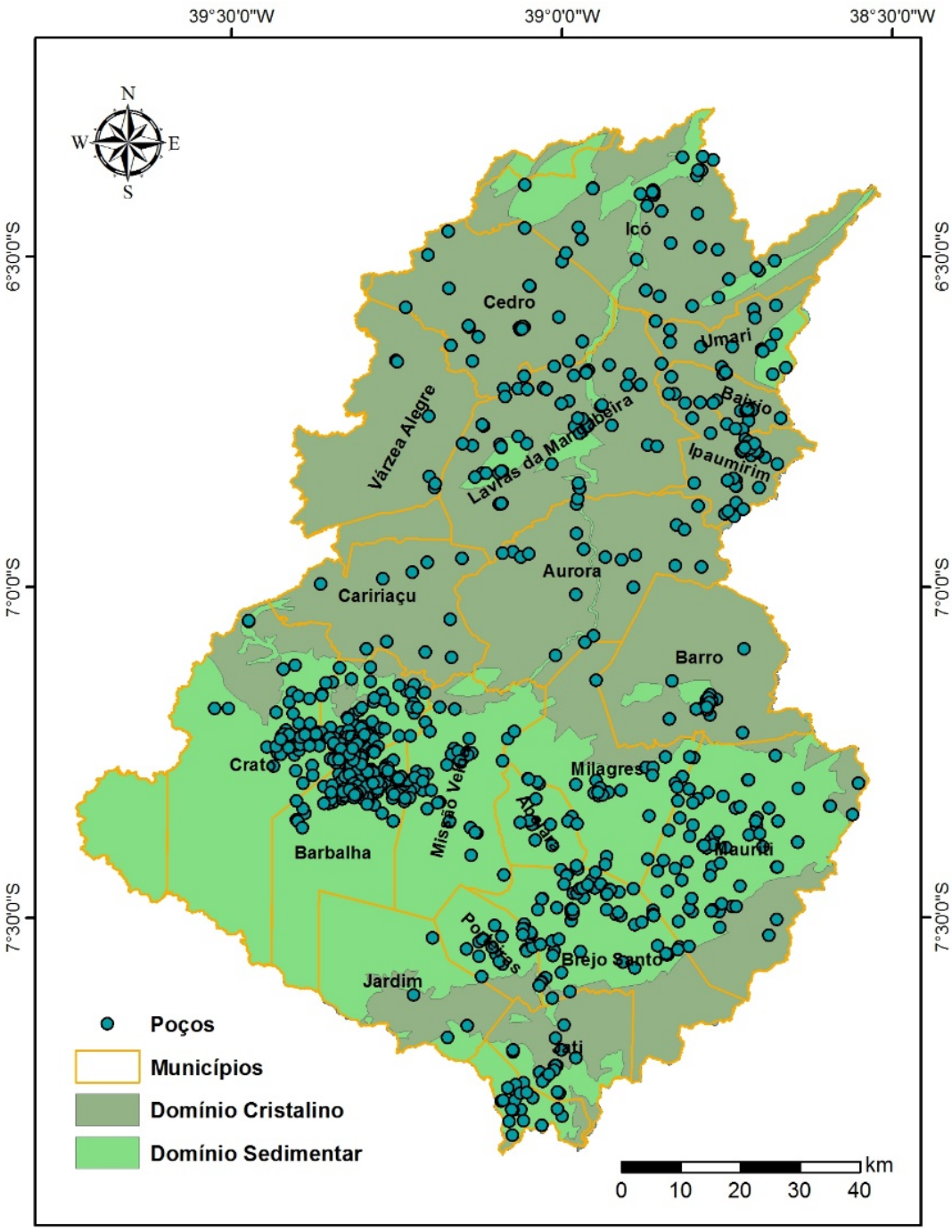


Figura 16 – Distribuição espacial dos pontos d'água cadastrados da bacia hidrográfica do Rio Salgado.

Fonte: COGERH (2018).

Os 3.370 poços tubulares estão distribuídos por toda sub-bacia e captam água dos seguintes aquíferos: porosos (70,74%); cársticos (1,28%), aluviais (9,91%) e fissurais (18,46%). Os aquíferos porosos (2.384 poços) estão representados na sub-bacia do Salgado principalmente pelos arenitos da Bacia Sedimentar do Araripe, de pequenas bacias e por

sedimentos não consolidados do Terciário. Do total destes poços, 83,22% possuem informação sobre profundidade, com uma média de 87,38 m, e 80,39% destes poços, com profundidade maior ou igual a 60,00 m. Os dados de vazão existem para 61,54% destes poços, com valores médios de 19,04 m³/h. Em cerca de 85% dos casos ocorrem vazões superiores a 2 m³/h, e em apenas 5,45% e inferiores a 0,50 m³/h. Destaques para dois poços da cidade do Crato, nos bairros de São Raimundo, com 300,00 m³/h e Vila Alta, com 263,00 m³/h.

Tabela 5. Distribuição dos pontos de água por municípios inseridos na bacia do Rio Salgado

Município	Poços Tubulares	Poços amazonas	Fontes Naturais	Total
Abaiara	72	-	-	72
Aurora	58	9	-	67
Baixio	55	-	-	55
Barbalha	307	-	34	341
Barro	84	-	-	84
Brejo Santo	200	3	13	216
Caririaçu	78	1	-	79
Cedro	123	3	-	126
Crato	392	-	71	463
Granjeiro	34	-	-	34
Icó	106	2	-	108
Iguatu	5	-	-	5
Ipaumirim	71	-	-	71
Jardim	58	-	42	100
Jati	73	-	-	73
Juazeiro do Norte	717	2	-	719
Lavras da Mangabeira	143	2	-	145
Mauriti	260	-	1	261
Milages	153	-	-	153
Missão Velha	147	-	52	199
Orós	16	-	-	16
Penaforte	38	-	-	38
Porteiras	49	-	39	88
Umarí	57	1	-	58
Várzea Alegre	74	-	-	74
Total	**3370**	**23**	**252**	**3.645**

Fonte: Cordeiro et al. (2009).

Os aquíferos cársticos (30 poços) estão representados pelos calcários da Formação Santana da Bacia Sedimentar Araripe, que ocupam uma pequena porção da sub-bacia do Salgado. Dos 93,33% de poços com informação tem-se para a profundidade média um valor de 92,25m, sendo que 83,33% têm profundidade maior ou igual a 60,00m. Quanto à vazão, tem-se uma média de 5,91 m³/h para os 73,33% de poços com dados, 59,09% possuem vazões superiores a 2,00m³/h e 13,64%, e inferiores a 0,50 m³/h.

Os aquíferos aluviais (334 poços) estão representados por depósitos sedimentares Quaternários ao longo dos rios e riachos da sub-bacia do Salgado e mesmo ocupando uma pequena fatia da área da sub-bacia possui uma grande distribuição espacial, o que favorece o abastecimento das populações difusas. A profundidade dos poços com informação (80,84%) é em média 7,48 m, e 91,85% destes têm profundidade inferior a 10,00m. Somente 38,92% dos poços têm dados de vazão, com valores médios de 10,49 m³/h, vazões superiores a 2,00 m³/h em 56,92% e inferiores a 0,50 m³/h em apenas 0,77%.

Os aquíferos fissurais representados por rochas do embasamento cristalino Pré-Cambriano ocupam 58,96% da área da sub-bacia do Salgado e graças a sua distribuição espacial são de grande importância para o abastecimento das populações interioranas, principalmente as difusas. A análise dos dados de 622 poços tubulares perfurados nestes aquíferos mostra que em relação à profundidade 85,69% dos poços têm esta informação, sendo a média igual a 61,09 m (65,85%) dos poços são de profundidade maior ou igual a 60,00 m. E em relação a vazão de 74,44% dos poços, os valores médios são da ordem de 3,15 m³/h, vazões superiores 2,00 m³/h ocorrem em 37,15% dos casos e inferiores a 0,50 m³/h em 30,45%.

Com base nos dados dos poços cadastrados que captam água dos aquíferos da sub-bacia do Salgado, tem-se que a disponibilidade efetiva instalada é de 90,18 milhões de m³/ano (Tabela 6), e das fontes é de 37,42 milhões de m³/ano, que somadas são capazes de beneficiar, aproximadamente, 466.000 famílias. As águas dos sistemas aquíferos sedimentares são de excelente qualidade química, principalmente nos aquíferos de constituição arenosa, que não contém íons salinos em sua composição mineralógica.

Quanto ao Sistema Cristalino, as suas águas são, geralmente, de qualidade regular, podendo-se encontrar águas muito duras (carbonatadas), devido ao longo tempo de residência das mesmas quando o fraturamento não oferece condições de circulação, ou quando o aquífero não recebe recarga por falta de exploração. Entretanto, a vasta

distribuição espacial destes aquíferos torna-os de vital importância, principalmente para o abastecimento das populações difusas.

Tabela 6. Cálculo da disponibilidade efetiva instalada na bacia do Rio Salgado

Aquífero	**Vazão média (m^3/h)**	**Número de poços**	**Período de operação (2.920 horas por ano)**	**Disponibilidade efetiva de água**
Porosos	19,04	1467	2920	81.560.505,60
Cársticos	5,91	22	2920	379.658,40
Aluviais	10,49	130	2920	3.982.004,00
Fissurais	3,15	463	2920	4.258.674,00
Fontes	18,71	224	8760	37.419.916,80
Total	**–**	**–**	**–**	**127.600.758,8**

Fonte: Cordeiro et al. (2009).

CAPÍTULO III
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

1. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA HIDROPEDOGEOLÓGICA NO BALANÇO HÍDRICO

1.1 Identificação e Caracterização das Zonas de Profunda Aridez no Semiárido Devido às Limitações Físicas

Esta análise será conduzida de modo a definir as características das diversas variáveis que compõem o meio físico. Sequencialmente, serão apresentadas as condições litoestratigráficas e as características das feições morfogenéticas; características climáticas e hidrológicas; e, finalmente, distribuição dos solos, suas principais propriedades e os padrões de cobertura vegetal. Essa sequência apresentará uma cadeia de produtos geoambientais.

Para a realização deste estudo também foram realizados diversos trabalhos de campo para confirmação verificação *in situ* das condições geoambientais em áreas caracterizadas por ilhas hidro-pedo-geológicas.

1.2 O Modelo SWAT

O *Soil and Water Assesment Tool* (SWAT) é um modelo de domínio público, que foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture* (ARS/USDA) com o objetivo de analisar os diferentes processos físicos que ocorrem em bacias hidrográficas, como os efeitos e impactos gerados pela as alterações decorrentes do uso e manjo do solo, gerenciamentos de reservatórios, retiradas e escoamento de aguas superficial e subterrâneas, quantificação de sedimentos, nutrientes e poluentes de origem agroquímicos (NEITSCH et al., 2011).

O modelo SWAT é o resultado da incorporação de diversos fundamentos de outros modelos desenvolvidos como o C*hemicals, Runoff, and Erosion fron Agriculture Management Systems* – CREAMS (KNISEL, 1980), o *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems* – GLEAMS (LEONARD et al., 1987) e o *Erosion*

Productivity Impact Calculator – EPIC (WILLIAMS et al., 1984). Atualmente, o modelo SWAT descendente direto do *Simulator for Water Resourcer in Rural Basins* – SWRRB (WILLIAMS *et al*., 1985), agrupando também outros modelos, como o *Routing Outputs to Outlets* – ROTO (ARNOLD et al., 1998), QUAL2E (BROWN e BARNWELL, 1987), *Carbon Cycling Routine* – CFARM (KEMANIAN et al., 2011), além de um gerador de clima, uma rotina de transporte de sedimentos e um submodelo de água subterrânea (NEITSCH et al., 2011; ARNOLD et al., 2012)

O SWAT segundo Neitsch et al. (2011), é um modelo de base física que permite que um número de diferentes processos físicos possam ser simulados em uma bacia hidrográfica, e semi-distribuído capaz de considerar a variabilidade espacial e temporal, que utiliza a equação de regressão para descrever a relação entre as variáveis de entrada e saída, que ocorre por meio de processos físicos como o movimento da água e de sedimentos, clima, propriedades dos solo, topografia, crescimento da vegetação, ciclo de nutrientes e práticas de manejo do solo existentes na bacia hidrográficas.

Segundo Neitsch et al. (2011), o programa SWAT tem como principais características a possibilidade de simulação de uma bacia hidrográfica em diferentes escalas, com dados de entrada de fácil acesso como dados climáticos, de solos, topografia e uso do solo, com um sistema computacional eficiente, capaz de avaliar os impactos ao longo prazo em diferentes cenários com baixo investimentos de capital e tempo.

Integrou se a esse modelo hidrológico o Sistema de Informação Geografia (SIG), que possibilitou o armazenamento, processamento, analises e a entrada de banco de dados, para a elaboração e edição de cenários ambientais e sua representação em forma de gráficos e mapas (Marchioro, 2008).

Existem diversos modelos hidrológicos que foram e vem sendo desenvolvidos ao longo tempo. Dentre esses modelos já desenvolvidos o SWAT destaca se por ser um modelo hidrológico de grande difusão e fácil aplicação em pesquisas, conforme pode ser constatados no estudo desenvolvido por Srinivasan (2013), que constatou a existência de mais 1400 publicações realizadas em todo o mundo utilizando esse modelo.

A aplicação do SWAT em estudo hidrológicos vem se destacando devido a sua possibilidade de analises integrada dos processos hidrológicos em diferentes tipos de abordagem como analises dos impactos das mudanças climáticas e das mudanças de uso do solo nos componentes hidrológicos como a recarga subterrânea ou a vazão, entre

outros como pode ser visto nos estudos desenvolvidos por Arnald et al (2000), Machado (2002), Chaplot (2005), Li et al (2009), : Bonumá (2011), Carvalho Neto (2011), Yan et al. (2013), Ogbu e Mbajiorgu (2013), Ferrigo (2014), Narsimlu et al. (2015), Brighenti (2015), Santos (2016). Todos esses estudos buscaram entender a interação entre solo, uso do solo e a água.

No SWAT a modelagem é realizada dividindo a bacia hidrográfica em sub-bacias onde é gerada a rede de drenagem com base nos dados topográficos do terreno. Na sequencia cada sub-bacia e dividida em Unidade de Respostas Hidrológicas (HRU), formando um conjunto de área (fração de uma sub-bacia), onde existem uma única combinação de uso e ocupação do solo, tipo de solo e declividade.

A modelagem e o processamento realizado pelo o SWAT são feitas de acordo com as seguintes etapas: primeiramente o programa calcula os fluxos de cada HRU por unidade de área separadamente e depois somada em conjunto para determinar as cargas totais da sub-bacia, de acordo com as frações de HRU existentes. Em seguida, as respostas geradas pelas as sub-bacias são então direcionadas para as calhas dos rios de acordo com a rede hídrica existente na bacia na bacia hidrográfica capacidade (Neitsch et al., 2011).

O SWAT utiliza o balanço hídrico como força motriz no processamento. A simulação do processo hidrológico da bacia hidrográfica pelo programa requer a subdivisão dos dados em duas fases. Na primeira estão aqueles que pertencem a fase terrestre do ciclo hidrológico, onde é calculado a quantidade de água definida pela a evapotranspiração real e potencial, o escoamento superficial, o deslocamento da água pelas as camadas do solo, o fluxo de base, os níveis de erosão dentre outros elementos que serão carreados para a calha principal do rio em cada sub-bacia. Na segunda fase, a chamada aquática, esta é voltada para o movimento da água, sedimento, pesticidas, nutrientes definidas pela a propagação desses elementos pela a rede de drenagem até o exutório da bacia (NEITSCH et al., 2011).

A seguir serão descritos de forma simplificada a teoria relacionada ao modelo SWAT, principalmente no que se refere a modelagem dos componentes dos ciclo hidrológico existente na bacia hidrográfica e a propagação da água nas redes de drenagem. Não obstante, o modelo SWAT ser capaz de simular a produção de sedimentos, o transporte de pesticidas e a qualidade da água e outros processos existentes numa bacia hidrográfica, o enfoque será direcionado a simulação hidrológica do modelo.

O resumo dos principais aspectos da integração dos modelos citados anteriormente ao modelo SWAT pode ser consultado em Neitsch et al. (2011) e Arnold et al. (2012). A Figura 17 apresenta um esquema ilustrativo da origem do modelo SWAT.

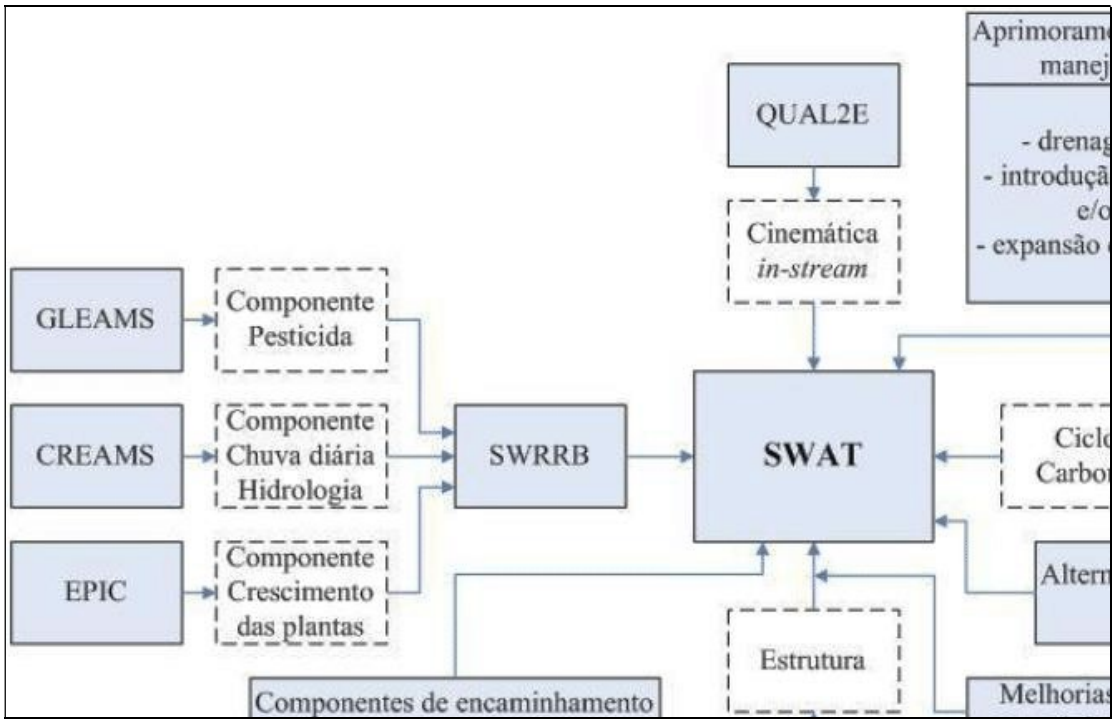


Figura 17 – Origem do modelo SWAT.
Fonte: Ferrigo (2014).

O SWAT é composto por diversas equações que simulam processos físicos existentes na superfície terrestre, podendo ser dividido em oito categorias (ARNOLD et al., 1998), que são: hidrologia, sedimentologia, temperatura do solo, crescimento de culturas agrícolas, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola.

Para descrever a relação entre as variáveis de entrada e saída o SWAT necessita de dados específicos de clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gestão do uso da terra ocorrentes na bacia. Os processos físicos associados ao movimento da água e dos sedimentos, crescimento de plantas, ciclagem de nutrientes e outros, são modelados diretamente pelo SWAT por meio destes dados de entrada (NEITSCH et al., 2005). Para a execução rigorosa das equações, os dados de entrada necessários são bastante detalhados (DE MEDEIROS et al., 2019).

Esse modelo vem sendo cada vez mais utilizado em nível mundial para as mais diversas linhas de pesquisas por se tratar de um modelo distribuído, capaz de especializar os processos físicos em escala de bacia hidrográfica, e por levar em consideração informações sobre clima, hidrologia, propriedades do solo, uso e ocupação do solo, topografia, entre outros parâmetros que possibilitam a obtenção de resultados mais robustos sobre processos físicos muitas vezes complexos (GASSMAN et al., 2007).

O modelo SWAT possui aplicabilidade comprovada para auxiliar gestores ambientais em práticas de conservação do solo e água em bacias hidrográficas. Diante de estudos promissores com a utilização do modelo SWAT em diversos locais do mundo, esse modelo torna-se um suporte para resultados e fundamentação científica, motivando discussões e propostas de soluções aos problemas ambientais em bacias hidrográficas (UZEIKA, 2009).

1.2.1 Dados de Entrada do Modelo SWAT

Sua base conceitual faz com que o SWAT exija informações precisas quanto à bacia estudada, requerendo vários dados de entrada que estão relacionados com as características físicas da bacia, tais como informações sobre propriedades do solo, topografia, vegetação e uso e cobertura do solo, além de dados climáticos. A Figura 18 ilustra os dados de entrada necessários e os processos do modelo:

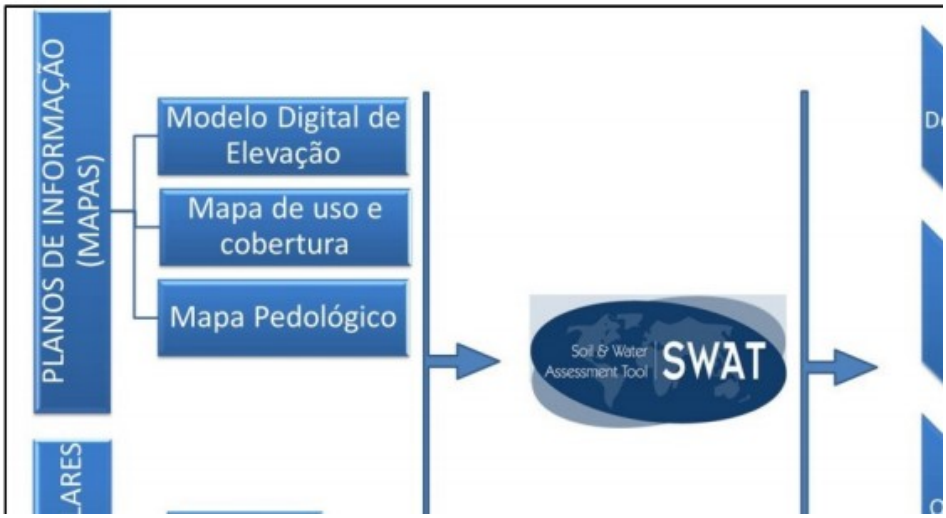


Figura 18 – Dados de entrada no SWAT e resumo dos processos.
Fonte: Carvalho (2014).

O modelo SWAT se integra ao SIG por meio de uma extensão, denominada ArcSWAT, desenvolvida para o software de SIG ArcGIS® da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI). A interface do ArcSWAT é responsável pelo pré e pós processamento de dados para a execução do modelo hidrológico SWAT e utiliza para isso diversas ferramentas nativas do ArcGIS®. Os processos físicos são modelados diretamente pelo SWAT através dos dados de entrada. Para maiores detalhes quanto as fórmulas utilziadas pelo modelo SWAT, deve-se consultar os trabalhos de Carvalho Neto (2019) e Santos (2016).

1.3 Dados de Entrada do Modelo SWAT

O SWAT foi escolhido para o desenvolvimento desse trabalho em virtude de ser uma ferramenta importante para estudos que trabalham com os efeitos da modificação no uso e ocupação do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, bem como na produção de sedimentos (ARNOLD *et al*., 1998).

O modelo SWAT funciona como uma extensão do programa ArcGIS (*ESRI – Environmental Systems Research Institute*). O modelo geo-espacial ArcSWAT é responsavel pelas ferramentas necessárias às etapas de pré e pós-processamento dos mapas temáticos necessários para a execusão do modelo hidrológico SWAT. As informações dos dados de entrada capazes de serem armazenadas no ArcSWAT, são os dados geoespacial, númerico e de texto, alimetando assim os algarítmos da modelagem da bacia hidrográfica em estudo (Oliveira *et al*., 2006). Os dados geoespaciais refere-se aos arquivos de Modelo do Terreno (MNT), uso e ocupação do solo e tipo de solo, os dados de numéricos e de textos caracterizam os dados espaciais, cliamticos e hidrológicos.

A construção da base de dados foi direcionada seguindo as recomendações do referencial teórico do SWAT conforme publicado por Neitsch *et al*., (2009) e tambem os procedimentos de entrada e saída do modelo, conforme documentação tutorial e metodológica desenvolvida pelos criadores do SWAT com revisão e atualização publicadas por Arnald *et al*., (2012). Foi utilizado o ArcSWAT na versão 10.3, desenvolvido pelo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, em parceria com a Texas A&M University.

A interface desenvolvida entre o SWAT e o ArcGIS, facilita a entrada de dados no modelo, além de possibilitar a subdivisão automática da bacia em sub-bacias com a utilização dos dados do MNT. Essa interface possibilita que os dados de saída sejam exibidos em forma de mapas, gráficos e tabelas.

1.4 Parametrização do Banco de Dados do Modelo SWAT

Para uma boa modelagem hidrológica é preciso de dados confiáveis tanto na qualidade como na quantidade. Quando não se tem dados hidrológicos de confiança os modelos hidrológicos ficam limitados, com dificuldade de formular matematicamente alguns processos no comportamento espacial de variáveis e fenômenos. Quanto menor o número de variáveis de entrada, maiores serão as incertezas dos prognósticos, os dados permitem aferir os parâmetros e reduzir as incertezas dos mesmos na estimativa das variáveis hidrológicas (TUCCI, 1998).

Uma das vantagens de se utilizar o SWAT como uma ferramenta na modelagem hidrológica é o fato de que este modelo permite a obtenção de resultados distribuídos espacialmente, além de possibilitar a análises em espaços de tempo sub-diário, diário, mensal e anual. Inclui também rotinas do escoamento superficial, percolação, fluxo lateral, fluxo sub-superficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração (NEITSCH et al., 2005). Esse modelo vem sendo utilizado em todo o mundo (GASSMAN et al., 2007) por se constituir, também como uma ferramenta empregada na gestão dos recursos naturais, sobretudo, para a agricultura e para os recursos hídricos.

Para a realização da simulação hidrológica no modelo SWAT é preciso de variáveis de entrada, tais como: dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Além de dados das propriedades dos solo, topografia, vegetação e práticas de gestão do uso do solo. No Brasil para realizar a modelagem hidrológica com o SWAT é preciso aquisição e organização dos dados de entrada necessários para suprir o modelo de acordo com a realidade da bacia analisada, e dessa forma estabelecer parâmetros adequados para a utilização do modelo, para que a modelagem possa ser realizada de forma consistente.

1.4.1 Modelo Digital de Elevação

A primeira etapa estabelecida para a simulação da modelagem no SWAT consistiu em discretizar e delimitar a bacia hidrográfica em sub-bacias, que podem ser tratadas como unidades independentes no processo de modelagem. Neste processo também é definida a área mínima de fluxo e acumulação para geração da rede de drenagem na bacia e nos exutórios.

Essa etapa é realizada pelo o ArcSWAT que requer como dado de entrada apenas o Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia. O MDE utilizado foi o do projeto desenvolvido no ano de 2000 pelas Agência Nacional de Inteligência Geoespacial (NGA) e pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), ambas dos Estados Unidos da América. O MDE utilizado possui resolução espacial de 30 m e foi obtido através do *United States Geological Survey* (USGS).

Em seguida são definidas a direção de fluxo, área de acumulação de água e sedimentos com base na topografia do terreno. Nesse momento é necessário indicar a área mínima de fluxo e acumulação para geração da rede de drenagem na bacia e dos exutórios. Quanto menor for o valor da área mínima maior será o nível de detalhes da rede de drenagem. Adotamos para a bacia do Rio Salgado o valor foi de 4000 ha a partir de vários testes com diferentes valores para a área mínima de fluxo e acumulação. Após essa etapa foram então criadas 180 sub-bacias, cada qual com suas respectivas características topográficas, sendo 3 exutório monitorados com dados hidrológicos de vazão.

Com a rede de drenagem e os exutórios criados, o próximo passo é indicar a localização do exutório da bacia. Com o exutório selecionado, o *software* é capaz de delinear a bacia hidrográfica e delimitar as sub-bacias. Após essa etapa são calculados os parâmetros topográficos em cada sub-bacia. A Figura 19 mostra o resultado da discretização da bacia do Rio Salgado.

1.4.2 Uso e ocupação do solo

O mapa de uso e ocupação do solo utilizado nesse estudo foi elaborado a partir de imagens Landsat do ano 2000, com resolução espacial de 30 m, junto ao projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MAPBIOMAS). O MAPBIOMAS é uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa com especialistas nos biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, SIG e ciência da computação. Posteriormente

à geração do mapa de uso e ocupação do solo da Bacia do Rio Salgado, fornecemos este produto ao ArcSWAT como primeira etapa para criação das unidades de resposta hidrológica (HRU). A Tabela 7 apresenta as classes de uso e ocupação do solo utilizado neste estudo.

