



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM HIDROGEOLOGIA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RAFAEL ROLIM DE SOUSA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA
VULNERABILIDADE NATURAL DE AQUÍFERO, APLICADO NA PORÇÃO
ORIENTAL DA BACIA SEDIMENTAR DO PARNAÍBA NO MUNICÍPIO DE
TIANGUÁ - CEARÁ**

Fortaleza - Ceará

2016

RAFAEL ROLIM DE SOUSA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA
VULNERABILIDADE NATURAL DE AQUÍFERO, APLICADO NA PORÇÃO ORIENTAL
DA BACIA SEDIMENTAR DO PARNAÍBA NO MUNICÍPIO DE TIANGUÁ - CEARÁ

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Departamento de Geologia do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Geologia. Área de Concentração: Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental.

Orientador: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante.

Co-Orientador: Dr. Mickaelon Belchior Vasconcelos.

FORTALEZA
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- S698e Sousa, Rafael Rolim de.
Estudo comparativo entre métodos de avaliação da vulnerabilidade natural de aquífero, aplicado na porção oriental da bacia sedimentar do Parnaíba no município de Tianguá – Ceará / Rafael Rolim de Sousa. – 2016.
137 f.: il. color.; enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2016.
Área de Concentração: Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental.
Orientação: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante.
Coorientação: Prof. Dr. Mickaelon Belchior Vasconcelos.
1. Geologia. 2. Aquíferos. 3. Vulnerabilidade. I. Título.

RAFAEL ROLIM DE SOUSA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA
VULNERABILIDADE NATURAL DE AQUÍFERO, APLICADO NA PORÇÃO ORIENTAL
DA BACIA SEDIMENTAR DO PARNAÍBA NO MUNICÍPIO DE TIANGUÁ - CEARÁ

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Departamento de Geologia do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Geologia. Área de Concentração: Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental.

Aprovado em: _____ / _____ / _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Enéas Oliveira Lousada
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Francisco Maurício de Sá Barreto
Instituto Federal do Ceará

A Deus.

A minha esposa, Ticiania.

As minhas filhas, Letícia e Alice.

AGRADECIMENTOS

À CPRM, pela liberação parcial de minhas atividades dentro da empresa e pela ajuda financeira.

Ao Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante, pela orientação,

Aos Professores participantes da banca examinadora Dr. Enéas Oliveira Lousada e DR. Francisco Maurício de Sá Barreto por suas colaborações.

Ao meu chefe Jaime Quintas, por sua ajuda e compreensão nos momentos de necessidades.

Aos amigos de trabalho Cláudio Cajazeiras, Francisco Pessoa, Liano Verissimo, Mickaelon Belchior, Robério Boto, pela ajuda e contribuição.

RESUMO

Quando se aborda sobre água subterrânea se deve atentar para a vulnerabilidade dos aquíferos, pois são nestes que ocorrem o transporte, armazenamento e onde ocorre, de alguma forma, proteção maior ou menor aos contaminantes de diferentes tipos de fontes. Desta forma, é de suma importância a caracterização hidrogeológica dos aquíferos, visando o conhecimento de seus limites e quais áreas são mais susceptíveis à contaminação, seja por fatores naturais ou antrópicos. Levando em consideração estes aspectos, o presente trabalho aplicou e comparou na porção do aquífero Serra Grande, localizada no município de Tianguá, os modelos de avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação DRASTIC, AVI, GOD e GODs. Além da comparação entre os modelos de vulnerabilidade, a proposta deste trabalho teve como finalidade, relacionar o modelo escolhido com as análises de nitrato e com o uso e ocupação do solo. Os resultados demonstraram que o DRASTIC foi o modelo que melhor se ajustou à área estudada. Com esta comparação foi possível observar que, a diferença existente em cada resultado, está atrelada a resolução e escala de trabalho, ou seja, a primeira está diretamente ligada à quantidade de parâmetros analisados e, a segunda, ao tamanho da área a ser estudada. Desta maneira, a aplicação do modelo DRASTIC para áreas com dimensões menores e, no caso deste estudo, com apenas um tipo de litologia, apresentou um nível de detalhamento maior que os demais modelos. Os índices encontrados para o modelo DRASTIC variaram de 90 a 176 que, por sua vez, foram divididos nas classes: insignificante, muito baixa, baixa, moderada e alta. Os resultados encontrados para nitrato mostraram que 96,3% das análises ficaram abaixo do valor máximo permitido, não devendo, as mesmas, serem desconsideradas, pois estas concentrações estão associadas ao intenso uso de fertilizantes nitrogenados, ressalta-se ainda que 77,8% dos poços analisados estão localizados nas áreas desmatadas para práticas agrícolas. A integração destas informações gerou um mapa da relação entre o modelo DRASTIC e o uso e ocupação do solo que, por sua vez, tem a finalidade de auxiliar os gestores e a sociedade a estabelecer programas mais eficientes de uso e ocupação do solo, garantindo assim maior proteção aos aquíferos. O resultado desta integração mostrou que as melhores regiões com disponibilidades para a ocupação são aquelas classificadas com vulnerabilidade baixa, pois apresentam certa distância às margens dos rios e estão associadas a relevos suavemente ondulados. Por sua vez, as áreas com vulnerabilidade insignificante a muito baixa estão associadas a relevos ondulados a montanhosos, o que dificultaria a ocupação do território. Por outro lado, as zonas de vulnerabilidade moderada e alta deveriam ser aquelas com

menor índice de ocupação, mas por estarem associadas a feições geomorfológicas mais aplainadas apresentam alto índice de ocupação, seja ela por urbanização ou zonas agricultáveis.

Palavras-chave: Vulnerabilidade. Aquífero. Tianguá.

ABSTRACT

When talk about groundwater it must to attempt to the aquifers vulnerability, cause where occur transport, storage and it register, more or less contaminant protection to different types of sources. Thus, it is important hydrogeological characterization of aquifers, to know the limits and areas which are more susceptible to contamination by natural or anthropogenic factors. Considering these aspects, this study compared the DRASTIC, AVI, GOD and GODS natural vulnerability evaluation models of the aquifer contamination, into the Serra Grande Aquifer, corresponding to Tianguá country. Beyond the comparison between the vulnerability models, the purpose of this study is to relate the chosen model with the nitrate analysis and the use and land occupation. The result of the comparison between models showed that the best model applied in studied area was DRASTIC. Through this comparison was observed that the results differences are related to work resolution and scale, where the first is directly linked to the amount of parameters analyzed and, second, the size area to be studied. Thus, the application of DRASTIC model for small areas and, like his case study, with only one type of lithology, demonstrated a level of detail greater than the other models. The indexes found for DRASTIC model ranged from 90 to 176 and they were divided in the classes: insignificant, very low, low, moderate and high. The results showed to 96.3% for nitrate that analyzes are below the maximum allowed value. This value should not be disregarded because these concentrations are associated with intensive use of nitrogenous fertilizers, moreover, 77.8% of analyzed wells are in deforested areas to agricultural practices. The integration of this information has generated a map of the relationship between the DRASTIC model and use and land occupation which, is intended to assist managers and society to establish efficient of land use and occupation, thus ensuring greater protection for aquifers. The result of this integration has shown that the best regions with availability for the occupation are those classified with low vulnerability, because they present some distance along the riverbanks and are associated with gently undulating reliefs. Areas with very low to negligible vulnerability are associated with undulating and mountainous reliefs, making it difficult to occupation of the territory. The high and moderate vulnerability zones should be those with lower occupancy rates to be associated with planed geomorphological features, however have a high rate of occupation, be it by urbanization or arable areas.