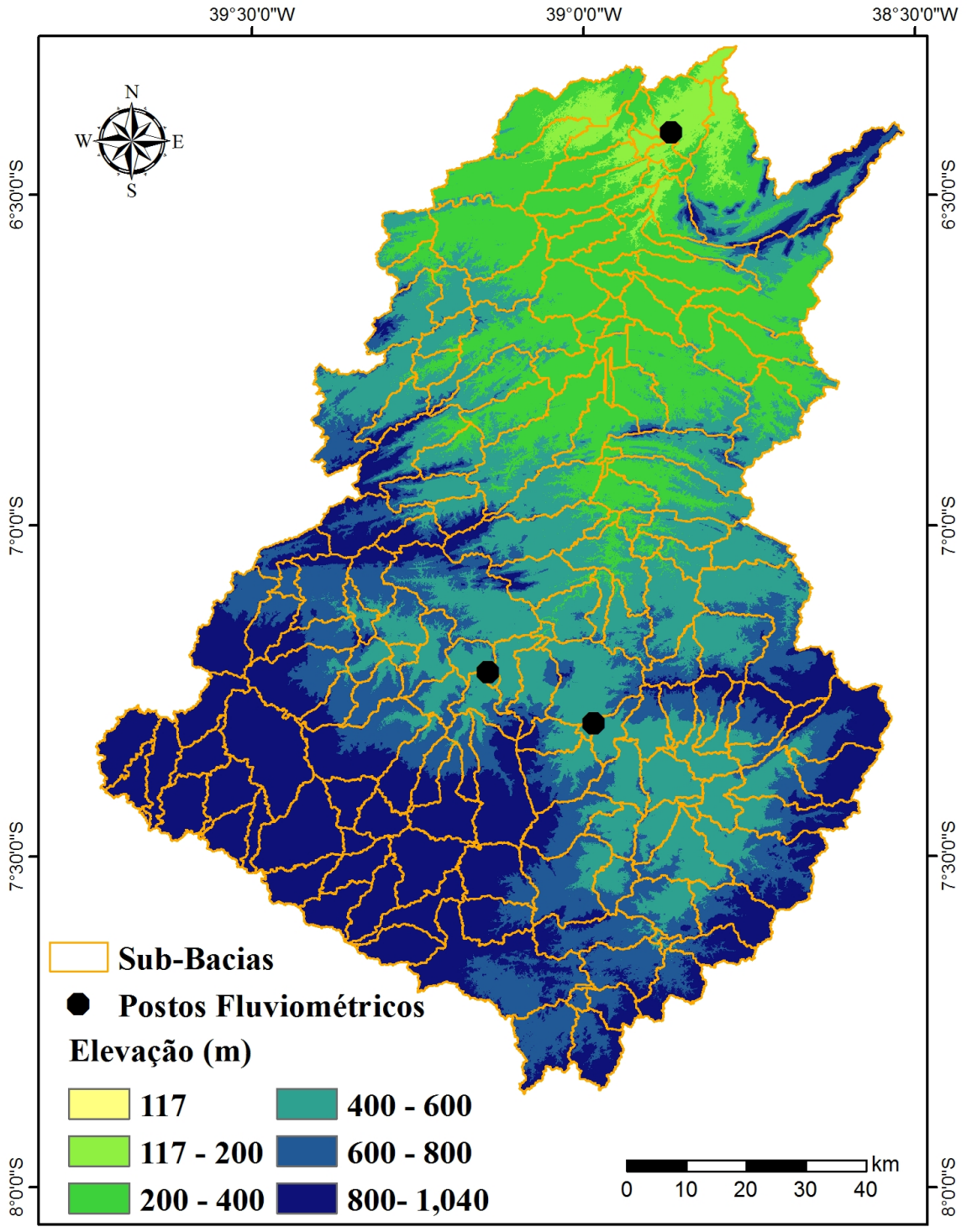


Figura 19 – MDE utilizado para a delimitação automatizada das sub-bacias no modelo SWAT.

Tabela 7. Classes de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Salgado e do banco de dados do SWAT.

Classe de uso do solo na bacia	**Classe de uso do solo no SWAT**	**Área ocupada (km^2)**	**Área ocupada (%)**
Açudes	*Water – WATR*	55,73	0,43
Caatinga arbórea-arbustiva	*Forested Mixed - FRST*	2492,32	19,16
Caatinga arbustiva	*Range-Brush – RNGB*	7969,28	61,26
Caatinga herbácea	*Range-Grass – RNGE*	1106,54	8,51
Solo Exposto	*Barren - BARR*	52,72	0,41
Agricultura e Pastagem	*Agricultural Land-Generic*	1332,38	10,24

Em seguida foi realizada a associação entre as classes de uso da bacia do Rio Salgado com as classes existentes no banco de dados do modelo tendo como fator determinante o porte da vegetação (excetuando-se as classes de Açudes e Solo Exposto). Vemos que a Bacia do Rio Salgado possui uma distribuição do uso e ocupação do solo com grande presença das classes de Caatinga Arbustiva e Caatinga Arbórea-Arbustiva, seguidas da classe de Caatinga Herbácea, o que indica uma boa cobertura do terreno pela vegetação. Contudo, essa distribuição do uso e ocupação do solo identificada para a Bacia do Rio Salgado pode estar sendo influenciada pela data de coleta da imagem de satélite.

1.4.3 Mapa e parâmetros do solo

O SWAT requer uma série de dados acerca das características físicas dos solos para poder realizar as simulações hidrológicas. Os parâmetros necessários a simulação são tipo de solo, profundidade da camada de solo, grupo hidrológico de solo, densidade, porosidade, condutividade hidráulica saturada, capacidade de água disponível, teores de carbono, areia, argila, silte e rocha, além da profundidade da raiz, potencial de fraturamento do solo, albedo e erodibilidade (NEITSCH et al, 2005).

Tendo por base os dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2018), foram catalogados oito tipos de solos para a Bacia do Rio Salgado. Esses dados estavam distribuídos em nove cartas (mapas) na escala de 1:25.000.

Os dados gerados, catalogados e distribuídos nessas cartas foram agrupados para gerar o mapa de solo da bacia do Rio Salgado.

Com os dados de solos catalogados e agrupados no mapa, o SWAT requer o fornecimento dos parâmetros físicos do solo que influenciam nos processos de simulação do escoamento superficial e subsuperficial, erosão, infiltração, evaporação da água no solo, entre outros. Para cada tipo de solo são necessários dados tabulares, sendo um total de 20 parâmetros, em que 14 desses são relativos a cada camada do perfil do solo, obtidos a partir do Levantamento Exploratório/Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 1972), disponilizado pela a Embrapa Solos por meio do portal na internet: Sistema de Informação de Solos Brasileiro (http://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/).

No SWAT, para diferenciar os parâmetros relativos a cada camada do perfil do solo, dentro da rotina do modelo é adicionado o algarismo referente ao número da camada após a sigla do parâmetro. Assim, por exemplo, para capacidade de água disponível na primeira camada do solo tem-se Sol_AWC1, para a segunda camada SOL_AWC2, e assim sucessivamente até que complete o número de camadas de cada solo.

Com base nos dados obtidos da EMBRAPA (1972) foi possível organizar os parâmetros do solo relativos à profundidade dos horizontes (SOL_Z), ao número de horizontes do solo (NLAYERS), às porcentagens de areia (SAND), silte (SILT), argila (CLAY) e cascalho (ROCK), carbono orgânico (CBN) e à profundidade máxima da raiz (SOL_ZMX), que foi adotada como sendo o valor da profundidade do último horizonte do solo.

O grupo hidrológico (HYDGRP) corresponde à classe à qual o solo pertence, de acordo com NRCS (2007), a partir do valor de condutividade hidráulica (mm/h) que ele possui, podendo aumentar ou diminuir as taxas de infiltração no solo dependendo do valor. Nessa classificação, os solos são organizados em quatro classes distintas: A, B, C e D, de acordo com as características hidrológicas dos EUA. No entanto, por não representar os diferentes tipos de solo brasileiros e suas respectivas características, visando melhorar a aplicabilidade desse método, Sartori et al. (2005) propuseram a classificação para os solos brasileiros, a qual foi utilizada essa metodologia para o presente trabalho. Essa classificação esta apresentada na Tabela 8.

Tabela 8. Classificação hidrológica dos solos para as condições brasileiras proposta por Sartori et al. (2005).

GHS*	Principais Características
A	• Solos muito profundos (prof. >200 cm) ou (100 a 200 cm); • Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância a erosão; • Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20); • Solos de textura média; • Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil; • Solos bem drenados ou excessivamente drenados; • Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; • A textura dos horizontes superficial e subsuperficial podem ser: media/media, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa. São enquadros nesse grupo: LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VEMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura media, mas com horizonte superficial não arenoso.
B	• Solos profundos (100 a 200 cm) • Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão; • Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50; • Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; • Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil; • Solos com argila de baixa atividade (Tb), minerais de argila 1:1; • A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/media, media/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa. São enquadrado nesse grupo: LATOSSOLOS AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMAELO, ambos de textura media, com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLOS BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO, NEOSSOLO QUARTIZARENICO; ARGISSOLO VERMELHO OU VERMELHO AMARELO de textura arenosa/media, media/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.
C	• Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm); • Solos com baixa taxa de infiltracao e baixa resistência e tolerância a erosão; • Solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; • Solos associados a argila de atividade baixa (Tb); • A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/media e media/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa. São enquadrados nesse grupo: ARGISSOLO pouco profundo, que não apresenta mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudanca textural abrupta; CAMBISSOLO de textura media e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, com caracteristicas físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FEROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.
D	• Solos com taxa de infiltração baixa, oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão; • Solos rasos (prof. < 50 cm); • Solos pouco profundos associados a mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada a argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1; • Solos argilosos associados a argila de atividade alta (Ta); • Solos orgânicos. São enquadrados nesse grupo: NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLO DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados a mudança textural abrupta.

*Grupo Hidrológico do solo

Os dados referentes a condutividade hidráulica (SOL_K), utilizada para classificar o grupo hidrológico de cada solo, bem como da porosidade (ANION_EXCL), foram baseadas na proposta de Rawls et al. (1982), que fizeram uma estimativa de algumas propriedades do solo, com base na textura a partir de experimentos de campo realizados nos Estados Unidos. Já para a obtenção dos valores da capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC), foram utilizados os valores recomendados por Salter e Williams (1967; 1969), que estimaram a capacidade de água disponível com base nas características de textura do solo.

Para a determinação da densidade aparente do solo (SOL_BD) utilizou-se o *software Soil Water Characteristics Hydraulic Proprieties Calculator*, desenvolvido por Saxton e Rawls (2006). Esse programa computacional é usado para estimar a densidade aparente do solo mediante informações sobre a textura do solo, salinidade, compactação, teor de matéria orgânica e presença de cascalho no solo.

1.4.4 Dados meteorológicos e de vazão observados

A bacia do Rio Salgado foi escolhida para o desenvolvimento dessa pesquisa devido a grande disponibilidade de dados meteorológicos e hidrológicos necessários para uma boa modelagem do SWAT. Para a calibração foram utilizados dados dos anos entre 1986 a 2000. A validação utilizou dados dos anos entre 2001 a 2017. Dos 36 anos de dados observados, os 5 primeiros anos foram utilizados para o período de aquecimento do modelo. Nessa área, foram catalogadas 83 estações pluviométricas, das quais foram utilizadas 22 estações devido a grande quantidade e qualidade dos dados diários. Na bacia do Rio Salgado existem 7 estações fluviométricas, das quais foram utilizadas 3 estações pela qualidade e quantidade de dados com o mesmo período das estações pluviométricas.

Os dados necessários para o gerador climático foram coletados em 2 estações meteorológicas existentes nessa na área. Essas estações estão distribuídas na bacia do Rio Salgado conforme a Figura 20.

Os dados das estações pluviométricas e fluviométricas foram adquiridos diretamente no HIDROWEB, da Agencia Nacional de Águas (ANA). Já os dados de temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa, foram coletados nas estações de Barbalha e Iguatu operadas pelo o Instituto de Nacional de Meteorologia (INMET).

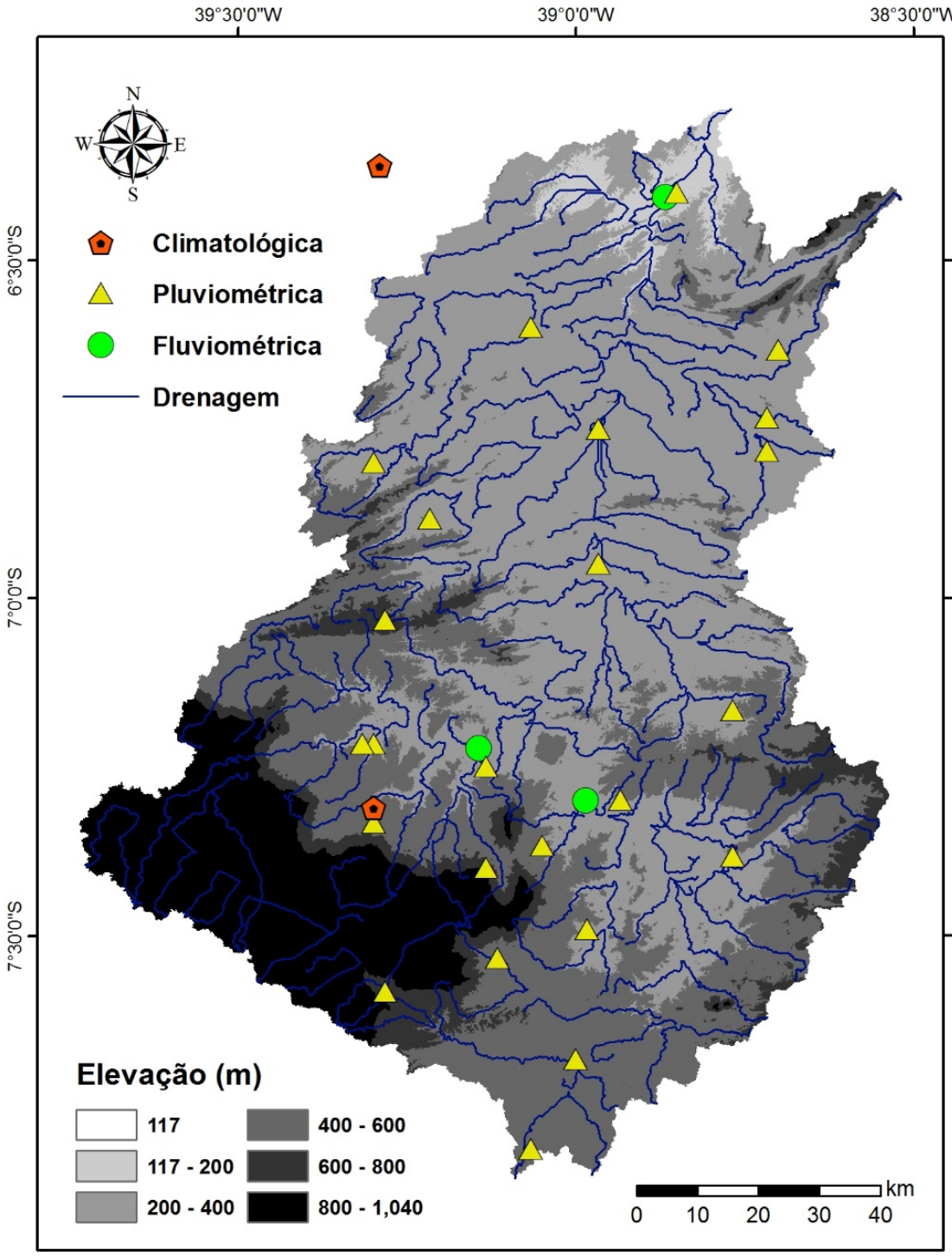


Figura 20 – Distribuição espacial dos postos fluviométricos, pluviométricos e estação climatológica na bacia do Rio Salgado usados neste estudo.

Os dados gerados na bacia do Rio Salgado têm toda uma qualidade e quantidade tanto nas estações pluviométricas como nas estações fluviométricas. Esses dados foram analisados e constatou-se que o período de maior qualidade e quantidade de dados para esssa estações é de 1981 a 2017, perfazendo um total de 36 anos. Com isso, foi possível

englobar as principais variações climáticas e hidrológicas que ocorreram na área da Bacia do Rio Salgado, com especial atenção para os períodos cíclicos de secas e chuvas, compreendendo os períodos utilizados para calibração e validação do modelo, conforme a Tabela 9.

Tabela 9. Descrição dos postos da bacia hidrográfica do Rio Salgado utilizados neste estudo

Código	Nome	Tipo	Responsável	Latitude	Longitude
739046	Abaiara	Pluviométrica	ANA	-7,3667	-39,0500
638010	Aurora	Pluviométrica	ANA	-6,9500	-38,9667
638091	Baixio	Pluviométrica	ANA	-6,7333	-38,7167
739016	Barbalha	Pluviométrica	ANA	-7,3333	-39,3000
738060	Barro	Pluviométrica	ANA	-7,1667	-38,7667
738006	Brejo Santo	Pluviométrica	ANA	-7,4911	-38,9833
739011	Caririacu	Pluviométrica	ANA	-7,0333	-39,2833
639026	Cedro	Pluviométrica	ANA	-6,6000	-39,0667
639009	Granjeiro	Pluviométrica	ANA	-6,8833	-39,2167
638093	Icó	Pluviométrica	ANA	-6,4000	-38,8500
638013	Ipaumirim	Pluviométrica	ANA	-6,7833	-38,7167
739003	Jamacaru	Pluviométrica	Ana	-7,4000	-39,1333
739038	Jardim	Pluviométrica	Ana	-7,5833	-39,2833
739065	Juazeiro do Norte	Pluviométrica	Ana	-7,2167	-39,3167
638056	Lavras da Mangabeira	Pluviométrica	Ana	-6,7500	-38,9667
738001	Mauriti	Pluviométrica	Ana	-7,3833	-38,7667
738008	Milagres	Pluviométrica	Ana	-7,3000	-38,9333
739007	Missão velha	Pluviométrica	Ana	-7,2500	-39,1333
739060	Pena Forte	Pluviométrica	Ana	-7,8167	-39,0667
739010	Porteiras	Pluviométrica	Ana	-7,5333	-39,1167
639034	Várzea Alegre	Pluviométrica	Ana	-6,8000	-39,3000
638008	Umari	Pluviométrica	Ana	-6,6333	-38,7000
36290000	Icó	Fluviométrica	Ana	-6,4067	-38,8672
36250000	Podimirim	Fluviométrica	Ana	-7,3000	-38,9847
36210000	Sítio Lapinha	Fluviométrica	Ana	-7,2222	-39,1439
82784	Barbalha	Climatológica	INMET	-7,3100	-39,3000
82686	Iguatu	Climatológica	INMET	-6,3600	-39,2900

A distribuição dos dados pluviométrica foi realizada de forma automática pelo modelo SWAT, que utiliza o método do vizinho mais próximo (*Nearest Neighborhood*) para delinear as áreas de influência de cada pluviômetro. O modelo considera a série de precipitação por sub-bacia, dessa forma ele agrega os valores de determinada estação a

sub-bacia mais próxima, essa relação é estabelecida em relação a localização da estação pluviométrica e o centroide de cada sub-bacia (CASTRO, 2013).

1.4.1 Gerador Climático

A elaboração do gerador climático foi baseada, fundamentalmente, nos dados disponíveis das Estações Climatológicas de Barbalha (Código OMM: 82784) e Iguatu (Código OMM: 82686). Estes dados também compreendem o período estabelecido para a modelagem (1986 a 2017) e são disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os parâmetros que compõem o gerador climático podem ser divididos em cinco grupos: temperatura do ar, precipitação, radiação solar, umidade relativa do ar e vento. Os dados organizados correspondem à média mensal para cada parâmetro.

Os dados climáticos mensais foram calculados a partir dos dados diários, para isto, foram utilizados os softwares DEW e PCP-STAT, para obter dados mensais relacionados à temperatura máxima, mínima e precipitação, respectivamente. Obtendo através do DEW os valores mensais de Temperatura máxima média – TMPMX, Temperatura mínima média (TMPMN) e Temperatura diária média do ponto de condensação no mês (DEWPT) e por meio do PCP-STAT a Precipitação média mensal – PCPMM, Precipitação (desvio) mensal (PCPSTD), Coeficiente de inclinação (PCPSKW), Número de dias sem chuva (PR_W1), Probabilidade de um dia chuvoso após um dia chuvoso (PR_W2) e Número de dias de precipitação por mês (PCPD).

A velocidade média do vento no mês (WNDAV) foi calculada a partir dos dados diários da velocidade do vento de cada mês de todo o período, obtendo assim, uma média. A radiação solar diária média por mês (SOLARAV) foi obtida através da equação de BRISTOW, que através da estimativa da radiação solar e as temperaturas máximas e mínimas gera a radiação solar para os 365 dias do primeiro ano, repetindo esses valores para os outros anos restantes, obtendo assim, as médias mensais de todo o período estudado.

A precipitação máxima em meia hora em todo o período de registro do mês (RAINHMX) foi obtida através dos dados diários dos postos pluviométricos. E por fim, o desvio padrão da temperatura máxima (TMPSTDMX) e mínima (TMPSTDMN) foi obtido utilizando dados diários de temperatura máxima e mínima do período. Segundo Arnold et al. (2012), os valores diários para o clima são gerados de acordo com os valores das médias mensais.

1.4.2 Unidades de Resposta Hidrológica

O SWAT é um modelo que permite a divisão da área da bacia hidrográfica em sub-bacias que pode ser dividida em Unidades de Respostas Hidrológicas. Estas unidades são partes de uma sub-bacia com características homogêneas de uso e ocupação do solo, tipo de solo e declividade existente na bacia. Essas subdivisões permitem que o modelo calcule separadamente os fatores hidrológicos para cada HRU e depois somando para determinar o valor total para cada sub-bacia. Assim, aumentando a precisão da simulação hidrológica fornecendo uma melhor descrição física do balanço hídrico na bacia (ARNOLD et al, 2012).

Para delimitar as HRUs, o modelo necessita de mapas de solos e de uso e cobertura juntamente com o mapa de declividade, gerado com base no MDE. O SWAT gera de forma automática o mapa de declividade por meio de cálculos através da analises da taxa máxima de mudanças entre um pixel e seu vizinho. Deve então ser definido o número de classes de declividade e o valor de intervalos de cada classe. Para a Bacia do Rio Salgado foram adotadas cinco classes de declividade tendo como base estudo desenvolvido pela a EMBRAPA (1979), sendo essa classificação de declividade que variam entre: (a) plano: 0 a 3%, (b) suave ondulado: 3 a 8%, (c) ondulado: 8 a 20%, (d) montanhoso: 20 a 45%.

No processo de definição das HRU optou-se por utilizar o método múltiplas HRUs por sub-bacias, buscando um maior detalhamento e evitando as perdas ou alterações das informações de entrada. Ao trabalhar com esse tipo de método, o usuário pode definir limites para exclusão de classes de uso e ocupação do solo, tipo de solo e faixas de declividade. Essa exclusão dar-se em relação a porcentagem da classe ou em relação a sua área na sub-bacias. Esse procedimento permite definir o nível de detalhamento de representação das sub-bacias, por exemplo, excluir usos do solo cujo extensão seja menor que determinada porcentagem da sub-bacia (ARNOLD et al, 2012). Aplicou-se a esse trabalho um limiar de exclusão de 20% para uso do solo, 10% tipo de solo e 20% para declividade.

Após essa etapa de definição das HRUs, o modelo SWAT gera automaticamente um relatório com número de HRUs combinadas e a extensão das áreas referentes ao uso e ocupação do solo, tipo de solo e faixas de declividade. O modelo apresenta também os percentuais de cada HRU para cada sub-bacia.

1.4.3 Calibração e sensibilidade dos parâmetros

Para a otimização dos parâmetros do modelo SWAT, foi utilizado o programa SWAT-CUP, porque o modelo SWAT possui uma enorme quantidade de parâmetros que influenciam no modelo, o que torna o trabalho da modelagem bastante dificultoso. Assim, neste estudo optou-se pela automatização dos parâmetros do SWAT durante o processo de calibração, pois, as possibilidades de combinações entre os parâmetros são inúmeras e demandam muito tempo para que seja obtido um bom ajuste.

A calibração automática do modelo SWAT foi realizada a partir da utilização do programa também de domínio público, chamado SWAT-CUP (ABBASPOUR et al., 2007). Esse programa possibilitou testes de análise de sensibilidade, calibração e verificação dos parâmetros do modelo SWAT. Para tanto, neste estudo foi usado o algoritmo SUFI-2 (ABBASPOUR et al., 2004; ABBASPOUR, 2012).

Para Rocha (2013), a vantagem do SUFI-2 é a calibração multiparamétrica, sendo capaz de analisar simultaneamente um grande número de parâmetros que norteiam os processos de simulações do SWAT, com o objetivo de buscar o melhor resultado final através de inúmeras combinações dos parâmetros, variando-os dentro do intervalo permitido pelo SWAT.

No SUFI-2 levam-se em conta, para a análise de incerteza, todas as suas fontes, como a incerteza nas variáveis de entrada, o conceitual do modelo e as incertezas nos parâmetros e nos dados medidos. O grau para o qual todas as incertezas são contabilizadas é quantificado por uma medida referida como o fator-P, que é a percentagem dos dados medidos delimitados pela incerteza de predição de 95% (95PPU). Outra medida que busca quantificar a eficácia de uma análise de calibração e incerteza é o fator-R, que é a espessura média da banda 95PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos.

O SUFI-2 tenta lidar com uma banda menor possível de incerteza. O conceito subjacente à análise de incerteza do algoritmo SUFI-2 está representado graficamente na Figura 21. É possível observar que um valor de parâmetro único (mostrado por um ponto) leva a uma resposta de um modelo único (Figura 21a), enquanto a propagação da incerteza em um parâmetro (mostrado por uma linha) conduz aos 95PPU ilustrados pela região sombreada na Figura 21b. À medida que aumenta a incerteza dos parâmetros, a incerteza de saída também aumenta (não necessariamente de forma linear) (Figura 21c).

Desta forma, o algoritmo SUFI2 inicia o processo assumindo uma grande faixa de incerteza para os parâmetros (dentro de uma faixa fisicamente significativa), de modo que os dados medidos inicialmente se enquadram no 95PPU. Após isso, essa incerteza é reduzida baseada no monitoramento de dois fatores (P e R). A cada interação, as faixas de parâmetros anteriores são atualizadas pelo cálculo da matriz de sensibilidade, seguido do cálculo da matriz de covariância de 95% de confiança dos intervalos dos parâmetros, e da matriz de correlação. Em seguida, os parâmetros são atualizados, e assim, novas faixas de valores são criadas, sempre menores do que as faixas anteriores, mas próximas a melhor simulação.

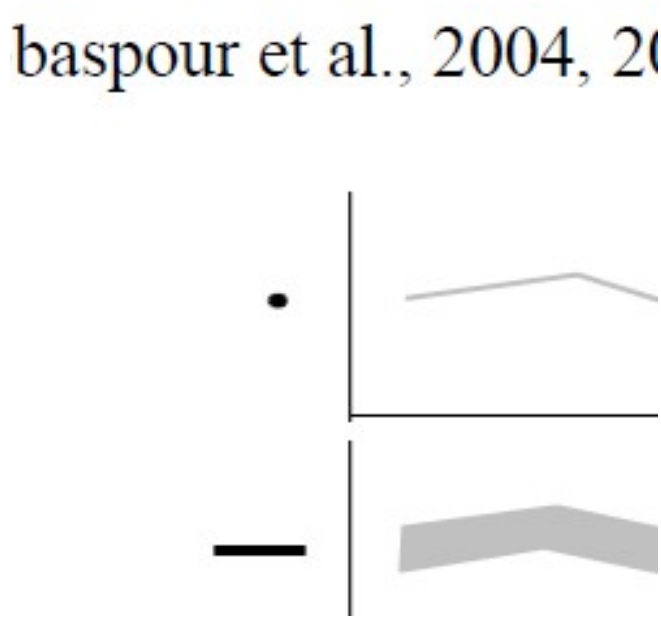


Figura 21 – Ilustração conceitual da relação entre as incertezas dos parâmetros e a incerteza na simulação.
Fonte: Abbaspour et al. (2007).

A confiabilidade dos ajustes e dos graus de eficiência do modelo calibrado para as incertezas são avaliadas pelo fator-P e fator-R. Os valores do fator-P variam entre 0 e 100%, enquanto o fator-R varia entre 0 e infinito. O fator-P de 1 e o fator-R de 0 indicam uma simulação que corresponde exatamente aos dados medidos, ou seja, um ajuste perfeito entre os dados observados e os estimados.

Assim, a distância desses números pode ser utilizada para avaliar a eficácia da calibração. Por isso, muitas vezes um equilíbrio entre os dois valores deve ser atingido. Quando os valores aceitáveis de fator-R e fator-P são alcançados, as incertezas dos

parâmetros são os intervalos gerados. Para a calibração do modelo foram utilizados 19 parâmetros, visto que esses parâmetros influenciam diretamente no escoamento para as condições das bacias existentes na região Nordeste do Brasil, como mostrado nos estudos de Aragão et al. (2013) e Dantas et al. (2015). Na calibração automática, os valores dos parâmetros são modificados a cada iteração, buscando o melhor ajuste entre os escoamentos observados e estimados.