Keywords: Vulnerability. Aquifer. Tianguá.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área de pesquisa dentro do município de Tianguá.	24
Figura 2 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.	40
Figura 3 - Atributos/índices/parâmetros utilizados para a determinação da Vulnerabilidade utilizando o método GOD.....	41
Figura 4 - Desenvolvimento e consequência do fluxo preferencial da zona vadosa.	41
Figura 5 - Caracterização da componente S de acordo com sua textura.	42
Figura 6 - Situação das obras de captação de água na área de estudo cadastradas no SIAGAS.	45
Figura 7 - Distribuição dos poços com perfis litológicos.....	45
Figura 8 - Médias históricas anuais regionais para o período de 1977 a 2006.....	57
Figura 9 - Mapa pluviométrico da área de estudo para o ano de 2014.....	58
Figura 10 - Série pluviométrica histórica da área de estudo - Sede.	59
Figura 11 - Série pluviométrica histórica da área de estudo - Pindoguába.	59
Figura 12 - Mapa de solos da área de estudo de acordo com o novo SiBCS.	61
Figura 13 - Mapa de subclasses de solos da área de estudo.	62
Figura 14 - Mapa de ocorrência da vegetação na área de pesquisa.	64
Figura 15 - Unidades geotectônicas da Província Parnaíba.	65
Figura 16 - Coluna estratigráfico do Grupo Serra Grande.	67
Figura 17 - Cadastramento em campo dos pontos de captação de água na área de estudo.	68
Figura 18 - Situação dos pontos de captação de água pertencentes à área de estudo, referentes a etapa de campo (novembro, 2014) e SIAGAS (janeiro, 2016).....	69
Figura 19 - Distribuição espacial dos 136 poços na área de estudo.	70
Figura 20 - Potenciometria simplificada para a área de estudo, referente ao mês de novembro/2014.	72
Figura 21 - Drenagem para correção da potenciometria pertencente a área de estudo.	74
Figura 22 - Mapa Potenciométrico da área de estudo.	75
Figura 23 - Zonas de recarga da área de estudo.	76
Figura 24 - MDT da área de estudo.....	77
Figura 25 - Nível estático da área de estudo.....	78
Figura 26 - Classificação DRASTIC para o nível estático da área de estudo.	79
Figura 27 - Estrato do balanço Hídrico mensal para a sede municipal de Tianguá, referente ao período de 1912 a 2014.....	80

Figura 28 - Deficiência, Excedente, Retirada e Reposição Hídrica para a sede municipal de Tianguá, referente ao período de 1912 a 2014.....	81
Figura 29 - Balanço hídrico médio mensal para a sede municipal de Tianguá, referente ao período de 1912 a 2014.....	81
Figura 30 - Estrato do balanço hídrico mensal para o distrito de Pindoguába, referente ao período de 1994 a 2014.....	83
Figura 31 - Deficiência, Excedente, Retirada e Reposição Hídrica para o distrito de Pindoguába, referente ao período de 1994 a 2014.....	83
Figura 32 - Balanço hídrico médio mensal para o distrito de Pindoguába, referente ao período de 1994 a 2014.....	84
Figura 33 - Recarga efetiva na área de estudo.....	84
Figura 34 - Classificação DRASTIC para recarga na área de estudo.....	85
Figura 35 - Distribuição dos poços com perfil descritivos na área de estudo.	86
Figura 36 - Perfil litológico da área de estudo.	89
Figura 37 - Classificação DRASTIC para solos na área de estudo.	91
Figura 38 - Classificação DRASTIC para topografia na área de estudo.....	92
Figura 39 - Mapa de vulnerabilidade DRASTIC para a área de estudo.....	98
Figura 40 - Mapa de vulnerabilidade AVI para a área de estudo.....	102
Figura 41 - Classificação GOD para distância até o lençol freático para a área de estudo. ...	104
Figura 42 - Mapa de vulnerabilidade GOD para a área de estudo.	107
Figura 43 - Classificação GODS para solos da área de estudo.	109
Figura 44 - Mapa de vulnerabilidade GODS para a área de estudo.	112
Figura 45 - Pontos de captação de água utilizados neste trabalho, referentes à área de estudo.	113
Figura 46 - Mapa da distribuição dos pontos de captação de água com suas respectivas concentrações de N-NO ₃ ⁻ (ml/L) na área de estudo.....	115
Figura 47 - Concentrações de N-NO ₃ ⁻ na área de estudo para o mês de novembro de 2014.	116
Figura 48 - Análise comparativa entre as amostras de BARRETO (2006) e O AUTOR.....	117
Figura 49 - Mapa da relação entre a vulnerabilidade DRASTIC e o uso e ocupação do solo.	126

LISTA DE FOTOS

Foto 1 - Coleta de amostra para análise de nitrato.	53
Foto 2 - Fotômetro NOVA 60.	54
Foto 3 - Material utilizado no preparo das amostras para análise de nitrato.	54
Foto 4 - Reagente NO_3^{-1} e NO_3^{-2} utilizados durante o preparo das amostras.	55
Foto 5 - Vegetação do tipo mata úmida serrana.	63
Foto 6 - Vegetação do tipo carrasco.	64
Foto 7 - Localização dos poços 9b (BARRETO, 2006) e P-28 (O AUTOR) e sua ocupação territorial.	118
Foto 8 - Localização dos poços 9b (BARRETO, 2006) e P-28 (O AUTOR) e sua ocupação territorial.	118
Foto 9 - Localização dos poços 12 (BARRETO, 2006) e EX-11 (SOUSA, 2015) e sua ocupação territorial.	119
Foto 10 - Localização dos poços 12 (BARRETO, 2006) e EX-11 (SOUSA, 2015) e sua ocupação territorial.	119
Foto 11 - Localização dos poços 2a (BARRETO, 2006) e P-20 (SOUSA, 2015) e sua ocupação territorial.	120
Foto 12 - Localização dos poços 2a (BARRETO, 2006) e P-20 (SOUSA, 2015) e sua ocupação territorial.	120
Foto 13 - Localização dos poços 20 (BARRETO, 2006) e EX-19 (SOUSA, 2015) e sua ocupação territorial.	121
Foto 14 - Localização dos poços 20 (BARRETO, 2006) e EX-19 (SOUSA, 2015) e sua ocupação territorial.	121
Foto 15 - Localização do poço EX-26.	122
Foto 16 - Localização do poço EX-18, comunidade Sítio Lajes.	123
Foto 17 - Cemitério (Próximo ao Sítio Pitanguinha).	130
Foto 18 - Cemitério (Curuati).	130
Foto 19 - Cemitério (São João).	130
Foto 20 - Cemitério (Aroeira).	130
Foto 21 - Cemitério (Tucúns).	130
Foto 22 - Cemitério (Córrego).	130

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais métodos para determinar a vulnerabilidade à poluição de aquíferos.	26
Quadro 2 - Descrição dos parâmetros utilizados pelo método DRASTIC com seus respectivos índices de ponderação.	33
Quadro 3 - Intervalos de profundidade e seus valores de classificação.	33
Quadro 4 - Intervalos de recarga e seus valores de classificação.	34
Quadro 5 - Litologia do aquífero e seus intervalos.	35
Quadro 6 - Tipo de solos e seus valores de classificação.	35
Quadro 7 - Intervalos de declividade e seus valores de classificação.	36
Quadro 8 - Classificação do impacto da zona vadosa e seus intervalos.	36
Quadro 9 - Classificação da condutividade hidráulica e seus intervalos.	37
Quadro 10 - Classificação DRASTIC.	37
Quadro 11 - Relação entre vulnerabilidade e resistência hidráulica.	38
Quadro 12 - Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade do aquífero a contaminação.	39
Quadro 13 - Parâmetros de caracterização para o método GOD.	39
Quadro 14 - Definição prática das classes de vulnerabilidade do aquífero.	43
Quadro 15 - Condutividade hidráulica da área de estudo.	49
Quadro 16 - Condutividade hidráulica média para o método AVI aplicado à área de estudo.	50
Quadro 17 - Valores de transmissividade e condutividade hidráulica.	51
Quadro 18 - Cargas hidráulicas dos pontos amostrados.	73
Quadro 19 - Perfil litológicos dos poços pertencentes à área de estudo.	87
Quadro 20 - Parâmetros DRASTIC e seus índices para a área de estudo.	94
Quadro 21 - Nível de importância dos parâmetros D, R, A, S, T, I, e C.	95
Quadro 22 - Índice de vulnerabilidade DRASTIC para a área de estudo.	96
Quadro 23 - Índice de vulnerabilidade AVI para a área de estudo.	100
Quadro 24 - Nível de importância dos parâmetros G, O, D.	105
Quadro 25 - Índice de vulnerabilidade GOD para a área de estudo.	106
Quadro 26 - Nível de importância dos parâmetros G, O, D, S.	109
Quadro 27 - Índice de vulnerabilidade GODS para a área de estudo.	110
Quadro 28 - Pontos de captação de água selecionados para análise de nitrato.	114