Para a calibração dos parâmetros do SWAT neste estudo foram realizadas 500 iterações, sendo que a cada iteração, os valores de cada parâmetro são modificados simultaneamente, o que agiliza o processo de calibração. Ao final da calibração, o SWAT-CUP calcula índices estatísticos que analisam o desempenho dos resultados obtidos, mostrando: (a) os valores de cada parâmetro, (b) os valores calculados para os índices de desempenho do modelo, (c) os valores simulados para a variável indicada (nesse caso a vazão) e (d) a iteração que apresentou o melhor ajuste.

A sensibilidade dos parâmetros é computada por meio do cálculo de um sistema de regressão múltipla, que regressa os parâmetros gerados pelo hipercubo latino versus os valores da função objetivo selecionada pelo usuário. Então, o t-test é então usado para identificar a significância relativa de cada parâmetro, e a sensibilidade é estimada pelas mudanças médias na função objetivo, resultante das alterações em cada parâmetro, enquanto todos os outros parâmetros também são alterados.

Essa sensibilidade relativa determinada é baseada numa aproximação linear e, consequentemente, fornece somente informações parciais sobre a sensibilidade dos parâmetros do modelo na função objetivo (ABBASPOUR et al., 2004).

O SWAT-CUP apresenta dois resultados em relação à análise de sensibilidade global: (1) o t-stat, que fornece a medida da sensibilidade, considerando que quanto maior for o seu valor, mais sensível será o parâmetro; e (2) o p-value, que determina a significância da sensibilidade, sendo que um valor próximo à zero indica maior significância. Os parâmetros utilizados, bem como as faixas de valores, foram definidos a partir das recomendações de Arnold et al. (2012), Fukunaga (2012), e Ferrigo (2014). Os métodos de alteração dos parâmetros são três:

a) substituição (=): substitui o valor existente por outro;
b) adição (+): um novo valor é adicionado ao valor inicial do parâmetro;
c) multiplicação (×): aumentar ou diminuir o valor inicial através de porcentagem.

A Tabela 10 apresenta a descrição dos parâmetros utilizados na fase de análise de sensibilidade, assim como a sua faixa de variação e relação matemática adotada. As calibrações foram realizadas para os três postos de vazão, Icó, Lapinha e Podimirim.

Tabela 10. Descrição dos parâmetros físicos do solo, limites e método de alteração no processo de análise de sensibilidade utilizados neste estudo

Parâmetros	**Descrição**	**Intervalos mínimos e máximos**	**Métodos**
Alpha_Bf	Fator de recessão de escoamento de base (dias)	0 – 1	=
Biomix	Eficiência da mistura biológica do solo (adimensional)	0 – 1	=
Canmx	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm)	0 – 10	=
Cn2	Valor da curva número para a condição de solo úmido (adimensional)	-0 – 2	×
Ch_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h)	0 – 5	=
Ch_N2	Coeficiente de Manning do canal (adimensional)	0 – 0,3	=
Epco	Coeficiente de compensação da absorção de água pelas plantas (adimensional)	0 – 1	=
Esco	Coeficiente de compensação da evaporação de água no solo (adimensional)	0,5 – 1	=
Gw_delay	Tempo de recarga do aquífero (dias)	-30 - 60	+
Gw_revap	Coeficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada (adimensional)	0,02 – 0,2	=
Gw_qmn	Profundidade da água subterrânea necessária para ocorrer fluxo de retorno (mm)	0 – 1000	=
Rchrg_Dp	Fração de água percolada para o aquífero profundo (fração)	-0,04 – 0,05	×
Revapmn	Limite de água no solo para que ocorra ascensão capilar na zona saturada (mm)	0 – 10	=
Slsubbsn	Comprimento da declividade média (m)	-0,25 – 0,25	×
Sol_Alb	Albedo do solo (adimensional)	-0,25 – 0,25	×
Sol_Awc	Capacidade de armazenamento de água no solo (mm/mm)	-0,25 – 0,25	×
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h)	-0,25 –0,25	×
Alpha_BF	Constante de recessão do fluxo de base (dias). Indicador direto da resposta do fluxo subterrâneo para as mudanças na recarga. Seus valores variar de 0 a 1 e quanto maior o valor desse parâmetro maior será a recarga do aquífero e menor o fluxo de base	0 – 1	=

1.4.4 Índices de Desempenho Para Validação do Modelo SWAT

Para a análise de eficiência do modelo, isto é, para verificar o quanto o modelo foi capaz de simular a realidade foram utilizados o Nash e o R^2, os quais estão descritos nas Equações 34 e 35. O R^2 e a Nash são estatísticas que foram usadas em muitos estudos para avaliar o desempenho preditivo do SWAT (WU e XU, 2006; SINTONDJI, 2005 CHEKOL, 2006; ABRAHAM, 2007).

$$Nash = \left[1 - \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}\right] \quad (34)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}[(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})]^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{i=1}^{n}(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}\right] \quad (35)$$

sendo Q_{obs}: vazão observada; Q_{sim}: vazão simulada pelo modelo; $\overline{Q_{obs}}$ média da vazão observada; $\overline{Q_{sim}}$ média da vazão simulada; n: quantidade de dados na série de vazões observadas.

O Nash é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual quando comparado com a variação dos dados de medição. O índice varia entre -∞ a 1, sendo que valores menores do que zero indicam que a média dos dados observados prevê melhor do que a simulação pelo modelo, enquanto valores próximos a um indicam um ajuste ótimo. Andrade et al. (2013) e Melo Neto et al. (2014) comentam que o coeficiente de Nash representa, principalmente, a resposta do modelo as vazões de pico.

Com relação ao R^2, este coeficiente demonstra o grau de colinearidade entre os valores observados e simulados, descrevendo a proporção da variância entre esses valores. O R^2 varia entre 0 e 1, em que valores mais próximos a 1 indicam menor variância do erro (FERRIGO, 2014). O R^2 é sensível a valores extremos e pouco sensível as diferenças proporcionais entre séries observadas e simuladas (LEGATES e McCABE, 1999). Para avaliar o desempenho do modelo SWAT, utilizou-se a classificação utilizada por Moriasi et al. (2007), que assumem faixas de valores de insatisfatórios a muito boa para os valores de R^2 e Nash, conforme a Tabela 11.

Tabela 11. Classificação da eficiência da modelagem do modelo SWAT por meio da análise do R^2 e Nash

Classificação	R^2	Nash
Muito boa	$0,80 < R^2 \leq 1,00$	$0,75 < Nash \leq 1,00$
Boa	$0,70 < R^2 \leq 0,80$	$0,65 < Nash \leq 0,75$
Satisfatória	$0,60 < R^2 \leq 0,70$	$0,50 < Nash \leq 0,65$
Insatisfatória	$R^2 \leq 0,60$	$Nash \leq 0,50$

CAPÍTULO IV
APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se aqui os dados levantados na forma de mapas interpretativos em duas escalas de trabalho. A primeira é a escala da regional, compreendendo o semiárido como um todo e tendo o polígono das secas como recorte espacial. Embora restrito a esta conformação espacial, em determinados momentos a análise extrapola os limites do denominado polígono das secas.

Os dados foram coletados na escala de todo o semiárido, muitas vezes compactados e ou extrapolados para poder cobrir toda a área. Outro aspecto a ser tomado em consideração é que nesta escala de análise, de certa forma é abandonada em prol de escalas maiores e com maior detalhe, o que segundo a "moda" da Geografia atual dá aos estudos certo ar de "maior cientificidade" e aos textos dele derivados.

1. ANÁLISE DA SEMIARIDEZ CLIMÁTICA DO SEMIÁRIDO DO NORDESTE

Por outro lado, a presença dos quatro mapas em pequena escala nos apresenta o problema de forma Regional, tal como ele efetivamente é, sem, porém, deixar de lado o conjunto dos inúmeros dramas em escala local, exatamente onde a semiaridez releva o seu caráter mais agressivo com as populações locais, que resistem à semiaridez natural e à falta de uma gestão hídrica que possibilite a convivência mais adaptada com a escassez hídrica. Os mapas refletem o que a proposta de análise geográfica em escala regional, considera fundamental para o entendimento das questões hídricas no semiárido nordestino, ou seja, as condições hidrogeológicas, embasados em seus substratos geológicos, as precipitações, e as vazões dos poços.

Importante ressaltar que os mapas apresentados são a expressão cartográfica de bases de dados em Sistema de Informações Geográficas, portanto são produtos que permitem inúmeros cruzamentos e sobreposições de níveis de informações ainda por serem executados. Como, por exemplo, na Figura 22, que apresenta a espacialização da precipitação no Semiárido Nordestino. Percebe-se nessa ilustração que há várias porções da região semiárida com totais pluviométricos próximos e acima da 900 mm, o que demonstra uma grande heterogeneidade das chuvas na região. Porém neles já é possível antever os contornos do que aqui será denominado de ilhas "hidro-pedo-geológicas". A

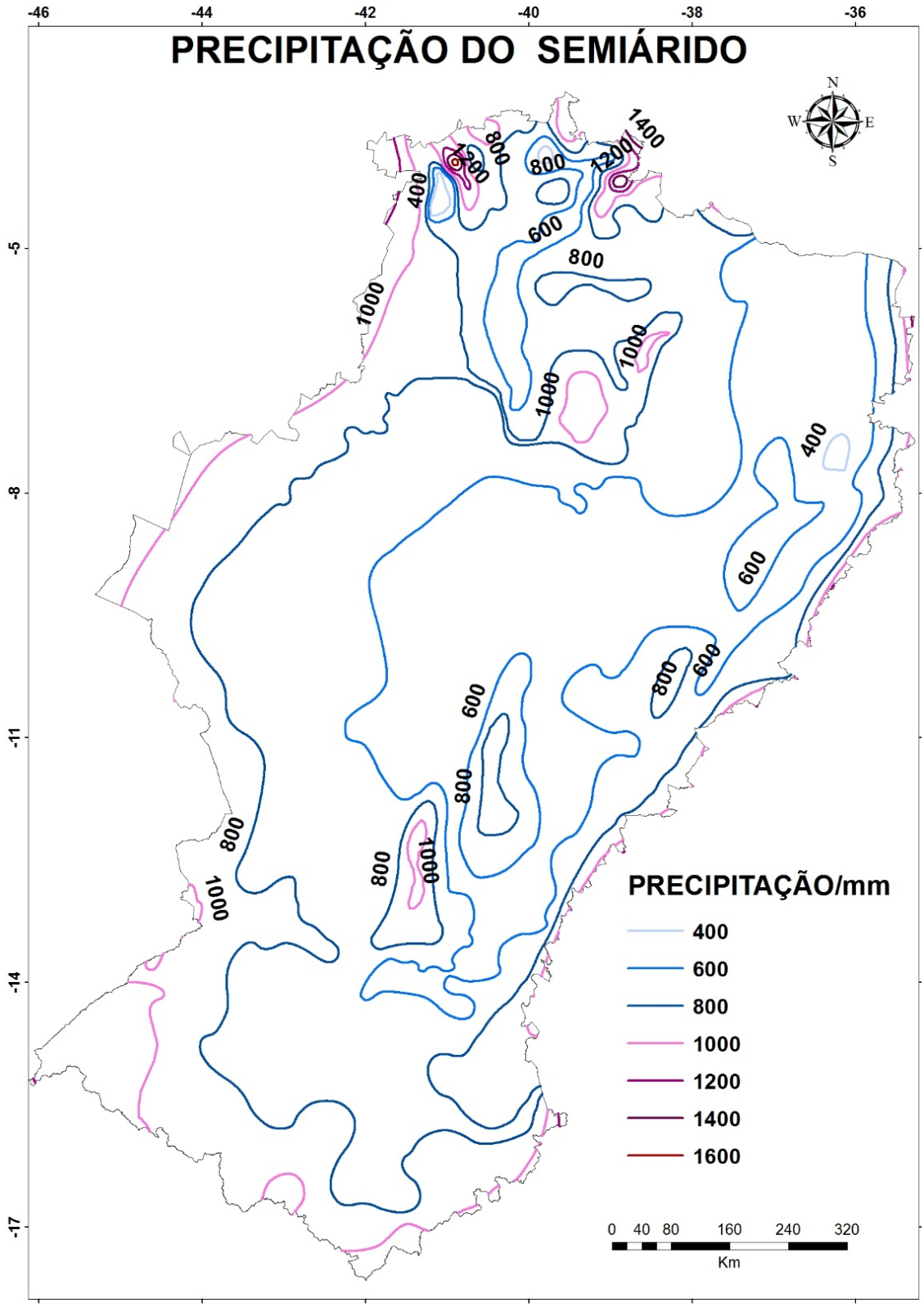


Figura 22 – Distribuição espacial da precipitação no Semiárido Nordestino.
Fonte: CPRM (2016).

Outro ponto a ser observado é que as serras, portanto o relevo, realmente tem uma importância local em diversas situações, como no caso das vertentes das chapadas do Araripe no Ceará e da Diamantina na Bahia. Tomando estes casos como exemplos é evidente que as vertentes úmidas, de fachada leste ou nordeste concentram uma precipitação que contribui na escala local com reservas hídricas de relevância para seu entorno, e que são de grande utilização para o abastecimento de cidades de porte médio, como é o caso do complexo urbano que envolve o Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha no Ceará.

Considerando que o limite do polígono das secas deveria expressar as zonas de baixa pluviometria, é inesperado que regiões com precipitações superiores a 1400 e 1600 mm/ano estejam de em seu território, esta é por exemplo a situação do extremo norte do semiárido, que corresponde as Serras do Ibiapaba, na fronteira do Piauí com o Ceará. Oura situação semelhante é o da Serra da Baturité, também no Ceará, com índices de precipitações da ordem de 1200 mm/ano.

A

Tabela 1212 expressa numericamente a ocorrência de áreas com predominância de classes de vazões e a quantidade e poços existentes em cada uma destas classes, além de apresentar uma classificação qualitativa, baseada nas vazões reais medidas. Quanto à expressão espacial das zonas de vazões, as mais baixas correspondem a 47,2% da área o que demostra uma "afinidade" numérica com os 51,8% de zonas hidrogeológicas classificadas com aquífugos e aquitardos. De alguma forma também as vazões medianas e boas expressam o potencial de armazenamento já demonstrado no mapa da Hidrogeologia, havendo, portanto, uma correspondência espacial entre os potenciais de armazenamento. Porém ao compararmos os dados do número de poços existentes e suas vazões de teste, temos que 77,3% deles estão abaixo de 3 m³/h.

Tabela 12. Vazão média dos poços da região semiárida do Nordeste do Brasil

Vazões	**Área em km²**	**% de áreas**	**Número poços**	**%**	**Classificação**
< 3 m³/h	410.854	47,2	66.383	77,3	Baixa
3 a 10 m³/h	246.334	28,3	11.676	13,6	Mediana
10 a 40 m³/h	188.836	21,7	6.620	7,7	Boa
40 a 100 m³/h	23.437	2,7	828	1,0	Muito boa
> 100 m³/h	1.320	0,2	424	0,5	Excepcional

A análise do mapa mostra que nas zonas de domínio destas vazões realmente estão a maioria dos poços. Uma primeira e não definitiva explicação para estes números é de que em zonas de maior carência e de ocorrência de estiagens prolongadas, os usuários e ou proprietários de terras tendem a multiplicar suas tentativas de perfurações, quando os poços são improdutivos. Esta interpretação longe de ser uma hipótese é uma suposição que precisa ser verificada em campo, mas que a experiência do autor e do seu grupo de pesquisa corrobora.

A Figura 23 mostra a espacialização geográfica dos poços de vazão excepcionais, ou seja, aqueles com produção superior a 100 m³/h. A simples observação dessa, por si só é um dado relevante à consideração do potencial aquífero em determinadas zonas do semiárido, apontando para a existência/comprovação da ideia das "ilhas hidro-pedo-geológicas", na região semiárida do Brasil.

A Figura 24 mostra a distribuição das vazões dos poços e precipitações no Semiárido. Pode-se notar que não existe uma relação direta em termos espaciais entre maiores volumes de água precipitados e maiores vazões de poços. Isso indica claramente que o fator hidrogeológico não possui uma dependência direta previamente estabelecida com o regime de chuvas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Pode-se compreender da Figura 24, que mesmo que ocorra muita chuva, se não houver aquíferos para armazena-las, não é possível depois recupera-las nos períodos de estiagem. Por outro lado, as vazões dos poços de alta vazão estão quase todos associados a formações sedimentares com uma expressiva extensão espacial e espessura de camada. De certa forma isso pode ser entendido como uma primazia da condição hidrogeológica sobre a climática.

A análise do mapa mostra que nas zonas de domínio destas vazões realmente estão a maioria dos poços. Uma primeira e não definitiva explicação para estes números é de que em zonas de maior carência e de ocorrência de estiagens prolongadas, os usuários e/ou proprietários de terras tendem a multiplicar suas tentativas de perfurações, quando os poços são improdutivos.

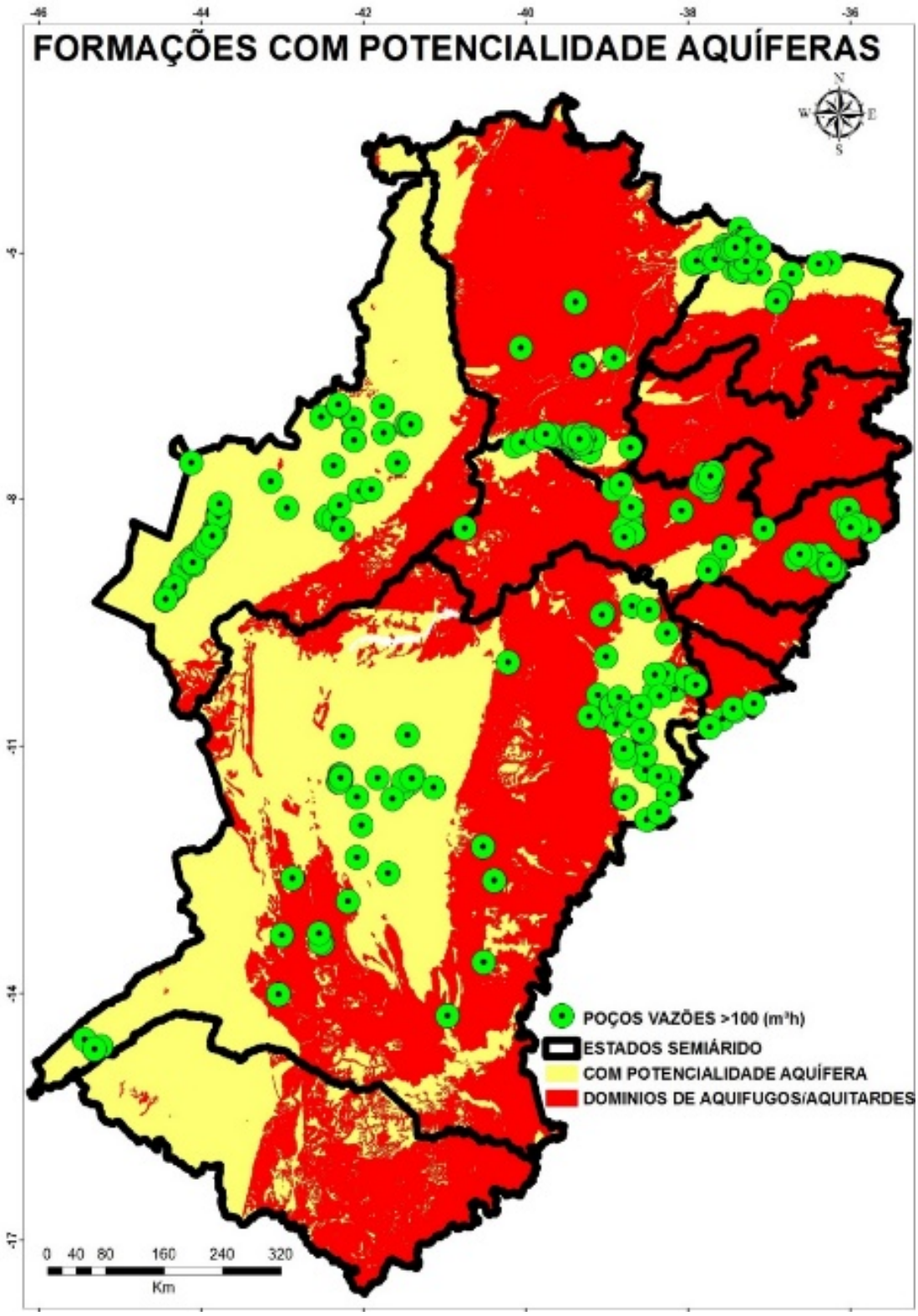


Figura 23 – Mapa das formações com potencialidades aquíferas e localização geográfica dos poços com vazões acima de 100 m³/h no Semiárido.
Fonte: CPRM (2016).

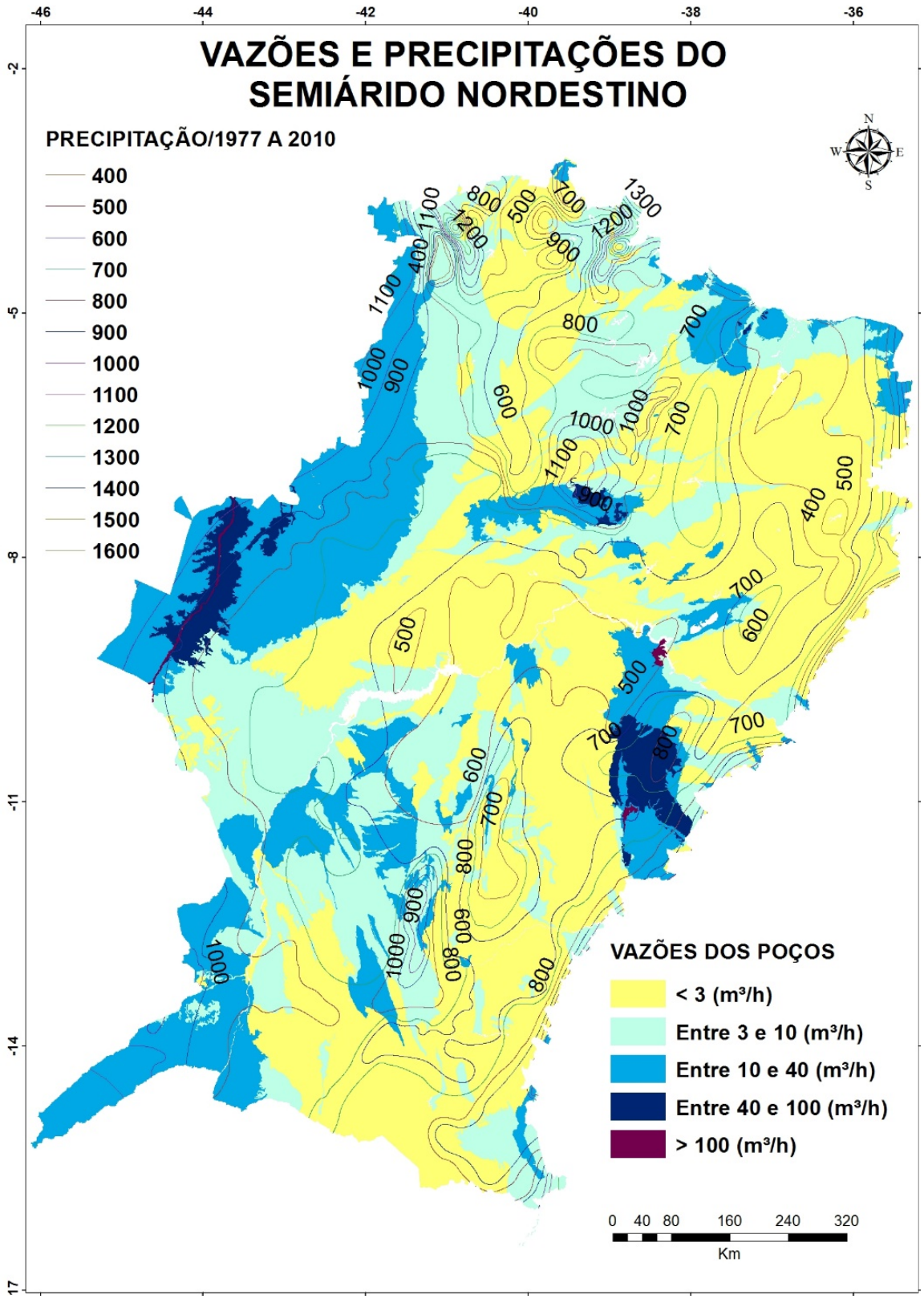


Figura 24 – Vazões dos poços e precipitações no Semiárido.
Fonte: CPRM (2016).

O mapa da distribuição das precipitações demonstra que muitas áreas dessa bacia apresentam índices de precipitações maiores do que 800 mm/ano. Outro ponto a ser

observado é que as serras, portanto o relevo, realmente tem uma importância local em diversas situações, como no caso das vertentes das chapadas do Araripe no Ceará e da Diamantina na Bahia. Tomando estes casos como exemplos é evidente que as vertentes úmidas, de fachada leste ou nordeste concentram uma precipitação que contribui na escala local com reservas hídricas de relevância para seu entorno, e que são de grande utilização para o abastecimento de cidades de porte médio, como é o caso do complexo urbano que envolve o Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha no Ceará.

É possível observar também que a falta de uma política de uso correto das águas subterrâneas na região é produto do desconhecimento em escala regional das potencialidades aquíferas nela presente e demonstradas nesta tese. Por outro lado, fica também evidente as zonas onde o domínio das rochas cristalinas e com pouca capacidade natural de armazenamento e transmissão de águas, revela os problemas causados pelas suas características pedo-geológicas.

2. ANÁLISE *IN LOCO* DAS ILHAS HIDRO-PEDO-GEOLÓGICAS

A análise *in situ* para o reconhecimento e identificação de ilhas hidro-pedo-geológicas localizadas na região Semiárida do Nordeste consistiu em trabalhos de campo em bacias hidrográficas nos estados da Paraíba, Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte, entre os dias 3 e 11 de dezembro de 2016.

2.1 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da bacia do Alto Rio Paraíba

O trabalho de reconhecimento na da bacia do Alto Rio Paraíba teve início no dia 3 de dezembro de 2016. No estado da Paraíba, pode-se observar que os maiores reservatórios de água estão no semiárido. O açude Epitácio Pessoa mais conhecido como açude de Boqueirão está localizado na mesorregião da Borborema, especificamente na microrregião do Cariri Oriental paraibano. O mesmo faz parte da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, formada pelo Alto Paraíba e sub-bacia do Rio Taperoá. O barramento do açude está localizado no exutório do Alto Paraíba e início do curso Médio. Essa região apresenta o menor índice pluviométrico do Brasil, com evaporação anual entre 2.500 a 3.000 mm, apresentando valores decrescentes de oeste para leste, ou seja, chove mais na porção oeste, caracterizada pelas maiores altitudes.

O regime pluviométrico apresenta precipitações médias anuais que variam entre 250 a 750 mm, sendo que os totais anuais se concentram em um período de quatro meses, que, geralmente, corresponde aos meses de fevereiro, março, abril e maio (DE MEDEIROS et al., 2019). Os solos encontrados na área são na maioria das vezes, pouco profundos, rasos e organizados em dois ambientes edafológicos: o primeiro se refere a uma superfície semi-evoluída, formada pelos solos bruno não-cálcico e, o segundo, por uma superfície não evoluída, formada pelos litossolos e afloramento de rocha (GALVÍNCIO et al., 2006).

O subsolo dessa área é formado em sua maior parte por rochas pré-cambrianas, as quais cobrem cerca de 75% da área do estado da Paraíba. Nesse contexto, a área em torno do açude Epitácio Pessoa está inserida na área cristalina. A mesma pertence à Província Borborema, onde predominam as rochas do Pré-cambriano Indiviso como as do Complexo gnaissico-migmatitico, incluindo calcário cristalino e as rochas granitoides (granitos, granodioritos, tonalitos e monzonitos). Na Pedra do Tendó, localizada próxima a depressão sertaneja, os solos são rasos com baixa fertilidade. Pode-se observa ainda na depressão sertaneja paraibana os seus *inselbergs*.

2.2 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da bacia do Rio do Peixe

A bacia hidrográfica do Rio do Peixe (BHRP) é uma sub-bacia do Rio Piranhas-Açu e está localizada no noroeste do semiárido Paraibano, mais precisamente entre as latitudes 6°20′47″ S e 7°00′00″ S e longitudes 37°58′00″ W e 38°46′48″ W (Figura 25).

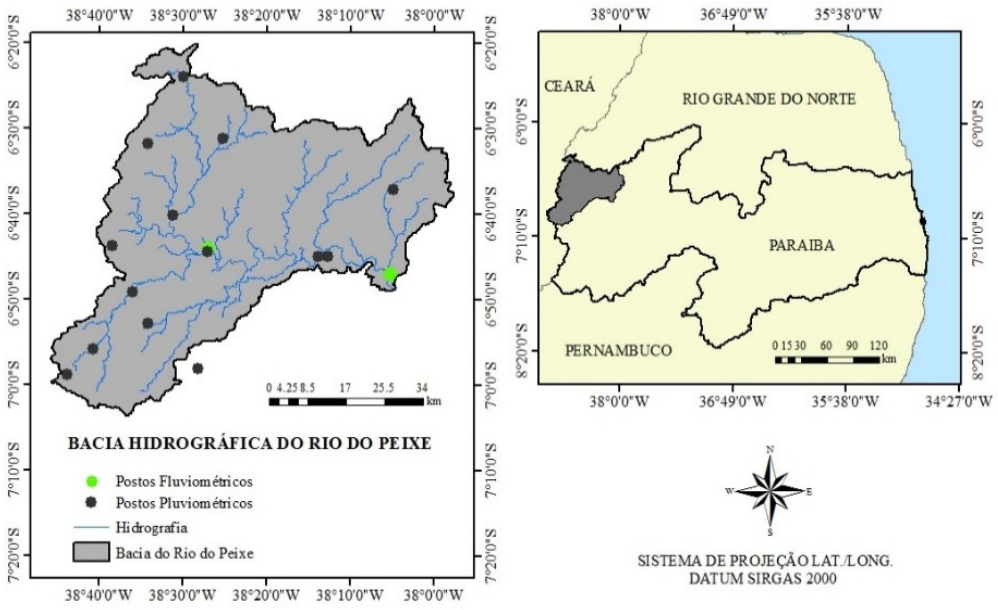


Figura 25 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio do Peixe no estado da Paraíba.

No dia 06 de dezembro de 2016 foi analisada a morfologia da região compreendida pela microrregião de Sousa que constitui, mais precisamente, uma parte da sub-bacia da bacia sedimentar do Rio do Peixe. Essa bacia é considerada uma das maiores bacias cretáceas intracratônicas encravadas no cristalino do Nordeste semiárido, que abrange os municípios de Sousa e São João do Rio do Peixe Poço de José de Moura, Uiraúna, Santa Helena e Aparecida, na Paraíba, ocupando uma área de aproximadamente 650 km².

A Figura 26 apresenta a distribuição espacial da precipitação na bacia do Rio do Peixe. A bacia do Rio do Peixe tem uma importância estratégica para o abastecimento alimentar e oferta de serviços, não apenas para os 22 municípios que a compõem, mas também para os estados vizinhos do Ceará e Rio Grande do Norte (Nascimento et al., 2018).

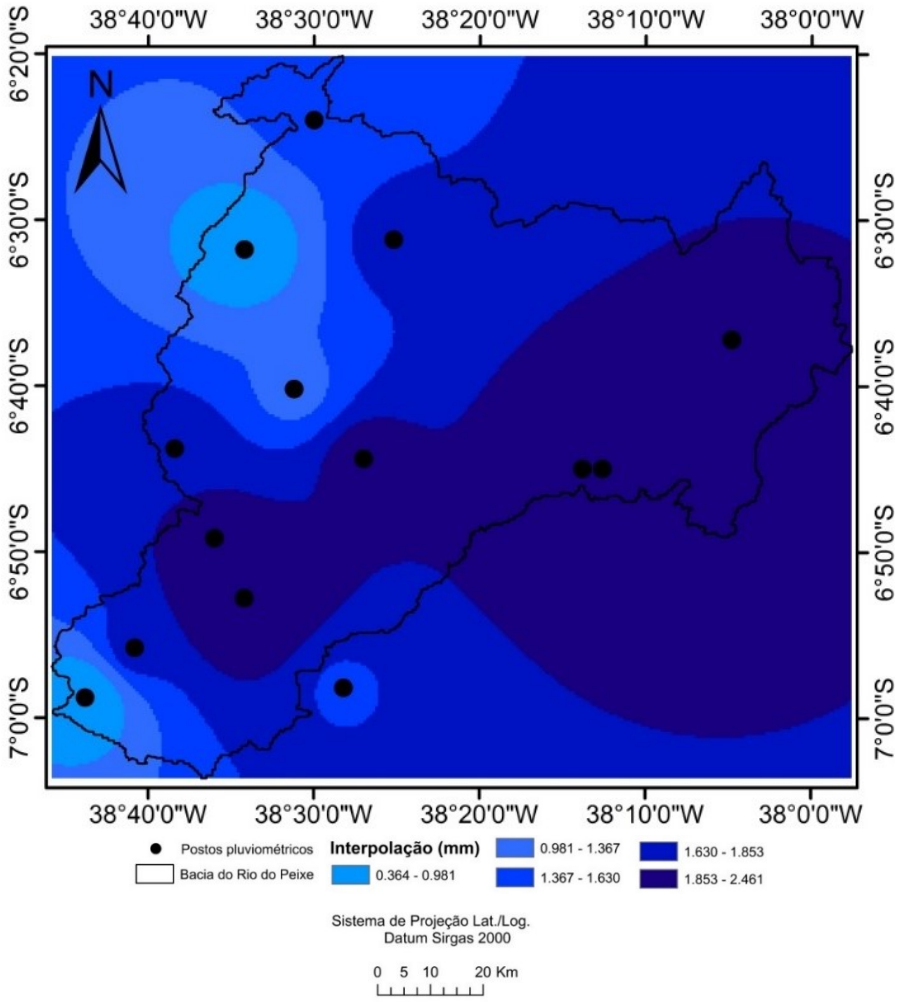


Figura 26 – Precipitação média anual na bacia hidrográfica do Rio do Peixe.

Segundo o Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2005) essa é uma bacia com baixo nível de conhecimento da potencialidade hídrica subterrânea, alto consumo de água subterrânea, baixa disponibilidade de recursos hídricos superficiais e possui um alto índice de captação sem mecanismos de gestão. Brandão (2005) afirma que a bacia representa uma das áreas mais promissoras para a expansão agropecuária do Estado da Paraíba.

No que tange os aspectos geológicos da BHRP (Figura 27), segundo Lima Filho (1991), os trabalhos iniciais sobre a bacia sedimentar do Rio do Peixe foram realizados por Crandall (1910). A Bacia Sedimentar do Rio do Peixe é descontínua e composta por três blocos ou sub-bacias: (a) Pombal, (b) Sousa e (c) Brejo das Freiras. A bacia sedimentar do Rio do Peixe é constituída por dois meio-grabens assimétricos, ambos mergulhando para sul, separados por um alto interno de direção NE-SW, denominado de Alto de Santa Helena (BRANDÃO, 2006). A Figura 28 apresenta a distribuição das declividades na BHRP.

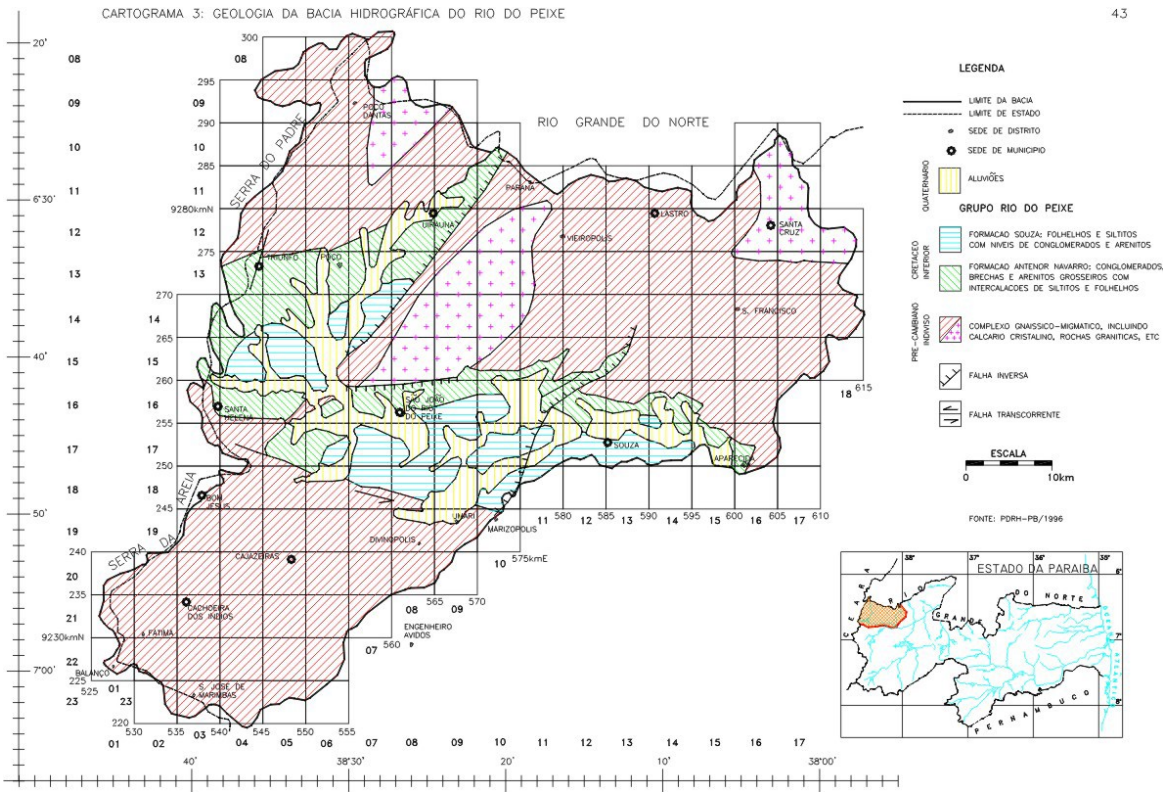


Figura 27 – Mapa geológico bacia hidrográfica do Rio do Peixe.
Fonte: Brandão (2005).

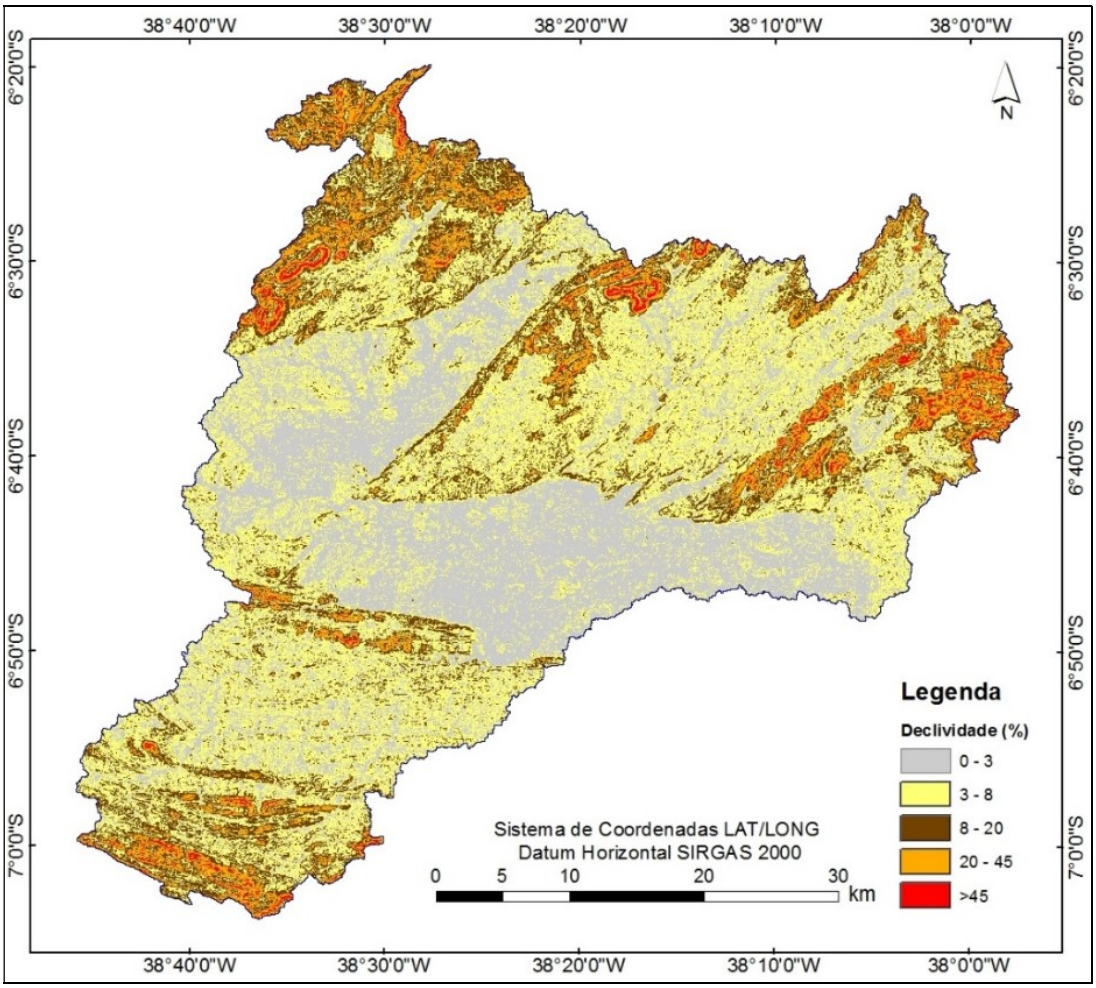


Figura 28 – Localização geográfica dos postos fluviométricos Antenor Navarro e Aparecida e as declividades da bacia hidrográfica do Rio do Peixe.

A formação Sousa caracteriza-se pela predominância de siltitos e folhelhos vermelhos amarronzados, intercalados com arenitos finos (calcíferos) a médios, além de margas e calcários. Coexistem duas unidades, a superior e a inferior. Na unidade superior predomina uma sequência arenosa com pelitos subordinados, enquanto que na inferior verifica-se uma notável inversão, com domínio de siltitos e folhelhos. A unidade superior possui maior área de expressão nas bacias de Brejo das Freiras e Pombal enquanto que a inferior predomina na porção central da sub-bacia Sousa (BRANDÃO, 2005).

Foi observado que no município de Poço de José de Moura existe um poço de água subterrânea jorrante (Figura 29), e que neste município muitas comunidades rurais são abastecidas por poços, inclusive a área urbana.

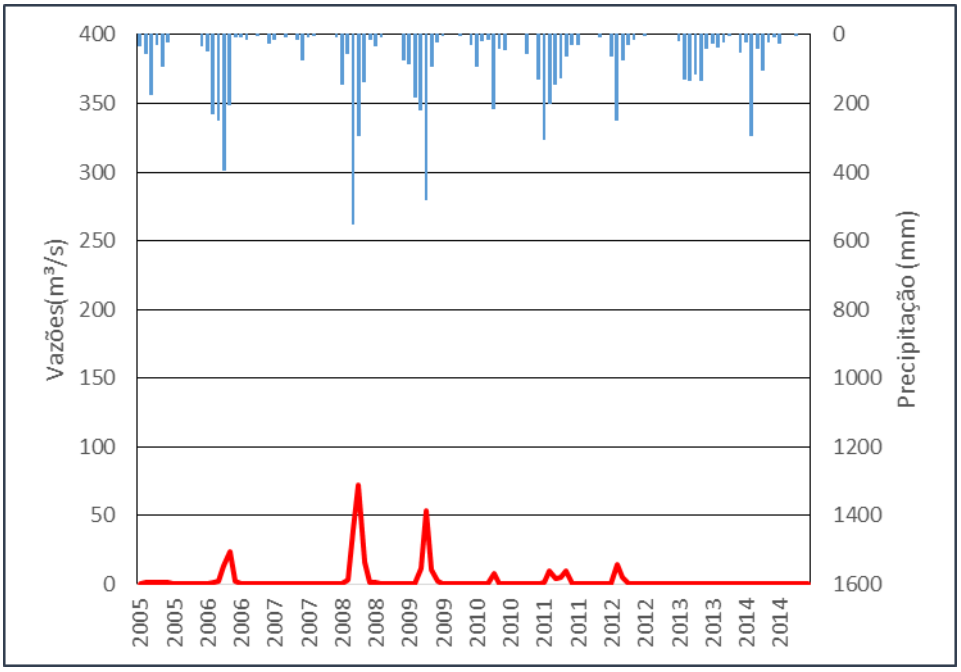
Figura 29 – Poço jorrante localizado na bacia sedimentar do Peixe.

2.2.1 Comportamento da vazão na Bacia do Rio do Peixe

Na BHRP existem dois postos fluviométricos, o de Antenor Navarro, localizado no cristalino e o de Aparecida, inserido na Bacia Sedimentar do Peixe (Figura 30). Na BHRP, frequentemente no posto fluviométrico de Antenor Navarro registram-se as vazões mínimas iguais a 0,0 m³/s e picos entre 50 e 60 m³/s, devido ao fato da irregularidade da distribuição anual das chuvas na bacia, que concentra a maior parte da precipitação entre os meses de janeiro e Abril (64% do total anual).

Isso implica dizer que a ocorrência da vazão na bacia segue o mesmo comportamento da precipitação, sendo a vazão registrada apenas nos meses em que chove. Enquanto no posto de Aparecida, os valores dos picos de vazões variaram entre 90 e 214 m³/s, e as vazões mínimas.

(a)



(b)

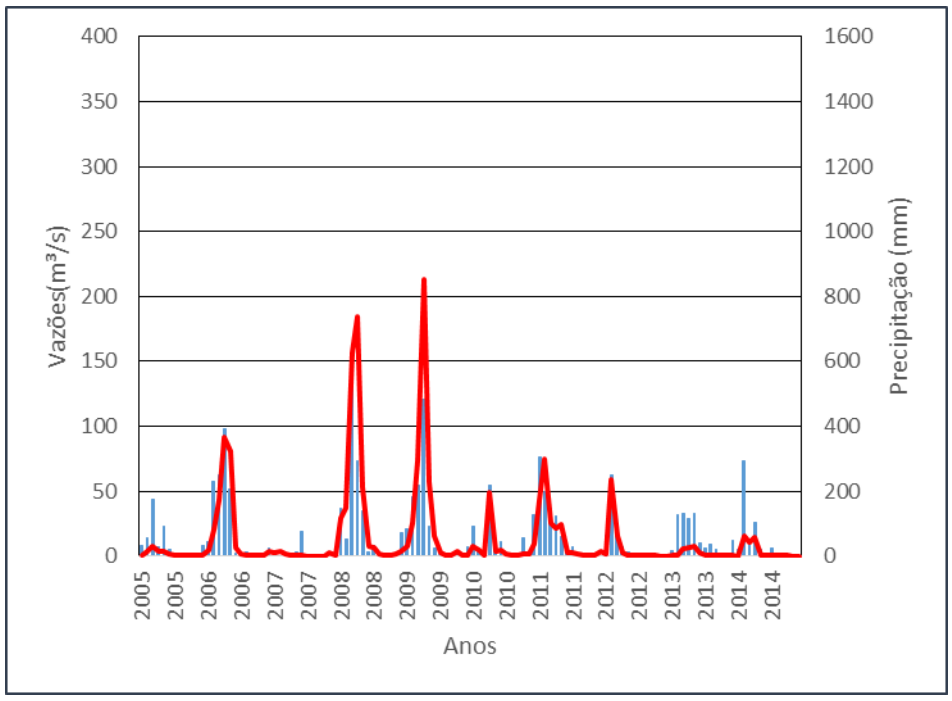


Figura 30 – Hidrograma e hietograma observados entre 2005–2014 para os postos: (a) Antenor Navarro e (b) Aparecida.

Como ocorre com as outras porções da bacia (sub-bacias de Brejo das Freiras e Pombal), “assemelha-se a um polígono irregular alongando-se elipticamente na direção E/W” (TINOCO e MABESOONE, 1975). A bacia sedimentar do Rio do Peixe é descontínua e composta por três blocos ou sub-bacias: Pombal, Sousa e Brejo das Freiras, sendo as duas últimas separadas por um intenso falhamento SW-NE, no qual se relaciona a

fonte termal de Brejo das Freiras. Essas secções apresentam uma forma poligonal e irregular e se encontram encravadas por tectonismo, no cristalino circundante (Figura 31).

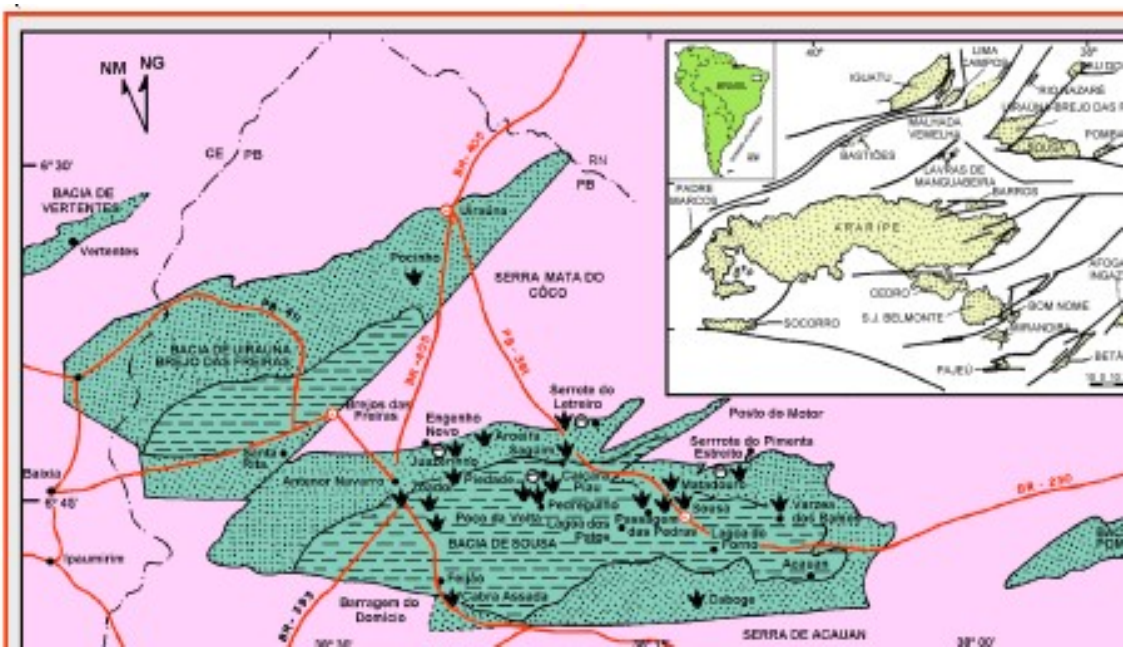


Figura 31 – Mapa geológico da bacia hidrográfica do Rio do Peixe.
Fonte: CPRM (2015).

2.3 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da bacia sedimentar do Araripe

A análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da bacia sedimentar do Araripe ocorreu no dia 7 de dezembro de 2016. A localização geográfica dessa bacia pode ser conferida na Figura 32. Essa bacia localiza-se ao sul do estado do Ceará e parte dos estados de Pernambuco e Piauí, constituindo-se no divisor de águas das bacias hidrográficas dos rios Jaguaribe (CE) ao norte, São Francisco (PE) ao sul e Parnaíba (PI) a oeste. A Bacia Sedimentar do Araripe é considerada como uma das mais extensas do interior do Nordeste do Brasil, compreendendo uma área de aproximadamente 9.000 km².

Essa bacia apresenta uma diversificação litológica caracterizada por sequências alternadas de arenitos, siltitos, calcários, argilitos e folhelhos, podendo alcançar uma espessura total da ordem de 1.600 m. Essa diversificação litoestatrigráfica acarreta a formação de uma alternância de aquíferos, aquitardos e aquicludes, que apresentam características variáveis também com relação à localização, isto é, variam espacialmente, mostrando descontinuidades verticais e laterais (VERÍSSIMO et al., 2007).

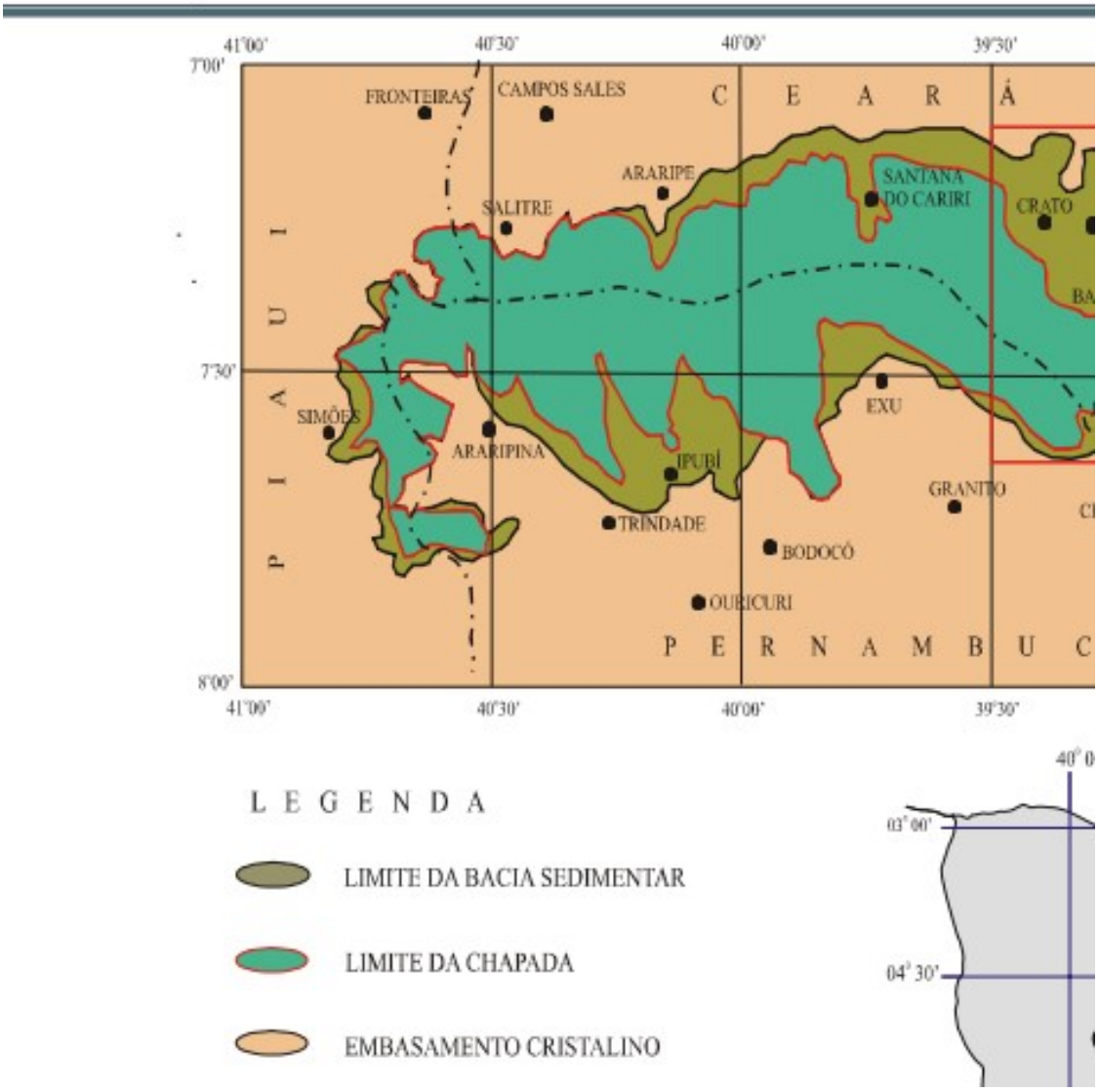


Figura 32 – Localização da bacia sedimentar do Araripe.

Fonte: Brito Neves et al. (2005).

No que tange as características hidrogelógicas, essa bacia é uma das mais importantes para o estado do Ceará, uma vez que possui os melhores e maiores aquíferos da região, as formações Rio da Batateira, Mauriti e Missão Velha. As formações Abaiara, Brejo Santo, Santana, Arajara e Exu apresentam pequena capacidade hidrogeológica (DNPM, 1996).

Em visitas de campo foi observado que na Região do Cariri Cearense existem plantações de cana de açúcar, e que muitas comunidades rurais são abastecidas por poço. Observou-se que na divisa entre os Estados do CE e PE a paisagem muda completamente.

Essa mudança é notada pela a vegetação onde no CE a vegetação e arbórea e no PE a vegetação e rala. Outro fator que chamou a atenção foi o solo da chapada do Araripe no PE, esse bastante arenoso. Nessa região foi encontrado plantações de café e geração de energia eólica. (Figuras 33a e 33b). As Figuras 34 e 35 mostram a formação litológica da bacia sedimentar do Araripe e a sobreposição entre a distribuição espacial da precipitação e as vazões dos poços na bacia sedimentar do Araripe.

(a)

(b)

Figura 33 – (a) Imagem de plantação de café e (b) instalação de torres de energia eólica na região da bacia do Araripe.