Quadro 29 - Análises pontuais de nitrato e suas respectivas áreas de vulnerabilidade	
DRASTIC.....	125
Quadro 30 - Uso e ocupação do solo com seus respectivos índices de vulnerabilidade	
DRASTIC para a área de estudo.	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores referentes aos cálculos de balanço para a Estação Pluviométrica 340030 (Período de 1912 a 2014), localizada na sede municipal de Tianguá.	80
Tabela 2 - Valores referentes aos cálculos de balanço para a Estação Pluviométrica 341033 (Período de 1994 a 2014) localiza no distrito de Pindoguába.	82

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
1.1.	Justificativa	21
1.2.	Objetivo	23
1.2.1.	<i>Objetivos específicos</i>	23
2.	LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	24
3.	ESTADO DA ARTE SOBRE VULNERABILIDADE DE AQUÍFERO	25
3.1.	REVISÃO SOBRE VULNERABILIDADE DE AQUÍFERO	25
3.2.	Risco à contaminação	29
3.3.	Mapeamento e modelos para a vulnerabilidade de aquíferos	30
3.4.	Modelos utilizados no trabalho	32
3.4.1.	<i>DRASTIC</i>	33
3.4.2.	<i>AVI</i>	38
3.4.3.	<i>GOD e GODS</i>	38
4.	MÉTODOS E MATERIAIS DA PESQUISA	44
4.1.	Levantamento bibliográfico	44
4.2.	Levantamento dos poços pré-existentes da área de estudo	44
4.3.	Cadastramento adicional de poços	45
4.4.	Determinação dos parâmetros DRASTIC	46
4.4.1.	<i>Profundidade do nível estático - (D)</i>	46
4.4.2.	<i>Recarga - (R)</i>	47
4.4.3.	<i>Litologia do aquífero - (A)</i>	48
4.4.4.	<i>Solo - (S)</i>	48
4.4.5.	<i>Topografia - (T)</i>	48
4.4.6.	<i>Impacto sobre a zona vadosa - (I)</i>	49
4.4.7.	<i>Condutividade hidráulica - (C)</i>	49
4.5.	Determinação dos parâmetros AVI	50
4.5.1.	<i>Espessura da zona não saturada (di)</i>	50
4.5.2.	<i>Condutividade hidráulica estimada (Ki)</i>	50
4.6.	Determinação dos parâmetros para GOD e GODS	51
4.6.1.	<i>Grau de confinamento da água subterrânea</i>	51
4.6.2.	<i>Ocorrência de estratos de cobertura</i>	51