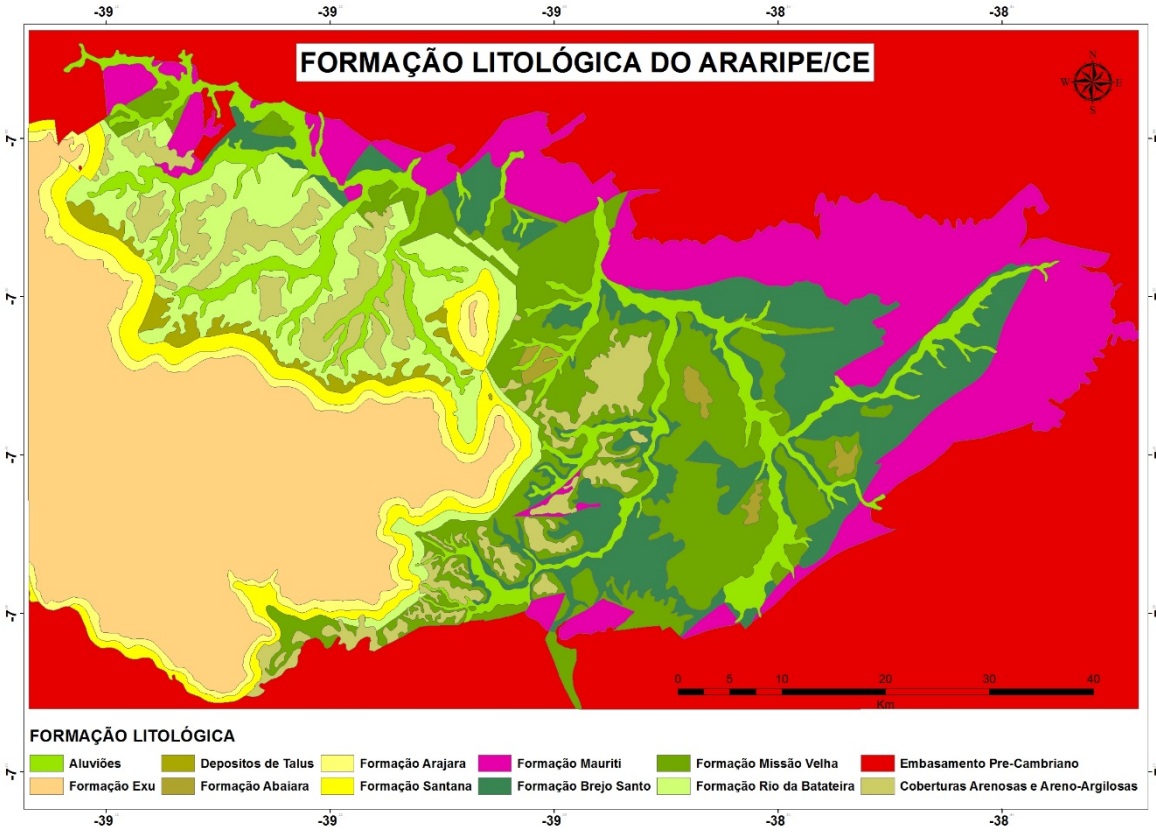


Figura 34 – Formação litológica da bacia sedimentar do Araripe.

Fonte: CPRM (2003).

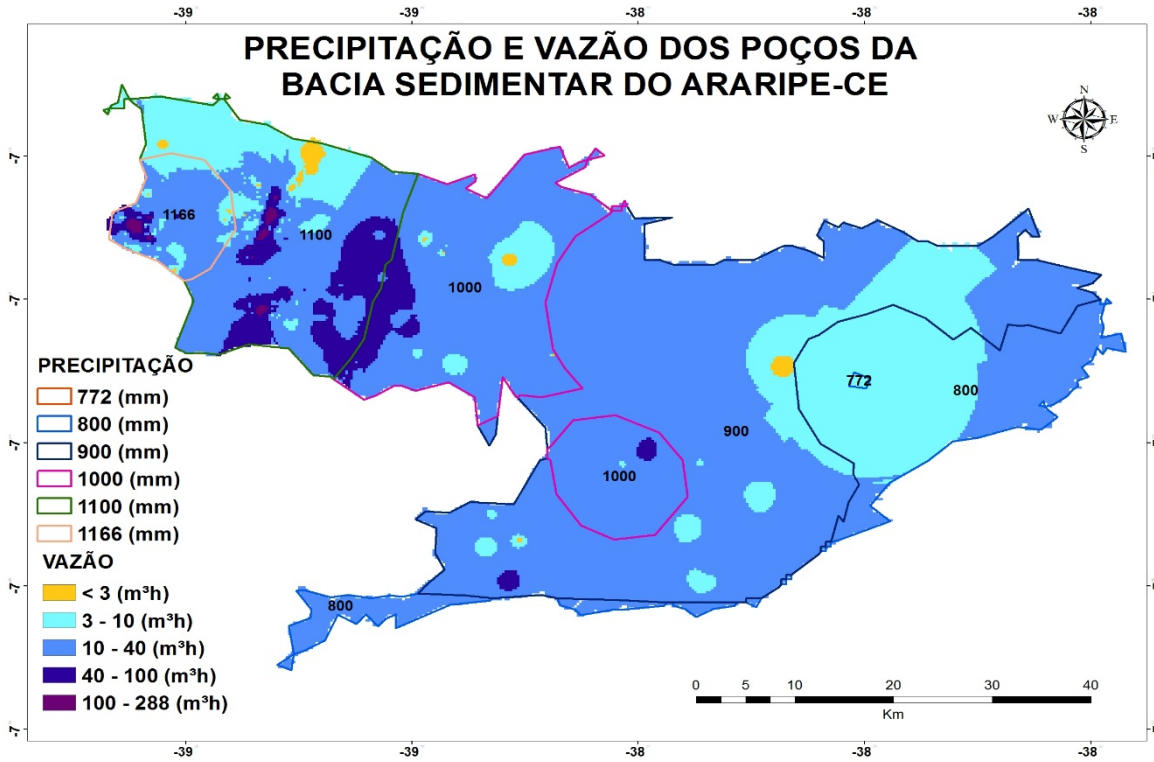


Figura 35 – Sobreposição entre a distribuição espacial da precipitação e as vazões dos poços na bacia sedimentar do Araripe.

Fonte: CPRM (2003).

2.4 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da Região de Picos

A vista de campo na região de Picos ocorreu no dia 8 de dezembro de 2016. Nessa visita foi realizado a pesquisa exploratória para o reconhecimento das características hidro-pedo-geológicas. Essa área apresenta clima semiárido caracterizado por elevadas temperaturas e baixas taxas pluviométricas, propiciando alta evapotranspiração, que associado à geologia sedimentar infere a essa região uma deficiência hídrica de corpos superficiais. Entretanto, a reserva de água subterrânea presente no aquífero Serra Grande tem viabilizado as atividades antrópicas.

A região de Picos é formada por duas unidades geológicas pertencentes às coberturas sedimentares, são elas: (a) a Formação Cabeças e (b) a Formação Pimenteiras. A Formação Cabeças reúne arenito e siltito, enquanto a Formação Pimenteiras engloba arenito, siltito e folhelho (AGUIAR, 2004)

O aquífero Serra Grande é o mais explorado por apresentar boas características de qualidade de água e altas vazões, ocasionadas em função da formação Serra Grande ser constituída, em sua maioria, de espessos bancos de arenitos de granulação média a grosseira, com boa transmissibilidade e alta capacidade de armazenamento (CPRM, 1999). No município de Picos foi observado a formação Pimenteira, que é constituída, essencialmente, por uma alternância de níveis de folhelhos e siltitos intercalados de forma subordinada, por finos níveis de arenitos de granulação muito fina de cores variadas com predominância da tonalidade vermelha (Figura 36).

Figura 36 – Detalhes da Formação Pimenteiras na região de Picos, no Piauí.

No município de Buriti Grande existe um engarrafamento de água mineral de propriedade de um Paraibano. Na cidade de Floriano foi observado que limite do semiárido é o Rio Parnaíba. Saindo da cidade de Floriano para a cidade de Teresina pela as margens do Rio Parnaíba, observou-se uma formação geológica parecida com a formação geológica do Bucatu.

2.5 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da Região de Campo Maior

A análise exploratória com o intuito de analisar as condições ambientais e hidro-pedo-geológica da região de Campo Maior foi realizada no dia 9 de dezembro de 2016. O município de Campo Maior é constituído por solo predominantemente arenoso, possui uma lagoa natural no centro urbano da cidade. Em visita ao Parque Nacional de Sete Cidades, foi observado formações rochosas sedimentares (Figura 37). No parque existem várias nascentes de águas subterrâneas e alguns poços tubulares.

Figura 37 – Formação geológica e nascente de água subterrânea, na região de Campo Maior, no Piauí.

2.6 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da Região da Serra de Ibiapaba

Ainda no dia 9 de dezembro de 2016, também foi verificado *in loco* algumas condições ambientais e hidro-pedo-geológicas na Região da Serra de Ibiapaba, que está situada na borda oriental da Bacia Sedimentar do Parnaíba, que tem uma parte no estado do

Piauí e outra no Ceará. Essa região possui uma característica de área de brejo devido ao seu clima. Nesta área há uma presença importante de cultivo de hortaliças que utilizam águas de poços, que são perfurados por várias empresas de perfuração instaladas na região. Também foi identificado mata arbórea de grande porte e algumas nascentes de água subterrâneas.

Na cidade de Varjota que fica localizada no sertão central do estado do Ceará, existe um perímetro de irrigação, que é abastecido pelo o açude de Araras (Figura 38). Essa área é caracterizada pela presença do embasamento cristalino, onde predomina solos rasos. Nesse perímetro de irrigação predomina o cultivo de banana. No local, observa-se que, após descer a Serra de Ibiapaba, há uma mudança na paisagem, marcado pela presença de solos rasos e afloramento cristalino.

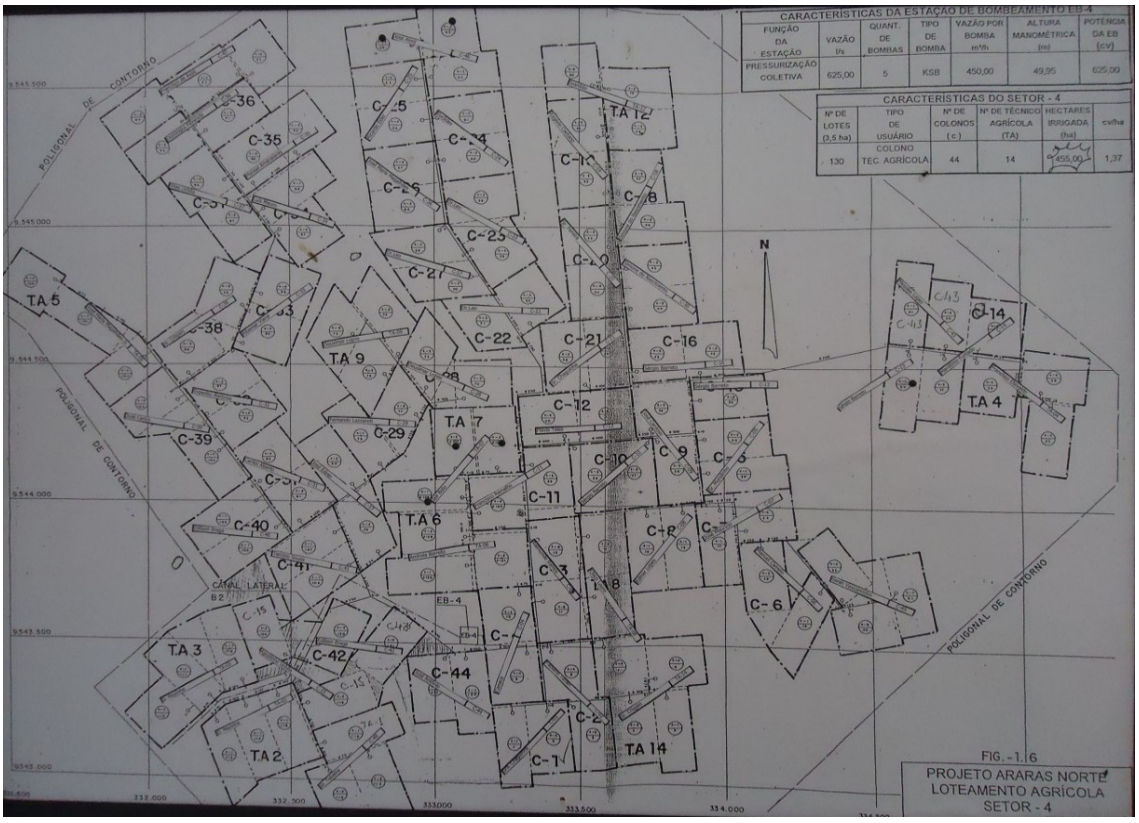


Figura 38 – Perímetro de irrigação do Açude Araras, no município de Varjota, no Ceará.
Fonte: COGERH (2018).

A Serra do Ibiapaba é a fronteira que divide a porção norte do Ceará e o Piauí. No estado do Piauí há uma presença de áreas sedimentares e no Ceará ocorre o embasamento cristalino, como verificado nos trabalhos de campo entre as cidades de Varjota e Quixadá, constatado pela grande quantidade de *inselbergs* em Quixadá.

Dando continuidade à análise exploratória, outro local para a análise foi na cidade de Morada Nova, no Ceará. Essa cidade possui um dos trechos do Canal da Integração, que sai do açude do Castanhão em Nova Jaguaribara (Figura 39), localizado no médio curso do Rio Jaguaribe. Esse canal é de suma importância para o estado do Ceará, pois seu objetivo é ajudar no abastecimento hídrico da região metropolitana de Fortaleza. O Canal da Integração, também conhecido como "Eixão das Águas", é constituído de um complexo de estação de bombeamento, canais, sifões, adutoras e túneis, que realizam a transposição das águas das bacias hidrográficas do Jaguaribe e Região Metropolitana e para reforçar o abastecimento da população e do Complexo Portuário e Industrial do Pecém.

Figura 39 – Vista do Canal da Integração, no município de Morada Nova, Ceará.

Ainda no município de Morada Nova, no Ceará existe um perímetro de irrigação implementado pelo DNOCS, que predomina o cultivo do arroz. As águas que abastecem esse perímetro irrigado vêm do açude Manabuiú, além disso, os lotes do perímetro estão localizados predominantemente nas várzeas do Rio Manabuiú.

Em visita realizada na cidade de Limoeiro do Norte, verificou-se a perenização artificial do Rio Jaguaribe, pelos os açudes de Orós e Castanhão (Figura 40). Nesse município também existe um perímetro irrigado do vale do Jaguaribe, onde há predomínio do cultivo de arroz (Figura 41).

Figura 40 – Vista parcial do Rio Jaguaribe, no município de Limoeiro do Norte, Ceará.

Na cidade de Tabuleiro, no estado do Ceará, observou-se a formação montanhosa da chapada do Apodi (Figura 42). A Chapada do Apodi é uma formação montanhosa localizada na divisa dos estados do Ceará e do Rio Grande do Norte. No Ceará está distribuída por cinco municípios: Alto Santo, Tabuleiro do Norte, Limoeiro do Norte, Quixeré e Jaguaruana, e no Rio Grande do Norte em quatro: Baraúna, Governador Dix-sept Rosado, Felipe Guerra e Apodí. Essa área apresenta uma grande uniformidade do ponto de vista topográfico, tendo relevo plano, com declives dominantes inferiores a 2%, possuindo assim, condições favoráveis para a agricultura.

Figura 41 – Vista parcial de uma plantação de arroz no município de Limoeiro do Norte, Ceará.

Na Chapada do Apodi foi identificado um assentamento rural que possui irrigação de fruteiras por meio de poços tubulares, além disso, no poço mais profundo, a água contém menos sais e que no poço de menor profundidade a água possui mais sais. Nessa mesma área existe ainda a exploração de mármores e fábricas de cal.

A Chapada do Apodi é hoje uma importante área de fruticultura para exportação. A água utilizada no Projeto de irrigação Jaguaribe-Apodi é bombeada através de uma estação elevatória que transfere a água para cerca de 40 m acima do nível do rio e a conduz em canais para uso em sistema de pivôs. Este projeto localizado em Limoeiro do Norte foi instalado pelo Departamento de Obras Contra as Secas (DNOCS), com a primeira etapa implantada no início dos anos 90 (ARAÚJO, 2011).

Figura 42 – Vista parcial da Chapada do Apodi, na cidade de Tabuleiro, Ceará.

Na região de Baraúnas, a irrigação se dar por meio de água subterrânea e outra importante informação é que o uso de defensivo agrícola é bastante usado no cultivo das frutas. Alguns assentados da região ressaltaram que algumas propriedades rurais têm dificuldades para irrigar devido à falta de incentivos do governo, e que, a energia é o grande osbstáculo para irrigação devido as altas taxas. Porém, nessa região foram identificadas várias multinacionais que estão sendo estaladas. Relatos de moradores locais destacam que alguns poços estão diminuindo o volume de água ao passar do tempo.

2.7 Análise da Ilha Hidro-Pedo-Geológica da Bacia do Rio Moxotó

Outra área identificada como uma hidro-pedo-geológica é a bacia do Rio Moxotó, localizada no estado de Pernambuco. Essa bacia hidrográfica (Figura 43) está inserida totalmente dentro dos limites do semiárido do Nordeste e situa-se quase que inteiramente na porção central do estado de Pernambuco e na porção oeste de Alagoas, compreendendo uma área de cerca de 9.752 km², sendo 8.778 km² em Pernambuco e 974 km² em Alagoas.

A bacia do Moxotó tem nas suas porções norte e sul terrenos cristalinos e no centro uma expressiva faixa de terrenos sobre formações sedimentares. A Figura 44 mostra a hidrogeologia da bacia hidrográfica do Rio Moxotó. As Figuras 45 a 47 mostram as características e comportamentos climático-geológicos da bacia do Rio Moxotó.

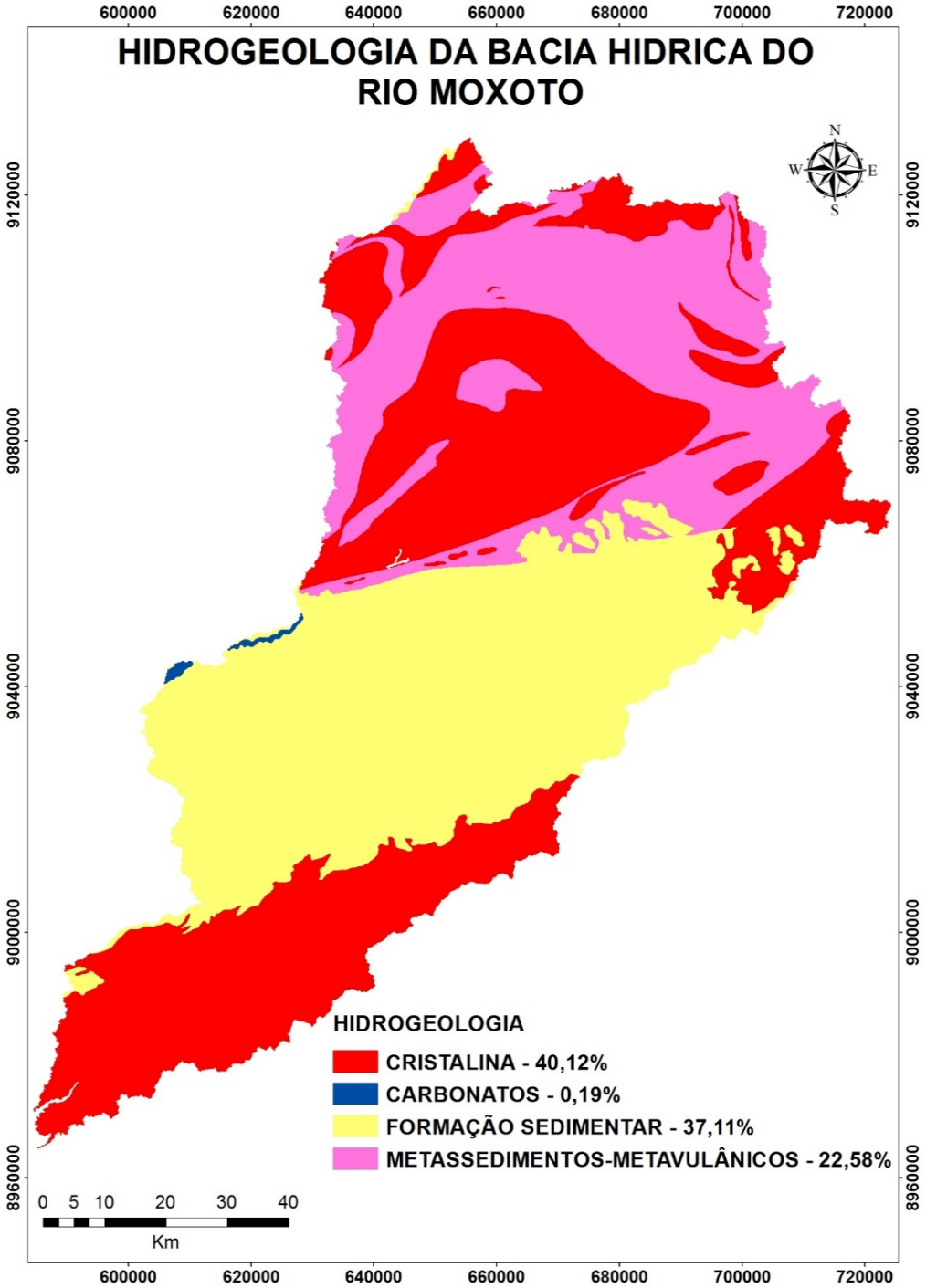


Figura 43 – Hidrogeologia da bacia hidrográfica do Rio Moxotó.
Fonte: CPRM (2016).

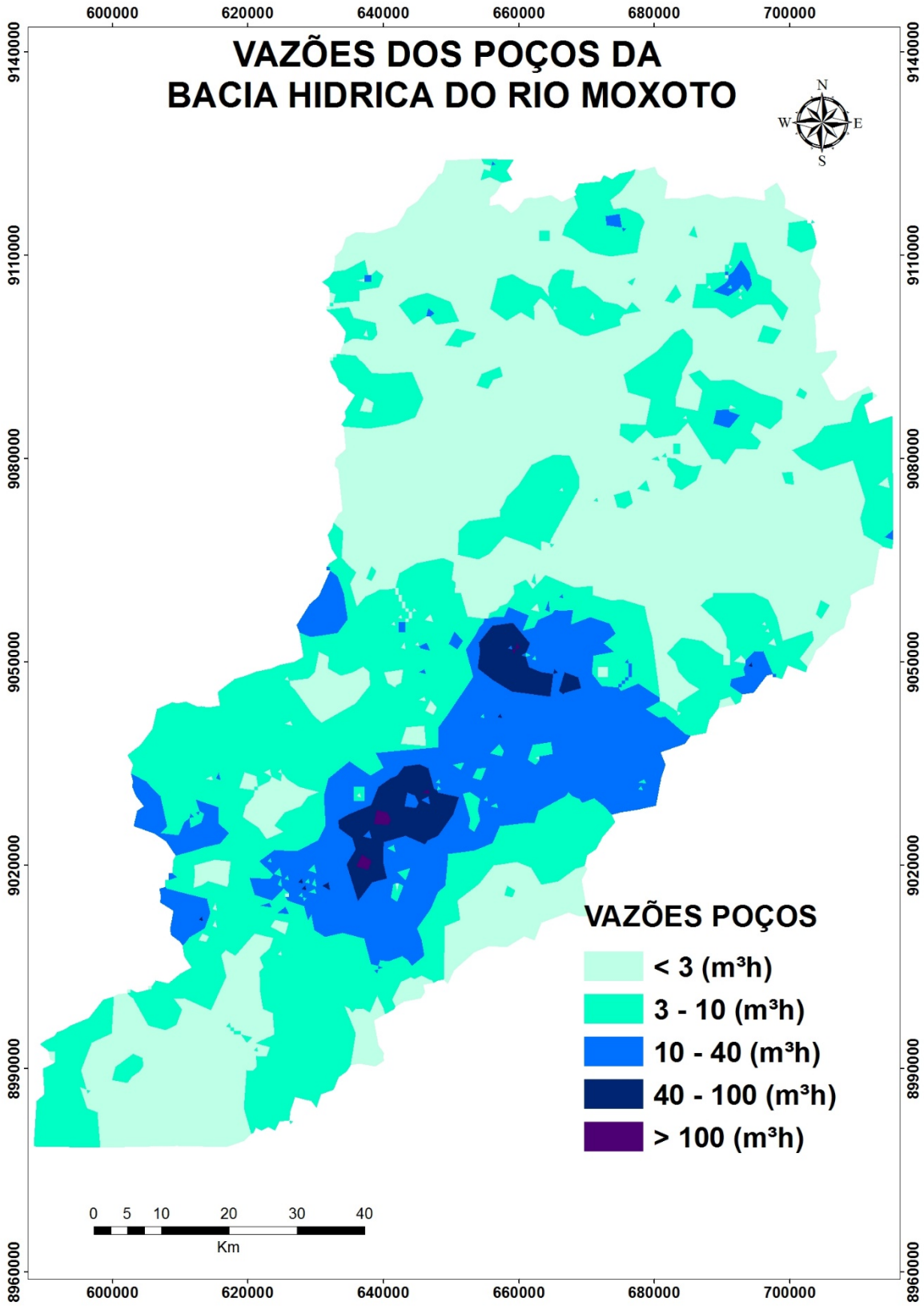


Figura 44 – Interpolação espacial das vazões dos poços da bacia hidrográfica do Rio Moxotó, em Pernambuco.
Fonte: CPRM (2016).

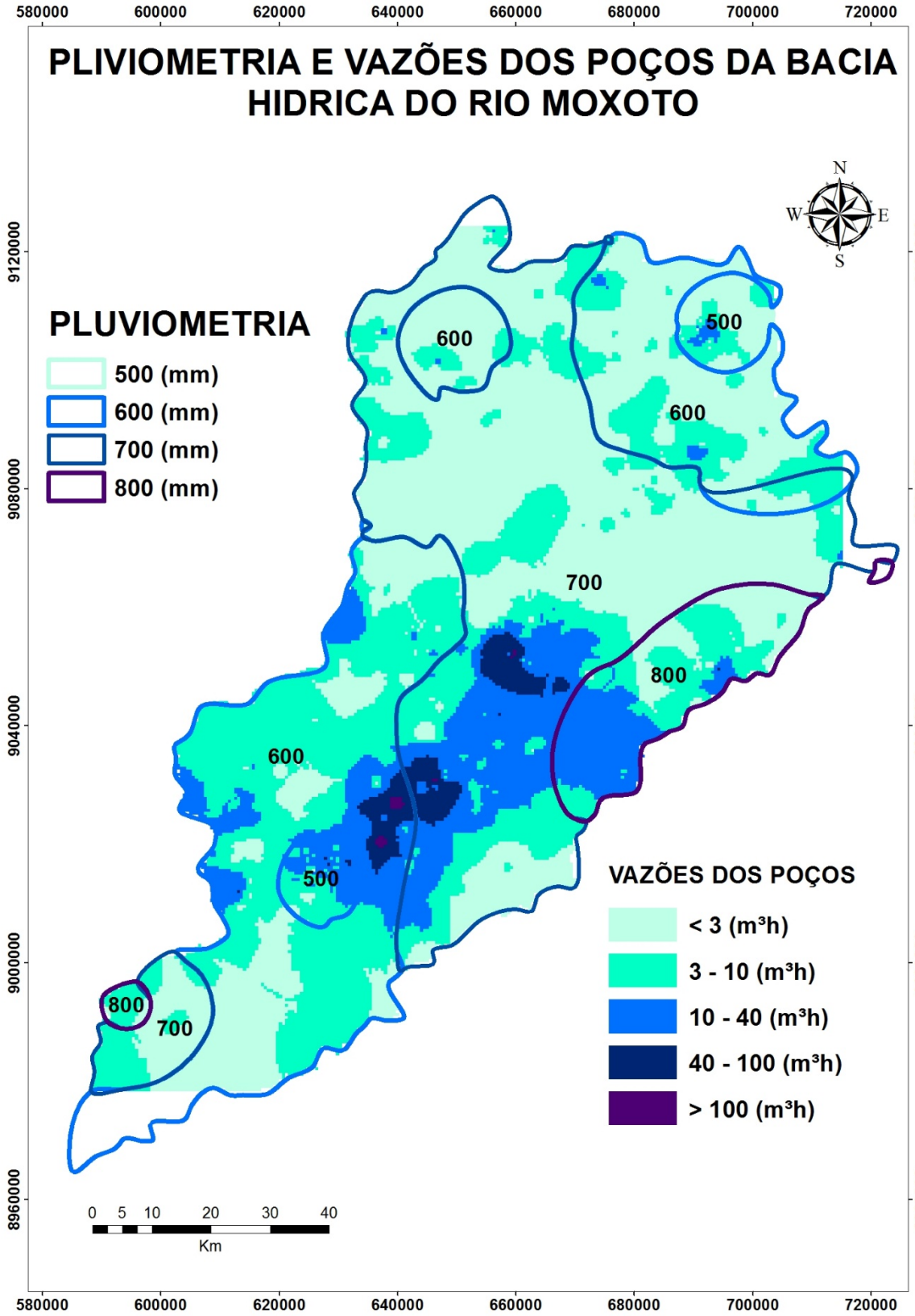


Figura 45 – Sobreposição da pluviometria e vazões dos poços da bacia hidrográfica do Rio Moxotó, em Pernambuco.

Fonte: CPRM (2016).

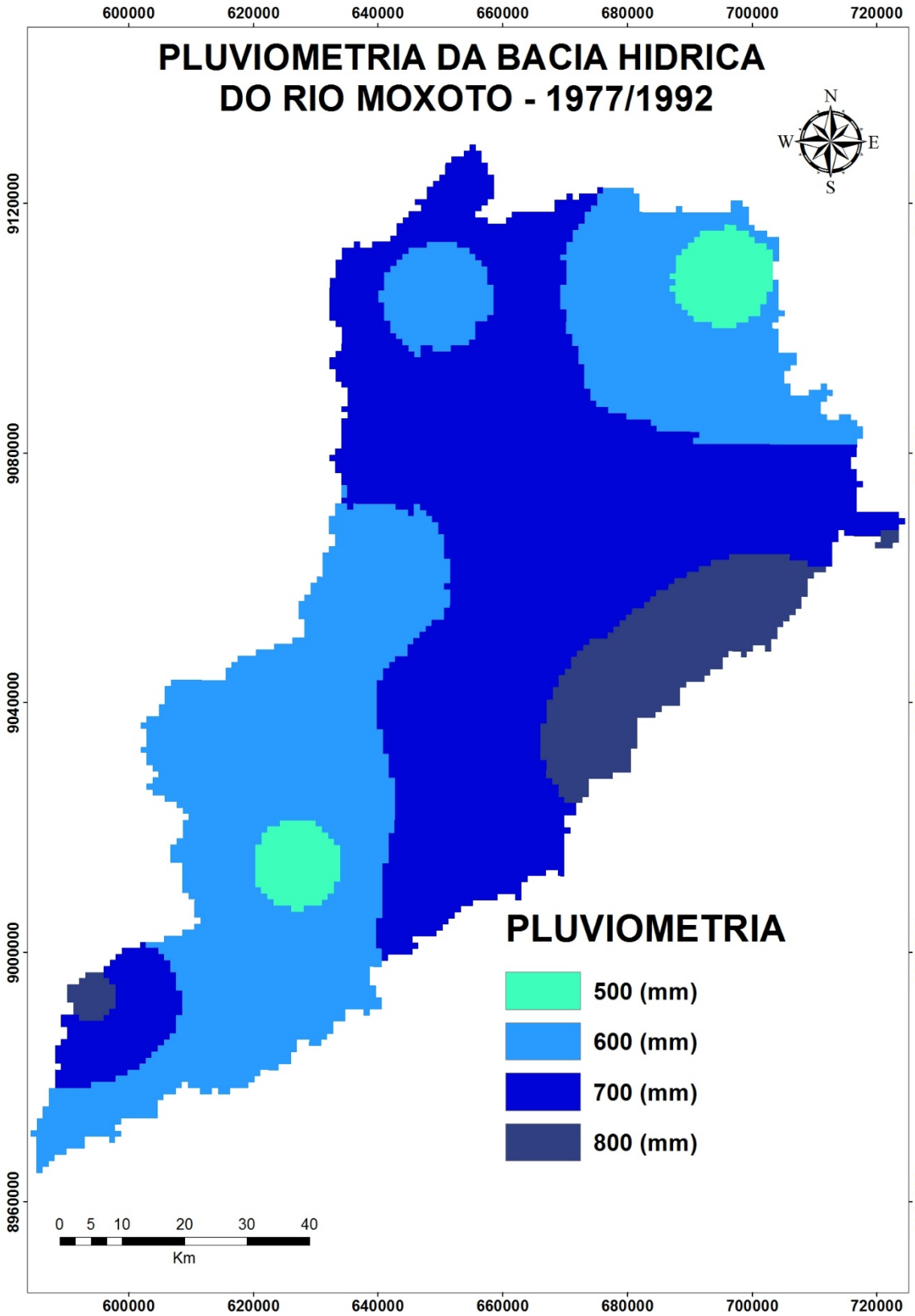


Figura 46 – Distribuição espacial da pluviometria da bacia hidrográfica do Rio Moxotó.
Fonte: CPRM (2016).

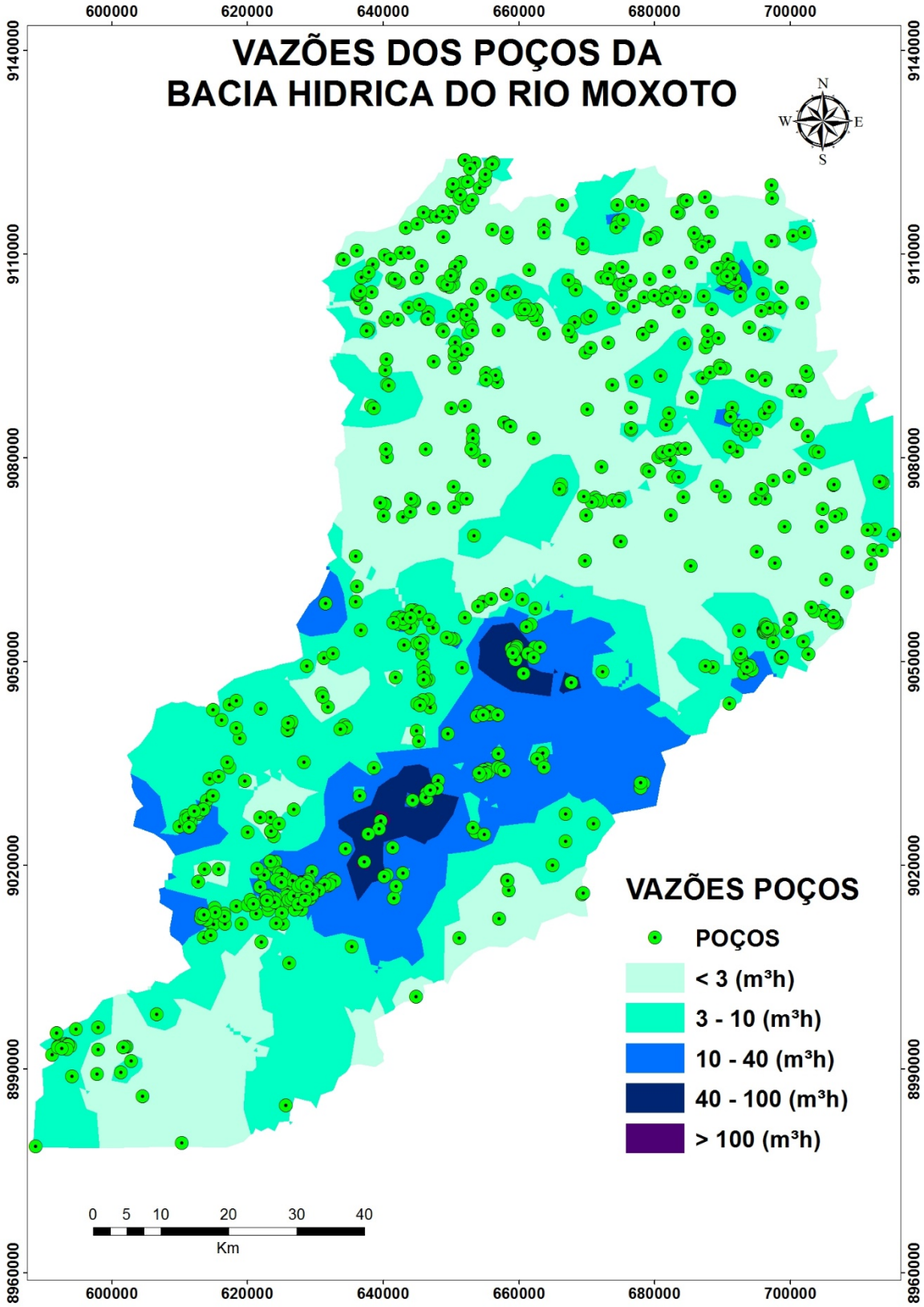


Figura 47 – Localização geográficas dos poços da bacia hidrográfica do Rio Moxotó.
Fonte: CPRM (2016).

3. AJUSTE DOS PARÂMETROS DA MODEGEM HIDROLÓGICA: O CASO DA ILHA HIDRO-PEDO-GEOLÓGICAS DA BACIA DO RIO SALGADO

3.1 Modelagem Hidrológica para o Posto Icó

A Tabela 13 mostra as análises estatísticas das calibrações e validações para o posto Icó. Os resultados dessa tabela mostram que no período de calibração as métricas de calibração utilizadas neste estudo podem ser consideradas boas (R^2 = 0,84 e Nash = 0,65), enquanto no período de validação os valores pioraram (R^2 = 0,83 e Nash = 0,57). Esses resultados podem ser entendidos como comuns no âmbito da modelagem, como também obtidos nos estudos de Yesuf et al. (2015), Ayele et al. (2017), Worku et al. (2017).

Entretanto, pode-se notar que mesmo com essa diminuição dos valores de R^2 e Nash, as métricas de desempenho da modelagem ainda podem ser considerados bons para a análise do comportamento das vazões nessa seção de controle. Os resultados obtidos mostraram que o modelo SWAT subestimou as vazões estimadas quando comparadas as observadas, tanto na calibração (média simulada foi de 14,73 m^3/s e a média observada de 21,60 m^3/s, uma diferença de 85%), quanto no período de validação (média simulada =foi de 13,52 m^3/s e a média observada de 20,44 m^3/s, uma diferença de 86%).

Tabela 13. Análise estatística das calibrações e validações para o posto Icó.

Estatísticas	Calibração (1986 – 2005)	Validação (2006 – 2017)
R^2	0,84	0,83
Nash	0,65	0,57
Média simulada (m^3/s)	14,73	13,52
Média observada (m^3/s)	21,60	20,44

A Figura 48 apresenta os rasultadas modelagem hidrológica para o posto Icó entre 1986-2005 (calibração) e 2006-2017 (validação). Nota-se que os hidrogramas observados e simulados acompanharam as subidas e as descidas, entretanto os picos não ficaram bem ajustados.

Com relação às vazões calibradas para os meses considerados normais e secos, as vazões simuladas ficaram bem próximas das vazões observadas, sendo classificada como uma calibração muito boa, porém nos meses onde ocorreram os maiores eventos de vazões o ajuste pode ser considerado razoavelmente satisfatório. Nota-se ainda que as vazões em

nenhum momento ficaram acima dos picos máximos observados, o que pode implicar em características particulares dessa região sedimentar na produção de água.

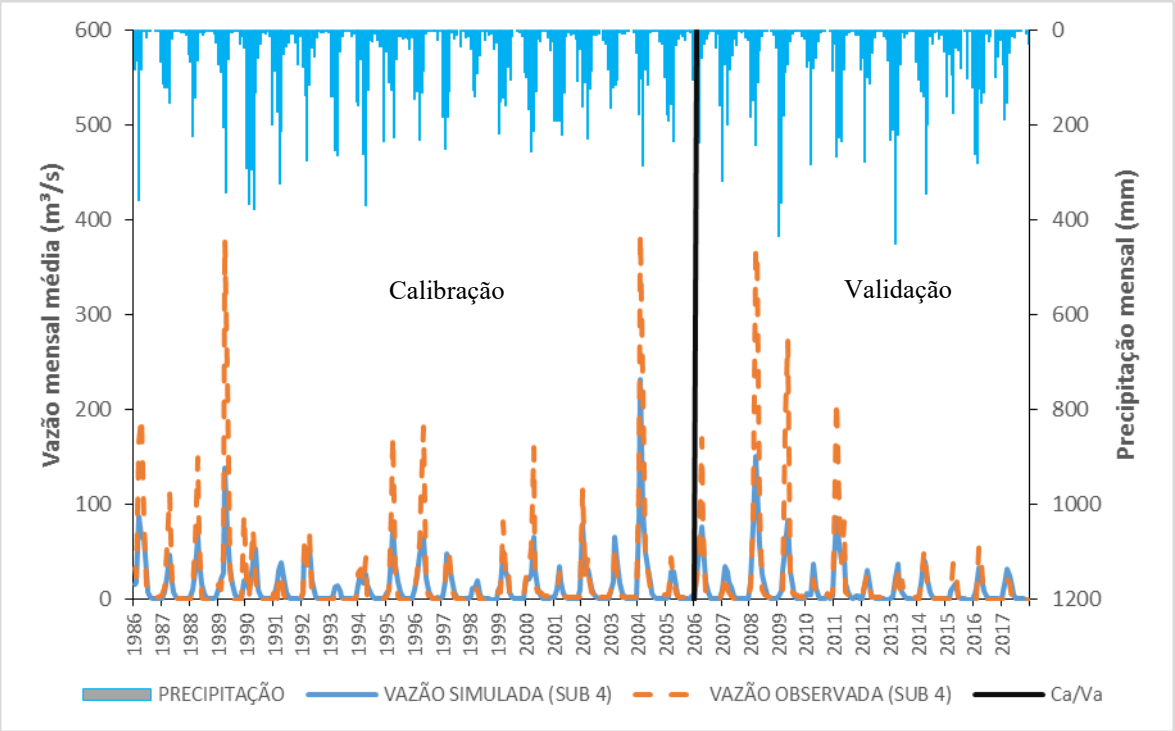


Figura 48 – Modelagem hidrológica para o posto Icó, para o período entre 1986–2005 (calibração) e 2006–2017 (validação).

3.2 Modelagem Hidrológica para o Posto Lapinha

A Figura 49 apresenta os hidrogramas das vazões observada e simulada para o período da calibração no posto Lapinha. Observou-se um Nash = 0,70 e R^2 = 0,85 (Tabela 14), que são considerados mito bons para a modelagem hidrológica, segundo Moriasi et al. (2007). Os resultados mostram que não houve uma discrepância nos valores do fluxo de base assim como nos picos de vazão, com exceção de alguns eventos em que SWAT superestimou os picos de vazão (Figura 49). O comportamento gráfico das vazões, no geral, é considerado bom em que as vazões médias observada e simulada no período de calibração foram de 3,85 e 3,51 m³/s, respectivamente, enquanto na fase de validação foram de 3,65 e 2,95 m³/s, respectivamente. Os resultados para o posto Lapinha mostram que o SWAT subestimou as vazões médias, mas que, graficamente os resultados são muito bons.

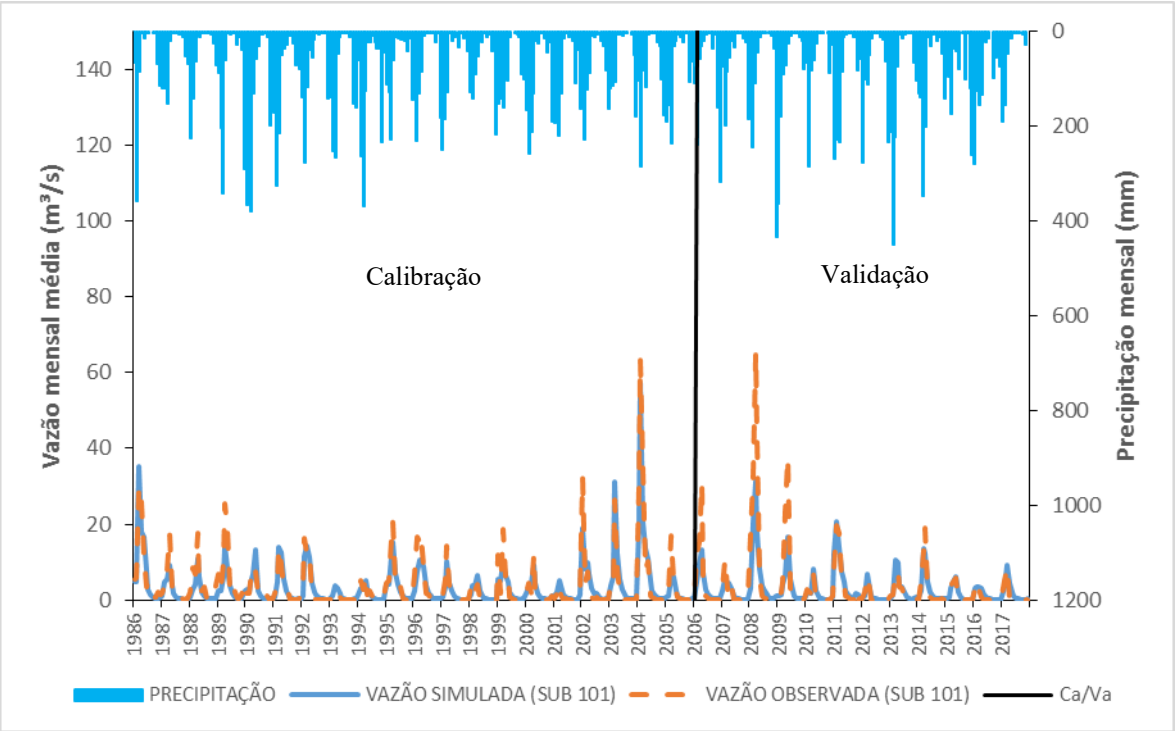


Figura 49 – Modelagem hidrológica para o posto Lapinha entre 1986–2005 (calibração) e 2006–2017 (validação).

Tabela 14. Análise estatística das calibrações e validações para o posto Lapinha.

Estatísticas	Calibração (1986 – 2005)	Validação (2006 – 2017)
R^2	0,85	0,82
Nash	0,84	0,68
Média simulada (m³/s)	3,51	2,95
Média observada (m³/s)	3,85	3,65

3.3 Modelagem Hidrológica para o Posto Podimirim

Assim como nos demais postos já apresentados, a calibração do modelo SWAT foi realizada automaticamente utilizando dados de vazão mensais correspondentes ao posto fluviométrico Podimirim, cujas análises estatísticas (Nash e R^2) apresentaram resultados considerados bons, como põem ser conferidos na Tabela 15. A Figura 50 mostra a modelagem hidrológica para o posto Podimirim nos períodos de calibração (entre 1986-2005) e validação (entre 2006-2017).

Nota-se que o modelo foi capaz de reproduzir de maneira adequada as vazões mensais, pois o SWAT apresentou uma boa correlação entre as vazões simulada e observada, evidenciando a adequada transferência de água da fase de bacia para a fase de canal. O modelo subestimou as vazões de picos em aproximadamente 12 eventos e

superestimou em 5 eventos. Tal fato sugere que parte de água precipitada estar sendo infiltrada no solo e usada para o escoamento subterrâneo. Assim, pode-se relacionar essas oscilações nas vazões a influência das características do Aquífero que possui uma área de recarga de 5.670 km² e pertence à Bacia Sedimentar do Araripe. Assim, os valores elevados nos gráficos indicam uma recessão, enquanto valores baixos expressam que a drenagem é mais lenta. Segundo Fernandes (2012), tal fato é um fator importante, pois essa é uma zona produtora de águas proveniente do aquífero, é também nessa região onde se encontram muitas das nascentes de rios nessa região.

Tabela 15. Análise estatística das calibrações e validações para o posto Podimirim.

Estatísticas	Calibração (1986 – 2005)	Validação (2006 – 2017)
R^2	0,74	0,73
Nash	0,68	0,30
Média simulada (m^3/s)	4,76	4,27
Média observada (m^3/s)	2,91	1,78

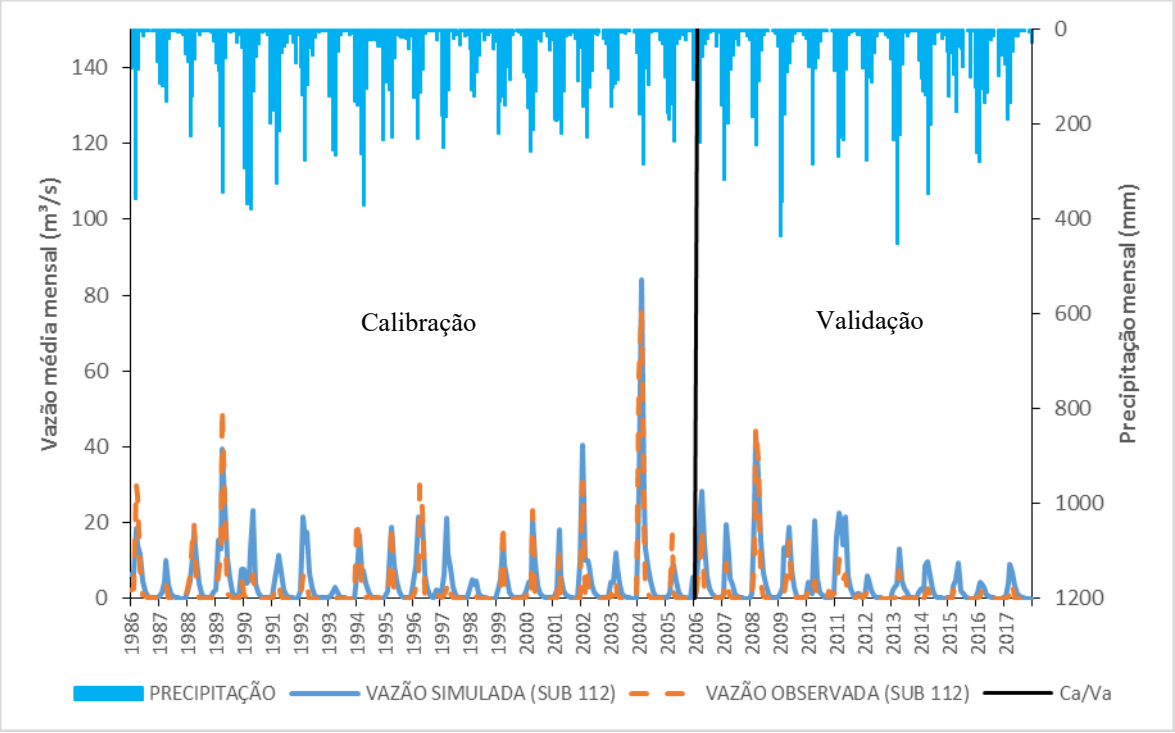


Figura 50 – Modelagem hidrológica para o posto Podimirim entre 1986–2005 (calibração) e 2006–2017 (validação).

3.4 Análise do Espaço Temporal do Balanço Hídrico de Água no Solo na Bacia do Rio Salgado

Dentre os fatores climáticos, a precipitação é a principal variável do balanço hídrico, pois ela controla a disponibilidade e/ou déficit de água na atmosfera e no solo. Os valores dessa variável meteorológica medida ao longo do período de avaliação estão presentes na Figura 51. Essa figura apresenta a distribuição temporal da precipitação na bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017. Os resultados mostram que a bacia do Rio Salgado apresenta sua quadra chuvosa entre os meses de janeiro e abril, com valores máximos variando de entre 145 e 210 mm/mês, enquanto o período chuvoso, a precipitação não ultrapassa 55 mm/mês. Analisando esses valores, verifica-se que a ocorrência das chuvas foi irregular, como esperado.

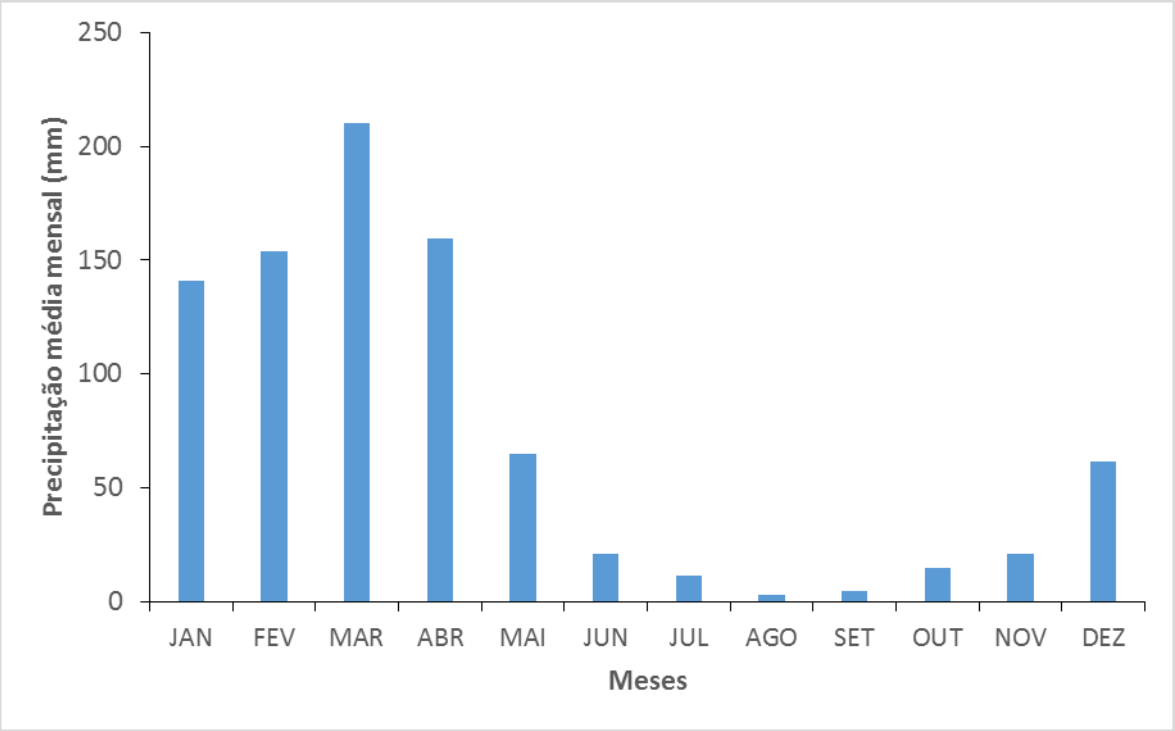


Figura 51 – Distribuição temporal da precipitação na bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017.

Os resultados dos componentes do balanço hídrico estimado pelo SWAT também foram sintetizados em base mensal (Tabela 16). Na bacia hidrográfica do Rio Salgado, observa-se uma pequena diferença na produção de água entras as áreas do cristalino e a sedimentar na bacia, com 50,18 mm e 50,70 mm, respectivamente, mesmo para uma bacia

hidrográfica com as características do Rio Salgado, que possui solos rasos e pouco desenvolvidos e relevo fortemente acidentado que, normalmente, indicam um alto índice de escoamento superficial. Além disso, na bacia hidrográfica do Rio Salgado, as pedoformas desta bacia hidrográfica com predomínio de feições côncavo-côncavas favorecem o escoamento subsuperficial e, por conseguinte, o predomínio do escoamento de base na vazão do curso d'água (GOMES et al., 2008).

Tabela 16. Valores estatísticos das variáveis hidrológicas do balanço hídrico

Variáveis hidrológicas	**Área sedimentar na bacia**				**Área do cristalino na bacia**			
	Mínimo	**Máximo**	**Média**	**DP***	**Mínimo**	**Máximo**	**Média**	**DP***
Precipitação	559,84	1050,47	878,46	135,57	559,84	1006,00	861,52	95,03
ET	444,95	857,13	637,99	96,88	444,95	711,45	571,98	58,34
Produção de água	11,16	136,85	50,70	21,70	15,86	136,85	50,18	20,90
Escoamento superficial	0,04	8,15	0,92	0,83	0,04	8,15	0,47	0,47
Percolação	1,67	30,45	16,97	6,04	2,57	30,45	21,21	5,28
Água no solo	16,80	319,03	178,44	72,48	16,80	316,90	67,55	50,00

* Desvio padrão.

As Figuras 52 a 57 mostram a espacialização das variáveis do balanço hídrico no solo estimado pelo modelo SWAT para cada sub-bacia do Rio do Salgado. A Figura 52 apresenta a distribuição espacial da precipitação anual média para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017. Percebe-se que os maiores valores de precipitação ocorreram na porção oeste da bacia, com valores variando de 900 a 1000 mm/ano.

A Figura 53 mostra a distribuição espacial da percolação mensal média para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017. Notou-se que os menores valores ocorrem na porção sul da bacia, que se caracteriza pela presença do pacote sedimentar na bacia. A Figura 54 mostra a distribuição espacial da evapotranspiração anual média para cada sub-bacia do Rio Salgado no período estudado. Percebe-se uma maior heterogeneidade nos valores dessa variável, ou seja, não existe um padrão espacial, o que deve-se ao fato da grande variabilidade espacial da evapotranspiração na região.