4.6.3.	<i>Distância até o lençol freático</i>	51
4.6.4.	<i>Determinação do tipo de cobertura do solo</i>	52
4.7.	Comparação entre os modelos de vulnerabilidade	52
4.8.	Seleção dos poços para análise de nitrato	52
4.9.	Coleta de amostras e determinação de nitrato	53
4.10.	Uso e ocupação do solo	55
5.	CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTAIS	56
5.1.	Precipitação.....	56
5.2.	Geomorfologia	59
5.3.	Solos	60
5.4.	Vegetação	63
6.	GEOLOGIA REGIONAL	65
6.1.	Embasamento Cristalino	66
6.2.	Grupo Serra Grande	66
6.2.1.	<i>Formação Ipú</i>	67
6.2.2.	<i>Formação Tianguá</i>	67
6.2.3.	<i>Formação Jaicós</i>	67
7.	RECURSOS HÍDRICOS.....	68
7.1.	Águas Superficiais	68
7.2.	Águas Subterrâneas	68
8.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
8.1.	Avaliação da vulnerabilidade pelo modelo DRASTIC	71
8.1.1.	<i>Profundidade do nível estático - (D)</i>	71
8.1.2.	<i>Recarga - (R)</i>	79
8.1.3.	<i>Litologia do aquífero - (A)</i>	86
8.1.4.	<i>Solo - (S)</i>	90
8.1.5.	<i>Topografia - (T)</i>	91
8.1.6.	<i>Impacto sobre a zona vadosa - (I)</i>	93
8.1.7.	<i>Condutividade hidráulica - (C)</i>	93
8.1.8.	<i>Mapa da avaliação da vulnerabilidade pelo modelo DRASTIC</i>	94
8.2.	Avaliação da vulnerabilidade pelo modelo AVI	99
8.2.1.	<i>Espessura da zona não saturada (di)</i>	99
8.2.2.	<i>Condutividade hidráulica estimada (Ki)</i>	99
8.2.3.	<i>Mapa da avaliação da vulnerabilidade pelo modelo AVI</i>	99

8.3.	Avaliação da vulnerabilidade pelo modelo GOD.....	103
8.3.1.	<i>Grau de confinamento da água subterrânea.....</i>	<i>103</i>
8.3.2.	<i>Ocorrência de estratos de cobertura.....</i>	<i>103</i>
8.3.3.	<i>Distância até o lençol freático (nível estático).....</i>	<i>103</i>
8.3.4.	<i>Mapa da avaliação da vulnerabilidade pelo modelo GOD.....</i>	<i>105</i>
8.4.	Avaliação da vulnerabilidade pelo modelo GODS.....	108
8.4.1.	<i>Tipo de cobertura do solo.....</i>	<i>108</i>
8.4.2.	<i>Mapa da avaliação da vulnerabilidade pelo modelo GODS.....</i>	<i>109</i>
8.5.	Nitrato.....	113
8.6.	Relação entre o modelo de vulnerabilidade DRASTIC e o uso e ocupação do solo..	124
9.	CONCLUSÕES.....	131
10.	RECOMENDAÇÕES.....	133
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134

1. INTRODUÇÃO

Há vários anos a humanidade convive com o dilema da falta de água, sendo que a mesma é, em muitos casos, mal distribuída, mas suficientemente abundante para suprir toda a necessidade da população mundial. Para tanto, basta que, sociedade e autoridades comecem a dar mais importância para este mineral.

Com o aumento populacional e, conseqüentemente, uma maior ocupação territorial, nem sempre, os recursos hídricos superficiais são abundantes para suprir as necessidades locais, fazendo com que a água subterrânea se torne a principal fonte de abastecimento para algumas localidades. Contudo, o seu baixo custo de captação e, geralmente, boa qualidade natural, as águas subterrâneas vêm, ao longo de décadas, sofrendo rebaixamentos acelerados de seus níveis, ocasionados pela falta de controle em suas explorações.

Associados, também, ao aumento populacional e, em decorrência do descaso de gestores e sociedade, os aquíferos acabam absorvendo as cargas poluidoras originadas a partir de lixões, ausência de saneamento básico, ocupação desordenada, lançamentos de compostos orgânico-sintéticos (Ex: tintas, solventes, plásticos, herbicidas, inseticidas, etc.), compostos inorgânicos e minerais, tais como os metais pesados (Cd, Hg, Pb, Zn, entre outros).