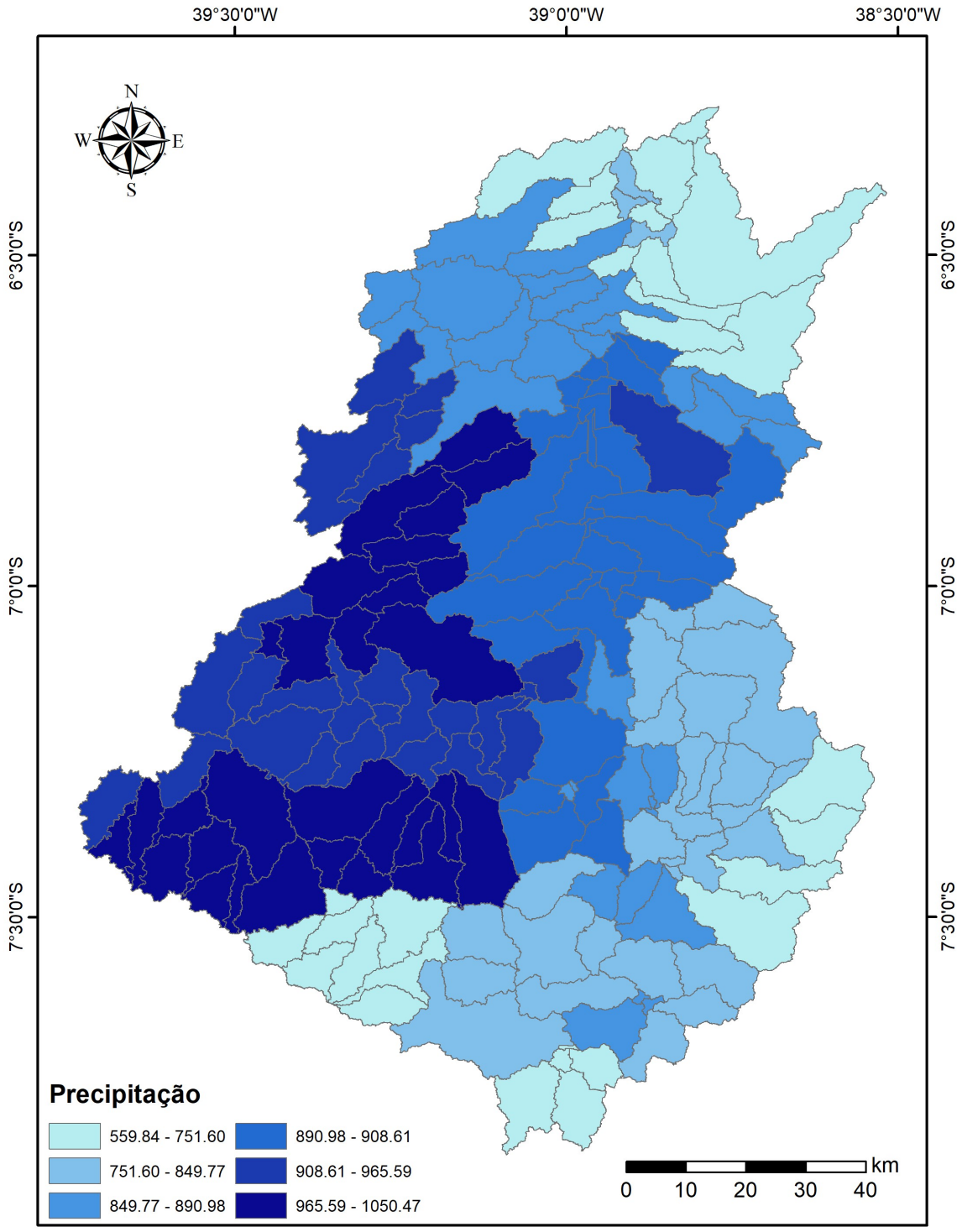


Figura 52 – Distribuição espacial da precipitação anual média para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017.

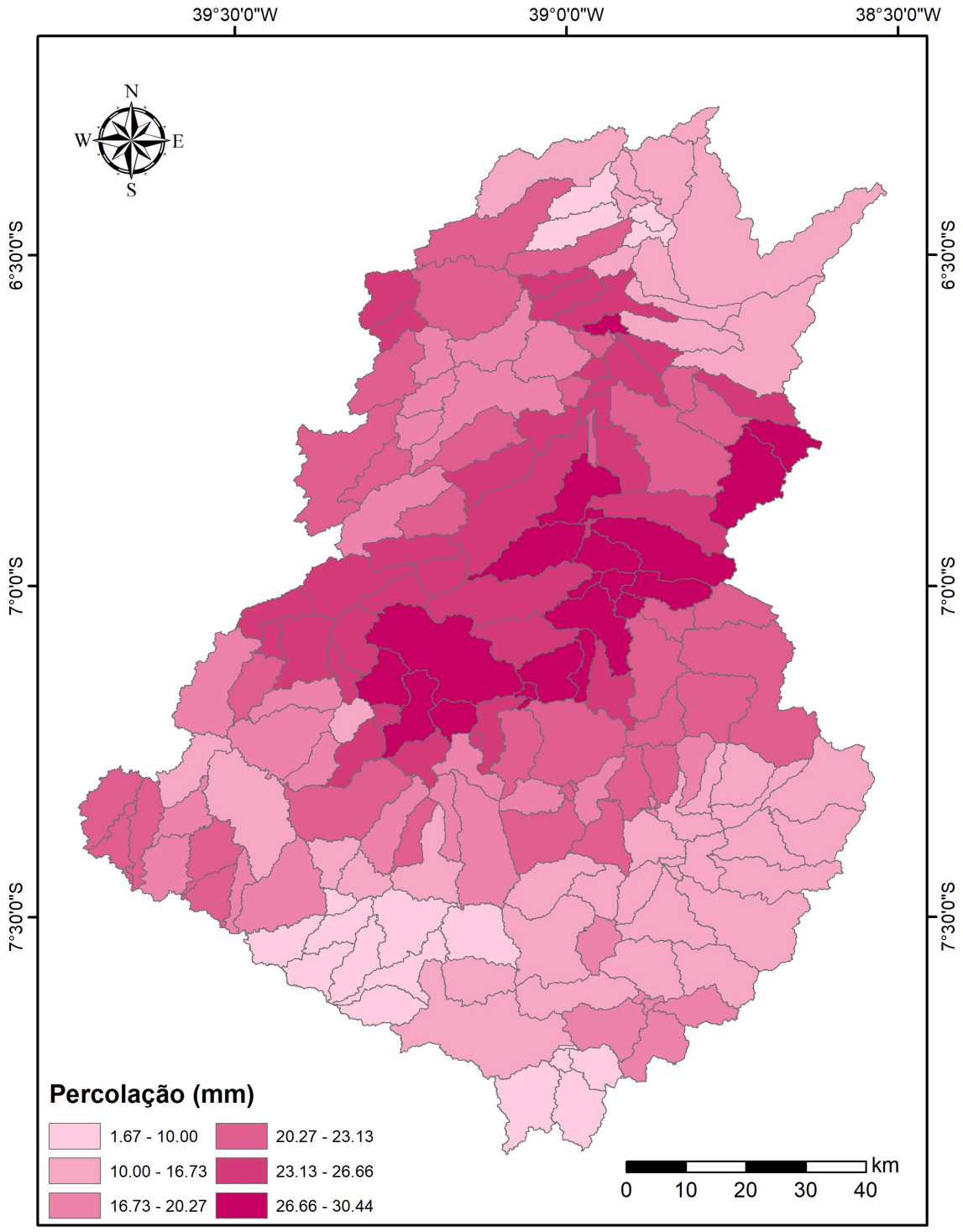


Figura 53 – Distribuição espacial da percolação mensal média para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017.

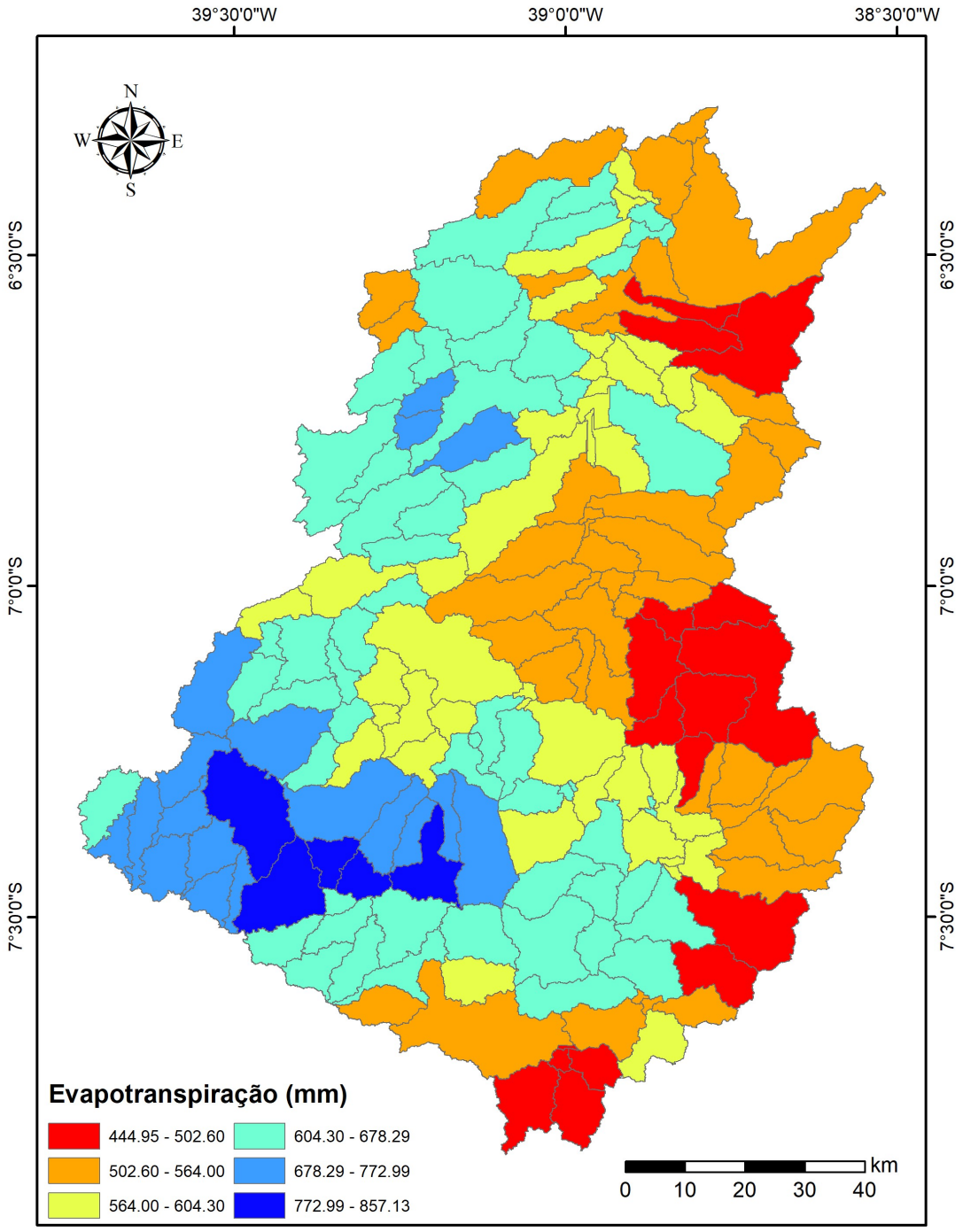


Figura 54 – Distribuição espacial da evapotranspiração potencial anual média para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017.

A distribuição geográfica da quantidade de água no solo média anual estimada pelo SWAT para cada sub-bacia do Rio Salgado é mostrada na Figura 55. Como esperado, os maiores valores de água no solo ocorrem na porção da bacia com a presença de material sedimentar, enquanto na porção do embasamento cristalino há a ocorrência dos menores valores de água do solo. Essa característica também é notada pela quantidade de

escoamento superficial (Figura 56) e pela produção de água média anual (Figura 57), ambas variáveis estimadas pelo SWAT, no qual se percebe que os maiores valores (entre 1 e 8 m³/s) ocorrem na porção sedimentar da bacia, onde os solos são mais espessos e há a presença de aquíferos.

A Figura 58 apresenta a distribuição espacial e vazões dos poços no cristalino e na área sedimentar na bacia do Rio Salgado. Nota-se que, tanto a maioria dos poços como as maiores vazões (acima de 80 m³/s) estão localizados na porção sedimentar da bacia.

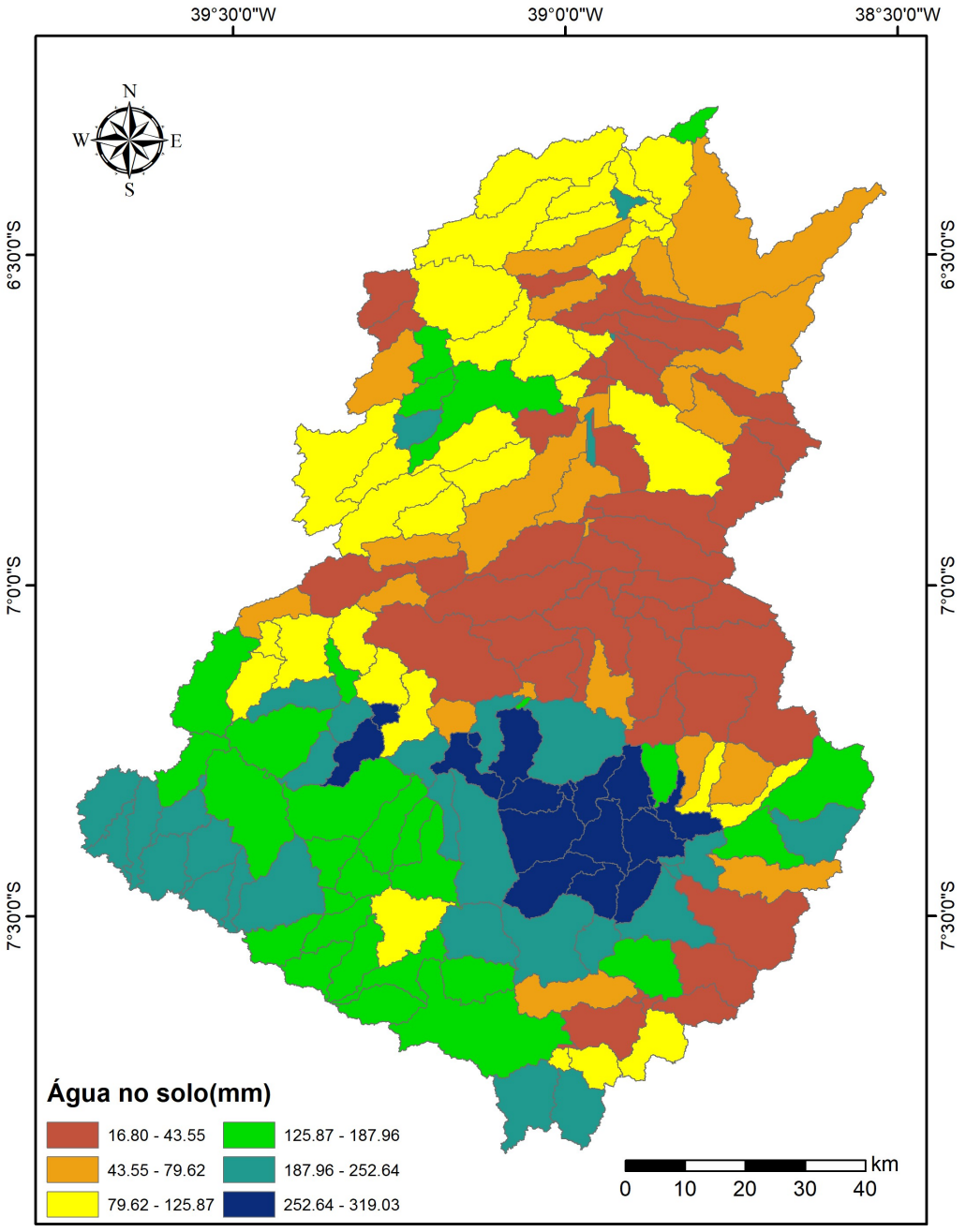


Figura 55 – Distribuição espacial da quantidade de água no solo média anual estimada pelo SWAT para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017.

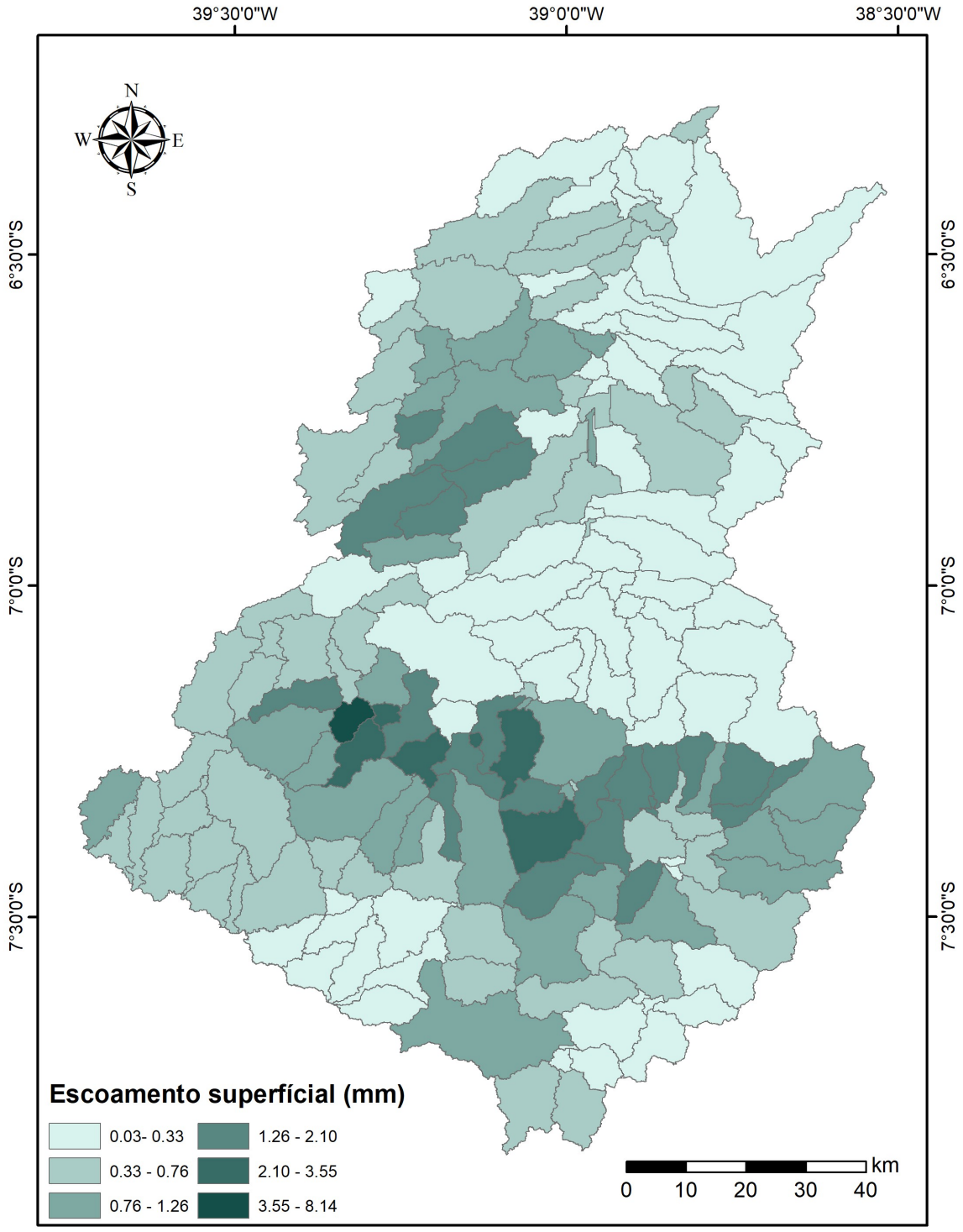


Figura 56 – Distribuição espacial do escoamento média mensal estimada pelo SWAT para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017.

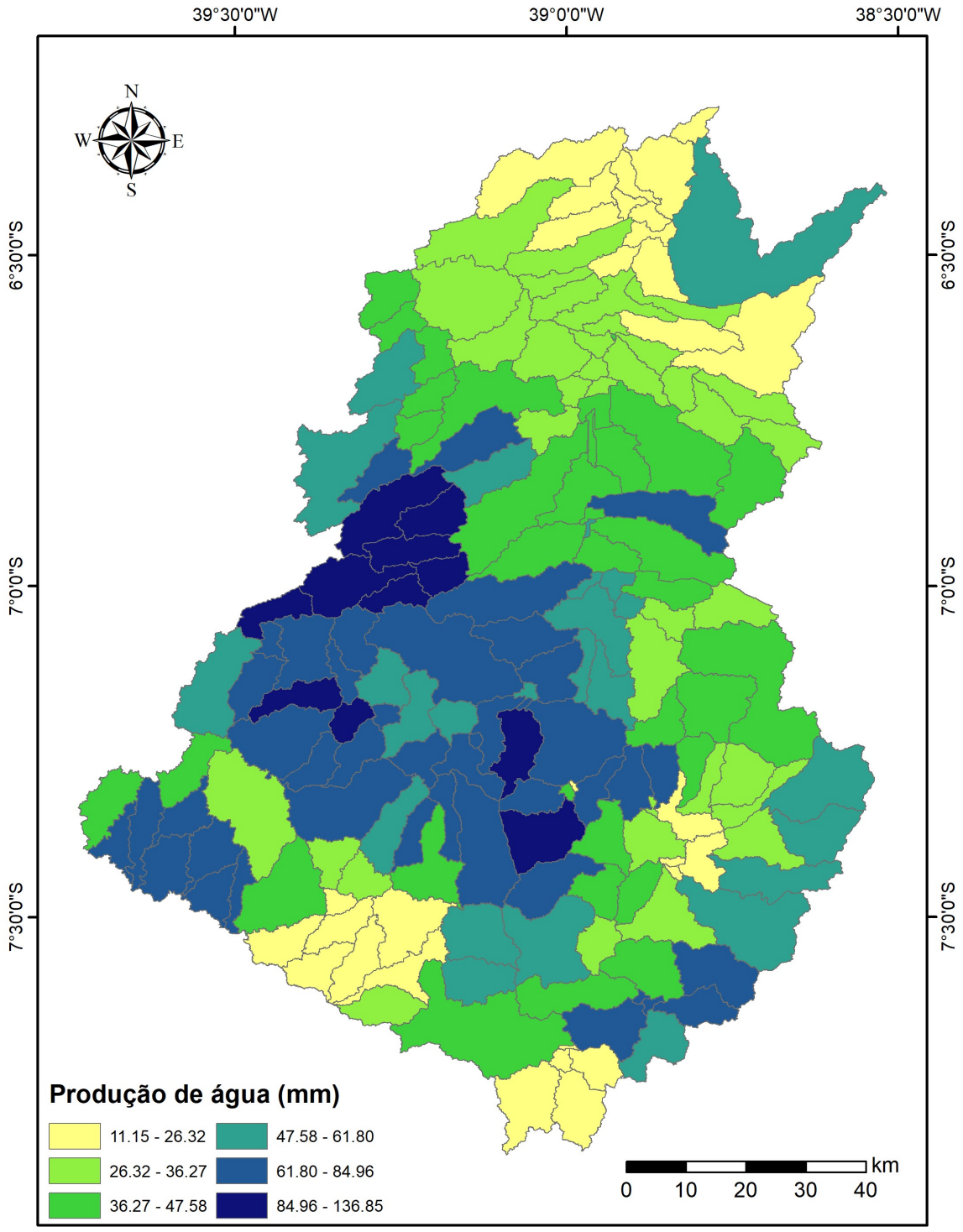


Figura 57 – Distribuição espacial da produção de água média anual estimada pelo SWAT para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017.

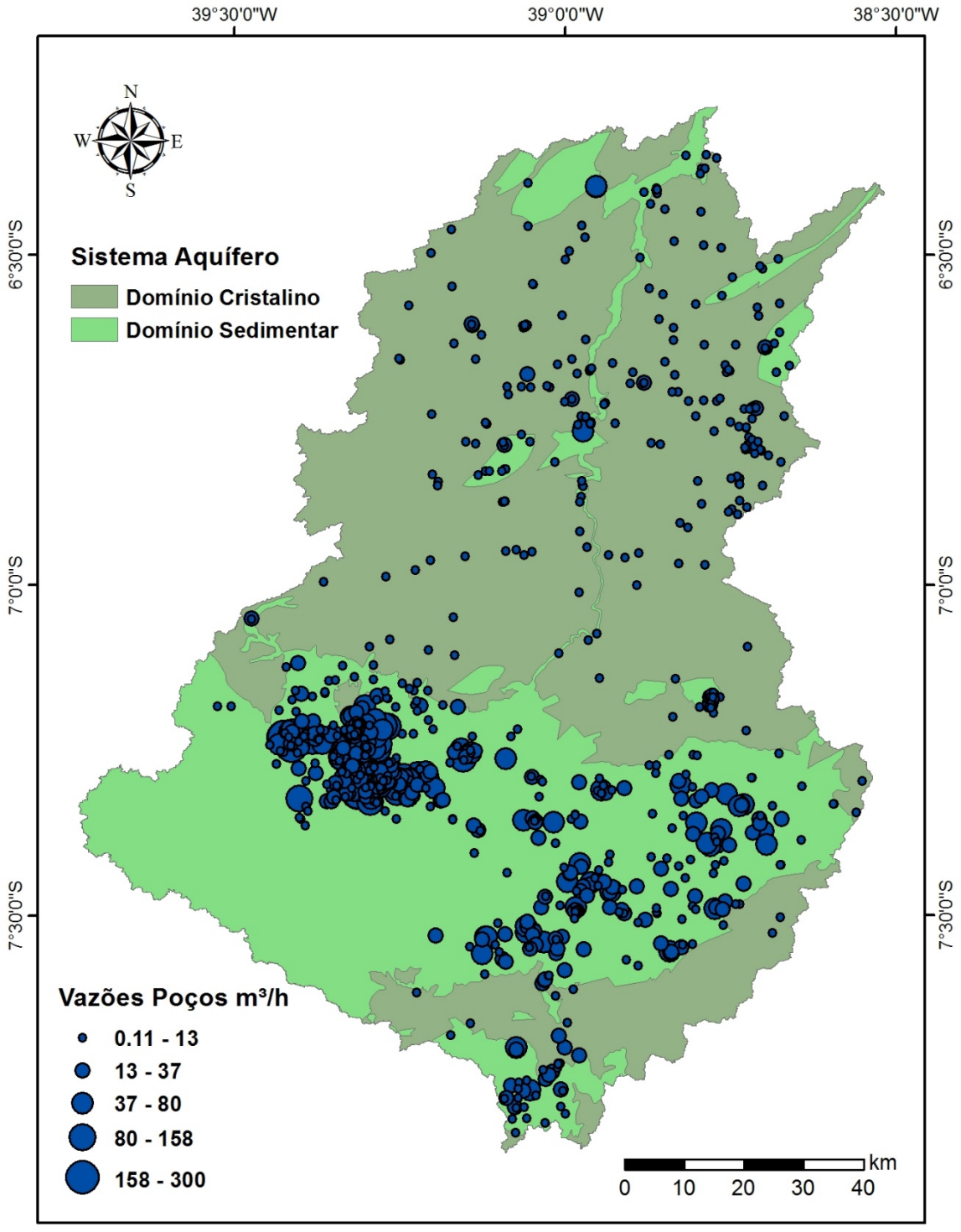


Figura 58 – Distribuição espacial e vazões dos poços no cristalino e na área sedimentar na bacia do Rio Salgado.

CONSIDERÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Este estudo analisou ilhas “hidro-pedo-geológicas” no contexto da região semiárida do Nordeste do Brasil. Essas “ilhas” são caracterizadas pela presença de água mesmo e períodos secos, quando comparadas a outras áreas em uma mesma região climatológica. Essa diferença no comportamento de água no solo deve-se ao fato da existência de condições hidrológicas, pedológicas e geológicas dessas ilhas, que fazem com que a água no solo seja constante ou na maioria das vezes em maior abundância do que em outras partes da bacia hidrográfica. Essa característica foi confirmada neste estudo baseado em visitas em campo e mediante análise hidrológica que constatou a diferença do conteúdo de água no solo.

Pode-se concluir com o estudo que o escoamento superficial estimado e a percolação da água nas porções sedimentares nas ilhas hidro-pedo-geológica foram maiores do que na porção cristalina, como comprovado na bacia Hidrográfica do Rio Salgado, no estado do Ceará.

A partir da utilização integrada de técnicas de modelagem hidrológica e Sistemas de Informações Geográficas foi possível identificar na bacia do Rio Salgado quais são as áreas mais susceptíveis a produção de água na bacia e uma diferenciação quantitativa no balanço hídrico nas duas zonas geológicas identificadas na bacia (sedimentar e do cristalino), e assim, permitir o uso dessas informações pelos gestores de recursos hídricos da região. Essa conclusão foi atingida (comprovada) também nos trabalhos de campo, onde foi possível ter um panorama atual das condições hidrológicas distintas em uma mesma zona climatologicamente homogênea.