O emprego de técnicas cada vez mais onerosas vem sendo utilizadas como forma de amenizar os danos causados aos aquíferos e que, por muitas vezes, dependendo da profundidade e composição de um determinado aquífero, não surtem efeitos nas reabilitações. Vale ressaltar ainda que, grande parte dos compostos orgânicos são biodegradáveis, mas aqueles que não são decompostos, os biologicamente resistentes à ação de micro-organismos, podem alterar as propriedades físico-químicas da água, ou seja, mudando seu sabor, cheiro, cor e, até mesmo, tornando-a imprópria para o consumo, pois altos níveis de concentrações de tais compostos ou elementos podem provocar sérios riscos à saúde humana, como a de qualquer outro ser vivo.

Há mais de 40 anos, os pesquisadores têm voltado sua atenção para o aumento constante da preocupação da população com a degradação dos recursos hídricos subterrâneos, sejam eles em meio urbano quanto rural (HIRATA, 2001).

Quando se aborda sobre água, principalmente a subterrânea, foco desta pesquisa, se deve atentar para a vulnerabilidade dos aquíferos, pois são nestes que ocorrem o transporte, armazenamento e onde ocorre, de alguma forma, uma proteção maior ou menor aos contaminantes de diferentes tipos de fontes. A maior ou menor vulnerabilidade de um aquífero a fontes poluidoras está diretamente ligada a suas propriedades físico-químicas e, visando este

conceito de vulnerabilidade de aquífero, se faz necessário o conhecimento e delimitação das áreas mais susceptíveis à contaminação, seja ela por fatores naturais ou antrópicos.

Há uma grande quantidade de estudos voltados à vulnerabilidade dos aquíferos e, esta, pode ser entendida com base em duas funções: a primeira se refere a “acessibilidade hidráulica da zona não saturada à penetração de contaminantes; e a segunda função é definida pela capacidade de atenuação da camada que cobre a zona saturada, resultado da retenção ou reação físico-química de contaminantes (dispersão, retardação e degradação)” (FOSTER & HIRATA, 1988).

A região estudada está concentrada em uma porção da área de recarga do Aquífero Serra Grande, pertencente ao município de Tianguá, onde a infiltração é direta ao aquífero, levando consigo contaminantes de diferentes tipos que atingem o nível freático. Com base nesta premissa, este trabalho teve como objetivo realizar um estudo comparativo entre os métodos de avaliação da vulnerabilidade natural de aquífero DRASTIC, AVI, GOD e GODS, a fim de apontar o método que se adequa melhor à área estudada. De forma paralela, um levantamento dos níveis de nitrato foi feito, como forma de acompanhar a evolução do mesmo no aquífero.

A partir da escolha do modelo da vulnerabilidade natural do aquífero é possível auxiliar os gestores na elaboração de programas mais eficientes de uso e ocupação do solo, determinando as áreas mais apropriadas para cada tipo de atividade. Desta maneira se garantiria água, não apenas em quantidade suficiente para a população, mas com qualidade.

1.1. Justificativa

O Serviço Geológico do Brasil – CPRM tem a missão de difundir o conhecimento geológico e hidrogeológico básico para a sociedade e segundo Aguiar *et al.* (2010),

A CPRM propôs em 2001 a criação de uma linha prioritária de ação para a região semiárida do Brasil. Essa proposição foi materializada através do Programa de Águas Subterrâneas para o Semiárido Brasileiro, cujo objetivo é avaliar a ocorrência, potencialidade, circulação, qualidade e utilização das águas subterrâneas nessa região. Essas informações, além de indispensáveis para a gestão dos recursos hídricos, são fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico da região.

Em 2009, utilizando recursos provenientes do PAC – Programa de Aceleração do Crescimento, a CPRM iniciou uma nova fase de pesquisa nas bacias sedimentares do Parnaíba, porção oriental; Bacias de Mirandiba e Betânia, no estado de Pernambuco e a continuação de novos estudos na Bacia do Urucuia, Bahia.

Seguindo a premissa de que a porção oriental da Bacia Sedimentar do Parnaíba foi contemplada dentro dos estudos hidrogeológicos da CPRM e, juntamente, com um grande número de informações pré-existent de projetos, o estudo aqui proposto, vem contribuir com mais conhecimento para a região, associado ao foco de vulnerabilidade do aquífero.