No que concerne as recomendações futuras, após a realização deste estudo, pode-se destacar que uma modelagem hidrológica levando-se em consideração a rede de reservatórios na bacia deva ser estudada em novos estudos hidrológicos, para quantificar o volume escoado e/ou retido nesses locais, para poder auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos da região.

REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A. N. Sertões e sertanejos: uma geografia humana sofrida. Estudos Avançados, Universidade de São Paulo, Instituto de Estudos Avançados, v. 1, n. 1, p. 7 - 67 São Paulo: IEA (Dossiê Nordeste Seco), 1987.

ABBASPOUR, K. C. SWAT-CUP2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 2012. 103p.

ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, A.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. Vadose Zone Journal, v. 3, n. 4, p. 1340-1352, 2004.

ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the prealpine/alpine Thur watershed using SWAT. Journal of Hydrology, v. 333, p. 413-430, 2007.

AGUIAR, R.B. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, estado do Piauí: diagnóstico do município de Picos. Fortaleza: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2004.

ALBUQUERQUE JR., D. M. A Invenção do Nordeste e outras Arte. 2 ed. Recife: FJN, Ed. Massangana; São Paulo: Cortez, 2001, p. 340.

ALVES, J. M. B.; FERREIRA, F. F.; CAMPOS, J. N. B.; ASSIS, F. D. S. F.; SOUZA, E. B. D.; DURAN, B. J.; SERVAIN, J.; STUDART, T. M. C. Mecanismo atmosférico associado à ocorrência de precipitação intensa sobre o Nordeste do Brasil durante Janeiro de 2004. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 21, p. 56-76, 2006.

ANA – Agência Nacional de Águas. Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu/Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2014.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013.

ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, p. 1091-1102, 2013.

ARAÚJO, J. C. Gestão das águas de pequenos açudes na região semi-árida. In: MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; GALVAO, C. O.; PAZ, V. P. S. Campina Grande/PB. Instituto Nacional do Semiárido, 2011, p. 440.

ARNOLD, J. G.; KINITY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH, S. L. Input/Output Documentation Version 2012. Texas Water Resources Institute, 2012. 650p.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modelling and assessment Part I: model development. Journal of the American Water Resources Association, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

ARRUDA M.G.C.; CORRÊA, A.C.B. Compartimentação morfoestrutural como instrumento para reconstrução da evolução geomorfológica da borda sudeste da Bacia do Jatobá, Pernambuco. Anais... XII Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2018.

ASSINE, M. L. Bacia do Araripe. Boletim de Geociências, v. 15, n. 2, p. 371-389, 2007.

AYELE, G. T.; TESHALE, E. Z.; YU, B.; RUTHERFURD, I. D.; JEONG, J. Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. Water, v. 9, n. 10, p. 782-795, 2017.

BEVEN, K. J. Distributed modelling. In: ANDERSON, M. G.; BURT, T. P. (Eds), Hydrological Forecasting, Wiley, Chichester, UK. 405-435, 1985.

BEZERRA, N. F. Água no semi-árido nordestino: experiência e desafio – Desenvolvimento científico gestão das águas. In: Água e desenvolvimento sustentável do semi-árido. Fortaleza, 2002, p. 35 - 53.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Avaliação e adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (ISSP) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às condições climáticas do Estado de São Paulo. Bragantia, Campinas, v.64, n.4, p.695-705, 2005.

BRANDÃO, M. H. M. Índice de degradação ambiental na bacia hidrográfica do Rio do Peixe-PB. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Pós-Graduação em Geociências, 2005.

BRITO NEVES, B. B.; VAN SCHMUS, W. R.; KOZUCH, M.; SANTOS, E. J.; PETRONILHO, L. A Zona Tectônica Teixeira Terra Nova - ZTTTN – Fundamentos da Geologia Regional e Isotópica. Geologia USP, v. 5, n. 1, p. 57-80, 2005.

BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. International Journal of Climatology, v. 23, p. 200-213, 2017.

BROWN, L. C.; BARNWELL, T. O. The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual. Env. Res. Laboratory. US EPA, EPA /600/3-87/007, Athens, 1987. 189p.

CALIJURI, M. L.; MEIRA, A. D.; PRUSK, F. F. Geoprocessamento Aplicado aos Recursos Hídricos. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 27. Poços de Caldas, 1998. Cartografia, sensoriamento e geoprocessamento. Lavras: UFLA, SBEA, 1998, p. 200-225, 1998.

CAMPOS, J. N. B. Água, sociedade e natureza – Desenvolvimento Científico Gestão das Águas. In: Água e desenvolvimento sustentável do semi-árido. Fortaleza, 2002, p. 19-34.

CAMPOS, J. N. B. Um critério de seca agrícola e sua aplicação ao estado do Ceará. In: Boletim Técnico de Recursos Hídricos. In: Projeto Áridas: Uma estratégia para o desenvolvimento sustentável para o Nordeste. Coordenação Geral: Secretaria de Planejamento, Orçamento e Coordenação de Previdência da Republica. Brasília, 1994.

CAMPOS, J. N. Política de águas. In: CAMPOS, N.; STUDART, T. Gestão das águas. Porto Alegre: ABRH, 2003, p. 27 - 42.

CAMPOS, J. N.; STUDART, T. M. C. Secas no Nordeste do Brasil: origens, causas e soluções. Fortaleza: UFC, Centro de Tecnologia, 2005.

CARVALHO NETO, J.G. Simulação Hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados Com o Modelo SWAT. 2011. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB.

CARVALHO, F. H. Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro. Dissertação de Mestrado. Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2014. 154p.

CARVALHO, O. As secas e seus impactos. In: A questão da água no Nordeste. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos/Agência Nacional de Águas, Brasília: CGEE, p. 45-97, 2012.

CASTANY, G. Traité pratique des eaux souterraines. 2. ed. Paris: Dunod, 1967. 661p.

CASTRO, K. B. Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2013. 117p.

CAVALCANTI, C. V.; PESSOA, D. M. A Seca de 1979–1980: Uma avaliação pela fundação Joaquim Nabuco. Serie Estudos Sobre as Secas no Nordeste. Fortaleza: Banco do Nordeste; Recife: Fundação Joaquim Nabuco, 2002, 224 p.

CEARÁ. Atlas dos recursos hídricos subterrâneos do Ceará. Fortaleza: CPRM, 1999. CD-ROM.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. Plano estadual de recursos hídricos (PLANERH). Fortaleza: SRH, 2005.

CEBALLOS, A. et al. Soil-water behaviour of sandy soils under semi-arid conditions in the Duero Basin (Spain). Journal of Arid Environments, v. 51, p. 501-519, 2002.

COELHO, G. B. Análise e simulação do processo de transformação de chuva em vazão com suporte de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Dissertação de mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco Centro de Tecnologia e Geociências. Recife, 2006. 81p.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. Nível dos açudes. Disponível em: http://portal.cogerh.com.br. Acesso em: jul. 2018

CORDEIRO, W.; LUNA, R. M.; CORDEIRO, V. F.; CAVALCANTE, I. N. Águas subterrâneas nas bacias hidrográficas do Ceará. Fortaleza, 2009.

COSTA FILHO, W.D.; COSTA, W.D. Caracterização hidrogeológica do estado de Pernambuco. Anais.. 1st Joint World Congress on Groundwater, 2008.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Atlas digital de geologia e recursos minerais do Ceará. Fortaleza: CPRM, 2003. CD- ROM.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. CPRM. 2005. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/peixe_meta_A.pdf>. Acessado em:02 de Mai de 2018.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Programa de recenseamento de fontes de abastecimento por Água Subterrânea no Estado do Ceará Atlas dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Ceará. Fortaleza: CPRM, 1999. CD-ROM.

CPRM/UFC – Serviço Geológico do Brasil; Universidade Federal do Ceará. Projeto comportamento das bacias sedimentares da região semiárida do Nordeste brasileiro/hidrogeologia da porção oriental da bacia sedimentar do Araripe. Fortaleza: CPRM, 2005.

CPRM/UFCG – Serviço Geológico do Brasil; Universidade Federal de Campina Grande. Projeto comportamento das bacias sedimentares da região semiárida do Nordeste brasileiro/hidrogeologia da bacia sedimentar do Rio do Peixe. Fortaleza: CPRM, 2005.

CPRM/UFPE – Serviço Geológico do Brasil; Universidade Federal de Pernambuco. Projeto comportamento das bacias sedimentares da região semiárida do Nordeste brasileiro/hidrogeologia da bacia de Jatobá – Sistema Aquífero Tacaratu/Inajá. Fortaleza: CPRM, 2008.

CPRM/UFPE. Comportamento das bacias sedimentares da região semi-árida do nordeste brasileiro: hidrogeologia da Bacia Sedimentar do Jatobá: Sistema Aqüífero Tacaratu/Inajá – Meta B: Caracterização Geológica e Geométrica dos Aqüíferos. CPRM, 2007.

CRANDALL, R. Geografia, geologia, suprimento d'água, transporte e açudagem nos estados orientais do norte do Brasil – Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba. IFOCS. Serv. Geol. Série 1. Publicação 4. Rio de Janeiro, 1910.

CUNHA, A.P.M.A.; TOMASELLA, J.; RIBEIRO-NETO, G.G.; BROWN, M.; GARCIA, S.R.; BRITO, S.B.; CARVALHO, M.A. Changes in the spatial-temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. Atmospheric Science Letters, 19, e855, 2018.

DANTAS, J. C. Gestão da água, gestão da seca: a centralidade do açude no gerenciamento dos recursos hídricos do semiárido. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

DANTAS, J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. M.; VIANNA, P. C. G. Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. Geociências, v. 34, n. 4, p. 816-827, 2015.

DE FREITAS, M. W. D.; MUÑOZ, P.; DOS SANTOS, J. R.; ALVES, D. S. Land use and cover change modelling and scenarios in the Upper Uruguay Basin (Brazil). Ecological Modelling, v. 384, p. 128−144, 2018.

DE LIMA, O.A.L. Estruturas geoelétrica e hidroquímica do sistema aquífero cristalino da bacia do alto rio Curaçá, semi-árido da Bahia. Revista Brasileira de Geofísica, v.28, n.3, 2010.

DE MEDEIROS, I. C.; DA COSTA SILVA, J. F. C. B.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Run-off-erosion modelling and water balance in the Epitácio Pessoa Dam river basin, Paraíba State in Brazil. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 15, p. 1-14, 2018.

DNPM. Projeto avaliação hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe. Programa nacional de estudos dos distritos mineiros. Recife, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), distritos regionais Pernambuco e Ceará, 1996.

DNPM. Projeto avaliação hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe. Programa Nacional de Estudos dos Distritos Mineiros. Recife, Departamento Nacional da Produção Mineral, Distritos Regionais de Pernambuco e Ceará. 1996. 101p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 1999. 412p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema de Informação de Solos Brasileiros. Disponível em: <http://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 25 de jun. 2018.

FEITOSA, F.A.C. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. ver. e ampl., Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; DA PAZ, R. L.; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A. S. Índices para a quantificação da seca. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão- (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644; 244), 48 p., 2009.

FERRIGO, S. Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do lago Descoberto – DF. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014. 164p.

FONTENELE, S.B. Modelagem matemática da dinâmica de fluxo riacho aquífero na microbacia hidrográfica do riacho São José, região do cariri cearense. 2010. 99p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2010.

FREITAS, M. A. de S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semiáridas. Revista Tecnologia, p.84-95, 2005.

FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. C.; SANTIAGO, M. M. F. Water resources of Piauí and Ceará. In: Gaiser; Krol; Frischkorn; Araújo. (Org.). Global change and regional impacts. 1 ed. Berlin: Springer Verlag, v. 1, p. 87-94. 2003.

FUKUNAGA, D. C. Estimativa de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando o SWAT. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro – ES, 2012. 98p.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Redimensionamento da região semi-árida do Nordeste do Brasil. Fortaleza, 1993, 112 p.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Caracterização das bacias hidrográficas do estado do Ceará. Fortaleza, 2009.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Mapeamento dos espelhos d'água do Brasil. Fortaleza: FUNCEME, 2008.

GALVÍNCIO, J.D.; SOUSA, F.A.S.; SRINIVASAN, V.S. Balanço hídrico à superfície da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 11, n. 3, p. 135–146, 2006.

GASSMAN, P.W; REYES, M.R; GREEN, C.H.; ARNOLD, J.G. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GEORGE, C.; LEON, L.F. WaterBase: SWAT in an open source GIS. The Open Hydrology Journal. Bentham Science Publishers Ltd., p.1-6, 2008.

GOMES, N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, M.; BESKOW, S. Aplicabilidade do LISEM (Limburg soil erosion) para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica tropical. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 2483-2492, 2008.

GÜNTNER, A. Large-scale hydrological modeling in the semi-arid North-East of Brazil. 2002. Tese (Doutorado) - Instituto de Geoecologia, Universidade de Potsdam, Alemanha. 2002.

GUTIÉRREZ, A.P.A.; ENGLE, N.L.; DE NYS, E.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E.S. Drought preparedness in Brazil. Weather and Climate Extremes, 3, 95-106, 2014.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrological cycle. Transactions of the American Geophysical Union, v. 14, p. 446-460, 1933.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. Censo demográfico 2010. Resultados preliminares do universo. Rio de Janeiro: 2011.

KEMANIAN, A. R.; JULICH, S.; MANORANJAN, V. S.; ARNOLD, J. G. Integrating soil carbon cycling with that of nitrogen and phosphorus in the watershed model SWAT: Theory and model testing. Ecological Modelling, v. 222, n. 12, p. 1913-1921, 2011.

KEYANTASH, J.; DRACUP, J. A. The quantification of drought: An evaluation of drought indices. Bulletim of the American Meteorological Society. 83(8): p.1167-1180, 2002.

KNISEL, W. G. CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. Conservation Research Report No. 26. Washington, D.C.: USDA, 1980.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of "Goodness-of-Fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, v. 35, p. 233-241, 1999.

LEONARD, R. A., KNISEL, W. G.; STILL, D. A. GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. Transactions of the ASABE, v. 30, n. 5, p. 1403-1418, 1987.

LIMA FILHO, M. Evolução tectono-sedimentar da Bacia do Rio do Peixe – PB. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1991.

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E.; STEDINGER, J. R.; DIJKMAN, J. P. M.; VILLARS, M. T. Walter resources systems planning management: An introduction to methods, models and applications. UNESCO. Paris, 2005.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Piracicaba. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2002. 152p.

MARÇAL, N.A.; DA SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; DOS SANTOS, J.S. Analysis of the environmental thermal comfort conditions in public squares in the semiarid region of northeastern Brazil. Building and Environment, v. 152, p. 145-159, 2019.

MARTIN, P. H.; LEBOEUF, E. J.; DOBBINS, J. P.; DANIEL, E. B.; ABKOWITZ, M. D. Interfacing GIS with water resource models: A state-of-the-art review. Journal of the American Water Resources Association, v. 41, n. 6, p. 1471-1487, 2005.

MARTINS, E.; BRONSTERT, A. Seasonal drought prediction for semiarid northeast Brazil: About the added value of a process-based hydrological model. Hydrology and Earth Systems Science Discussion, 2018. https://doi.org/10.5194/hess-2018-404

McKEE, T.; DOESKEN, N.; KLEIST, J. Drought monitoring with multiple time scales. Anais… IX Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society. Boston, p. 233-236, 1995.

MEDEIROS, G.C.S.; Maia, A.G.; DE MEDEIROS, J.D.F. Seca hidrológica: uma abordagem sob a perspectiva da demanda hídrica. Anais... XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Maceió: ABRH, 2016.

MELO NETO, J. O. DA SILVA, A. M.; DE MELLO, C. R.; MELLO JÚNIOR, A. V. Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 1, p. 177-188, 2014.

MELO, H. A.; CUNHA, J. B. L.; NÓBREGA, R. L. B.; RUFINO; I. A. A.; GALVÃO, C. O. Modelos hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica (SIG): Integração possível. IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Salvador: ABRH, 2008.

MELO, J. C. O fenômeno El Niño e as secas no Nordeste do Brasil. Raízes, v. 20, p. 13-21, 1999.

MI – Ministério da Integração Nacional. Relatório final grupo de trabalho interministerial para redelimitação do semi-árido nordestino e do polígono das secas. Brasília, 2005.

MONTE-MOR, R. C. A. Análise de processos hidrológicos em bacias de rio intermitentes no semiárido mineiro. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio ambiente e Recursos hídricos, 2012.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semiarid regions: A case study from North Eastern Brazil. Journal of Hydrology, v. 434-435, 55 68, 2012.

MORAIS, F.; MELO, J. G. DE; MEDEIROS, J. I. DE; SRIVASTAVA, N. K.; DINIZ FILHO, J. B.; LOPES, V. L.; OLIVEIRA, J. A. DE; VASCONCELOS, M. B. Comportamento das bacias sedimentares da região semiárida do Nordeste brasileiro. Avaliação do aquífero Açu na borda sul da bacia Potiguar – Trecho: Upanema Afonso Bezerra. Recife: CPRM/FINEP, 2005. 82 p.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NASCIMENTO, J. M.; FRADE, T. G.; GADELHA , C. T.; SILVA, R. M. (2018). Efeitos de cenários de uso da terra na produção de sedimentos no semiárido do Nordeste: o caso da bacia do Rio do Peixe – PB. Anais.. XIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, ABRH, Vitória, ES.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service. Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, 2011. 647p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIANS, J. R. Soil And Water Assessment Tool – Input/Output File Documentation. Temple: Blackland. Research Center, Soil and Water Research Laboratory, 2012. 541p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. R.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS; J. J. Soil and water assessment tool: theoretical documentation – version 2005. Texas USA, 2005. 525p.

NOBRE, P. Origens das Águas no Nordeste. In: A Questão da Água no Nordeste / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. Brasília: CGEE, p. 31-43, 2012.

NRCS – Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbook. United States Department of Agriculture, 2007.

OLIVERA, F.; VALENZUELA, M.; SRINIVASAN, R.; CHOI, J.; CHO, H.; KOKA, S.; AGRAWAL, A. ArcGIS-SWAT: A geodata model and GIS interface for SWAT. Journal of the American Water Resources Association, v. 42, n. 2, p. 295-309, 2006.

PAIVA, A. L. R.; CABRAL, J. J. S. P.; AZEVEDO, J. R. G.; QUEIROZ, K. C.; PINHEIRO, R. B. Noções básicas de hidrologia e hidrometria. In: AZEVEDO, J.R.G. Hidrometria aplicada à gestão dos recursos hídricos. Ed. Universitária: Recife, p. 15-64, 2010.

PAULO, A. A.; PEREIRA, L. S. Drought concepts and characterization: comparing drought index applied at and regional scales. Water International, v. 31, n. 1, p. 31-37, 2006.

PIRES, V. Frequência e Intensidade de Fenômenos meteorológicos extremos associados a precipitação. Dissertação de Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra, Lisboa, pp.98. 2003.

QUIRING, S.M. Developing Objective Operational Definitions for Monitoring Drought. Journal Applied Meteorology and Climatology, v.48, p.1217–1229, 2009.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K .E. Estimation of soil water properties. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, v. 25, n. 5, p. 1316-1328, 1982.

REBOUÇAS, A. C. A política nacional de recursos hídricos e as águas subterrâneas. Revista Águas Subterrâneas, n. 16, p. 21-29, 2002.

REBOUÇAS, A. C. Águas subterrâneas. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B; TUNDISI, J. G. (Orgs.). Águas Doces no Brasil, 3. ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006, p. 111-144.

REBOUÇAS, A. C.; MARINHO, M. E. Hidrologia das secas: Nordeste do Brasil. Recife: SUDENE, 1972. 126p. SUDENE Hidrologia, 40.

REDMOND, K. T. The depiction of drought: a commentary. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 83, p.1143–1147, 2002.

RIBEIRO, S.C. Etnogeomorfologia sertaneja: proposta metodológica para a classificação das paisagens da sub-bacia do rio Salgado/CE. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: UFRJ/PPGG, 2012. 284 p.

ROCHA, E. O. de. Estudo ambiental integrado de processos hidrossedimentológicos e nutrientes na bacia hidrográfica do rio Piranga utilizando o SWAT. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

SALTER, P. J.; WILLIAMS, J. B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. IV: A method of estimating the available-water capacities of profiles in the field. Journal of Soil Science, v. 18, n. 1, p. 174-181, 1967.

SANTIAGO, M. M. F.; REBOUÇAS, A. C; FRISCHKORN, H. Modelos de Balanço Isotópico e Químico para Avaliação de Perdas de Água por Evaporação de Fluxo

Subterrâneo de Açudes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4., 1986, Brasília. Anais... Brasília, 1994.

SANTOS CAG, BRASIL NETO R, DA SILVA, RM, COSTA S (2019a) Cluster Analysis Applied to Spatiotemporal Variability of Monthly Precipitation over Paraíba State Using Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Data. Remote Sensing, v. 11, n. 6, p. 637-655.

SANTOS CAG, BRASIL NETO R, SILVA RM, DOS SANTOS D (2019b) Innovative approach for geospatial drought severity classification: a case study of Paraíba state, Brazil. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 33(2), 545-562.

SANTOS, C. A. G. Apostila de Hidrologia Aplicada. Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, 2007.

SANTOS, C. A. G. Runoff-erosion process modeling and determination of model parameters. Dissertação de Mestrado, Ehime University, Japão, 1994.

SANTOS, C. A. G.; BRASIL NETO, R. M.; SANTOS, D. C.; SILVA, R. M. Innovative approach for geospatial drought severity classification: a case study of Paraíba state, Brazil. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, v. 65, n. 12, p. 1-18, 2018.

SANTOS, J.Y.G. Implicações das mudanças do clima e uso do solo nos processos hidrossedimentológicos da bacia do rio Tapacurá. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

SANTOS, R. C. Classificação textural aplicada à cobertura do solo de uma bacia hidrográfica usando sensoriamento remoto. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002. 153p.

SANTOS, R. S. Avaliação da relação seca/produtividde agrícola considerando cenários de mudanças climáticas. Dissertação de Mestrado em Meteorologia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa- Minas Gerais, Brasil. 109 p., 2008.

SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 70, p. 1569-1578, 2006.

SILVA, A.R.C.; SCARDIA, G. Análise estratigráfica das bacias sedimentares do Iguatu, Ceará. Holos Environment, Suplemento - IX Encontro de Pós Graduação em Geociências e Meio Ambiente, 2006

SILVA, G.M.; PEREIRA, L.C.L.; DE ARAÚJO, L.H.A.; DE MELO, A.R.C.; FREITAS, W.R.A.; DE LIMA FILHO, M.F. Mapeamento geológico da bacia de Mirandiba: novas considerações sobre sua estratigrafia. Anais.. 27 Simpósio de Geologia do Nordeste, 2010.

SILVA, R. M.; DANTAS, J. C.; BELTRAO, J. A.; SANTOS, C. A. G. Hydrological simulation in a tropical humid basin in the Cerrado biome using the SWAT model. Hydrology Research, v. 49, p. 908-923, 2018.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; DOS SANTOS, J. Y. G. Evaluation and modeling of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid region of Brazil. International Journal of Sediment Research, v. 33, p. 117-125, 2018.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; MARANHÃO, K. U. A.; SILVA, A. M.; LIMA, V. R. P. Geospatial assessment of eco-environmental changes in desertification area of the Brazilian semi-arid region. Earth Sciences Research Journal, v. 22, n.3, p. 175-186, 2018.

SOUZA, A.; ALBUQUERQUE, B. F. C.; LOPES, T. C. S. P. L. Um estudo do índice de Bhalme e Mooley – IBM (Bhalme E Mooley, 1980); Índice de anomalia de chuva – IAC (Rooy,1965) Para O Estado De Mato Grosso Do Sul. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia – Rio de Janeiro. p. 1250-1258. Anais,..., Rio de Janeiro, 2000.

SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Delimitação do Semiárido. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2017.

SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Plano de aproveitamento integrado de recursos hídricos do Nordeste do Brasil: Estudos climatológicos. Recife, v. 2, 1980. 130p.

TINOCO, I. M.; MABESOONE, J. M. Observações peocológicas sobre as bacias mesozoicas de Igatu, Rio do peixe e intermediárias. Anais... Simpósio de Geologia do Nordeste, 7, Fortalea, p. 95-107, 1975.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4ª ed. Porto Alegre: ABRH, 2009. 943p.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre: Ed. da UFRGS e ABRH, 1998.

TUCCI, E. M. C.; CABRAL, J. J. S. P. Qualidade da água subterrânea. Prospecção tecnológica: Recursos Hídricos. Brasília: CGEE, 2003. 53p.

TUNDISI, J. G. Água no Século XXI: enfrentando a escassez. São Carlos: RiMa. 2003. 246p.

UFPE/CPRM/FINEP. Hidrogeologia da Bacia Sedimentar do Jatobá: Sistema Aquífero Tacaratu/Inajá. In: Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semiárida do Nordeste Brasileiro. Recife: UFPE/CPRM/FINEP, 2007.

USACE – United States Army Corps of Engineers Geospatial hydrologic modeling extension: HEC-GeoHMS: User's manual. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Report CPD-77, 2009.

UZEIKA, T. Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. Dissertação de Mestrado, Instituto de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 130p.

VERÍSSIMO, L.S.; CAVALCANTE, I.N.; AGUIAR, R.B.; MAIA, J.T.V. Recursos hídricos subterrâneos da Bacia Sedimentar do Araripe – zona leste, estado do Ceará. Anais... I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste, São Paulo: ABAS, 2007.

WILHITE, D. A. The enigma of drought. In: Drought assessment, management ad planning: theory and case studies, WHILHITE, D. A. (Ed.) Boston, London: Kluwer Academia Publishers, 1993. 291p.

WILHITE, D. Metodologia para o planejamento das ações no combate aos efeitos da seca. Recife: SUDENE, 1999, 91p.

WILHITE, D.A. Drought as a natural hazard: conceptions and definitions. In: WILHITE, D. A. Drought: a global assessment. London: Routledge, p. 3-18. 2000.

WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P. T. The EPIC model and its application. In: Symposium on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer, p. 111-121, 1984.

WILLIAMS, J. R; NICKS, A. D.; ARNOLD, J. G. Simulator for water resources in rural watershed. Journal of Hydraulic Engineering, v. 111, n. 6, p. 970-986, 1985.

WORKU, T.; KHARE, D.; TRIPATHI, S.K. Modeling runoff–sediment response to land use/land cover changes using integrated GIS and SWAT model in the Beressa watershed. Environmental Earth Sciences, v. 76, n. 16, p. 550-568, 2017.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - (WMO). Drought and agriculture. Geneva, Switzerland: WMO, 1975. 127 p. (Tech. Note 138, Publ. WMO - 392).

YESUF, H. M.; ASSEN, M.; ALAMIREW, T.; MELESSE, A. M. Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia. Catena, v. 127, p. 191-205, 2015.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil – past, present, and future. Theoretical and Applied Climatology, v. 129, n. 3–4, p. 1189–1200, 2017.

MARENGO, J.A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 90, n. 2 (suppl. 1), p. 1973-1985, 2018.

LOPES, H. L.; CABRAL, J, J. S. P.; ARAÚJO FILHO, J. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Mapeamento de áreas aluvionares no semiárido brasileiro por meio de dados colaterais e imagens orbitais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, p. 763-769, 2013.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, V. P.; SILVA, J. G.; ANDRADE, A.; MARINHO, I. S. Uso da água subterrânea salina em halófitas no semi-árido. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n.2, p. 75-84, 2003.

ANDRADE, T. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; RODRIGUES, D. F. B. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, p. 496-504, 2012.

REIS, A. F. C. Orientação e magnitude de tensões na Bacia Potiguar. Implicações para evolução de bacias em margens passivas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-

graduação em Geodinâmica e Geofísica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; MARANHÃO, K. U. A.; SILVA, A. M.; LIMA, V. R. P. Geospatial assessment of eco-environmental changes in desertification area of the Brazilian semi-arid region. Earth Sciences Research Journal, v. 22, n. 4, p. 175-186, 2018.

SANTOS, C. A. G.; BRASIL NETO, R. M.; SILVA, R. M.; DOS SANTOS, D. Innovative approach for geospatial drought severity classification: a case study of Paraíba state, Brazil. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, v. 33, n. 2, p. 545-562, 2019.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. Comitê da Bacia Hidrográfica do Salgado. Disponível em: http://portal.cogerh.com.br/comite-da-bacia-hidrografica-do-salgado. Acesso em: jun. de 2019.

DANTAS, J. C.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Drought impacts, social organization and public policies in northeastern Brazil: A case study of the Upper Paraíba River basin. Environmental Monitoring and Assessment, v. 192, p. 765-785, 2020.

TORRES, R.R.; LAPOLA, D.M.; GAMARRA, N.L.R. Future Climate Change in the Caatinga. In: Silva JMC, Leal IR, Tabarelli M (eds) Caatinga. Springer, Cham., 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_15

VIANA, J.S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, R. SWAT parameterization for identification of critical erosion watersheds in the Pirapama River basin, Brazil. Journal of Urban and Environmental Engineering, v. 13, p. 42-58, 2019.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. Estudos Avançados, v.22, n.63, 2008. https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200005