A recarga do Aquífero Serra Grande é feita através da infiltração pluviométrica direta, levando consigo contaminantes de diferentes tipos de fontes poluidoras, tais como lixões, cemitérios, fossas sépticas, lançamento de compostos orgânico-sintéticos (Ex: tintas, solventes, plásticos, herbicidas, inseticidas, etc.), compostos inorgânicos e minerais, tais como os metais pesados (Cd, Hg, Pb, Zn, entre outros) que atingem o nível freático.

Os principais meios de comunicação do Brasil divulgaram no dia 08 de abril de 2015, por meio de nota do INCA - Instituto Nacional do Câncer, que o país se tornou o maior consumidor de agrotóxicos do planeta, ultrapassando a marca de mais de 1 milhão de toneladas em 2009, o que representa um consumo de 5,2 kg/ano de veneno agrícola por habitante. Londres (2011), pesquisadora responsável pela nota, também mostra que a incidência de câncer da população que vive na região do Baixo Jaguaribe é a maior entre os trabalhadores de áreas agrícolas já registrado pelo Instituto do Câncer do Estado do Ceará. A mesma autora chama a atenção para a Chapada do Apodi, pois, uma pesquisa feita em 2009 pela Universidade Federal do Ceará apontou a presença de 12 tipos de agrotóxicos em uma única caixa d'água pública.

A COGERH - Companhia de gestão dos Recursos Hídricos (2009) relata a contaminação do Aquífero Jandaíra pela presença de resíduos de agrotóxicos oriundos da

produção de banana e abacaxi, ressaltando ainda como fato extremamente alarmante, a profundidade de contaminação do aquífero, pois a água do mesmo é captada a profundidades superiores a 100 metros.

Londres (op. cit.) relata em seu trabalho a morte de um funcionário do almoxarifado químico da Fábrica de Abacaxi e Melões do Estado do Ceará, pelo constante contato com os agrotóxicos e adubos químicos durante os três anos e oito meses que trabalhou nessa função. Análises de sangue feitas para os trabalhadores da mesma fábrica de abacaxi mostraram que 53% apresentavam alterações na função hepática.

Barreto (2006) detectou a presença de nitrato para 31 amostras de águas no município de Tianguá, mas, apenas 1 ficou acima do valor de concentração máxima permitida de acordo com a Portaria 518/2005 do MS. O mesmo autor chama a atenção para a possível contaminação a partir da utilização de fertilizantes aplicados aos solos e plantações, pois outras fontes de poluição não foram evidenciadas.

O nitrato é um ânion que ocorre naturalmente em baixas concentrações nas águas. O aumento de sua concentração pode estar relacionado por apenas um determinado tipo de fonte ou por inúmeras situações, tais como chorumes que escorrem das pilhas de armazenamento de esterco, fossas sépticas e lagoas de decantação (RESENDE, 2002).

Para as pessoas adultas, os efeitos do nitrato podem ser mínimos, pois os mesmos podem ingerir quantidades relativamente altas através de alimentos e água e excretá-lo pela urina. Por outro lado, bebês com idades menores que seis meses, possuem bactérias no trato digestivo que reduzem o nitrato em nitrito, podendo causar envenenamento, pois o nitrito, quando alcança a corrente sanguínea reage com a hemoglobina formando um composto chamado metahemoglobina e, desta forma, diminui a capacidade do sangue transportar oxigênio, causando asfixia (ZUBLENA *et al.*, 2001). Estudos mais recentes e o INCA - Instituto Nacional do Câncer chamam a atenção para a incidência de câncer de estômago vinculado a ingestão de água a partir de poços com altas concentrações de nitrato.

Assim como Barreto (op. cit.), este trabalho leva em conta a importância do Aquífero Serra Grande para a população local, pois sua utilização na agricultura, lazer e irrigação é de fundamental importância para o desenvolvimento socioeconômico de Tianguá. Desta maneira, tornam-se necessário e urgente o desenvolvimento e a continuação de estudos da vulnerabilidade do aquífero, para que possa, assim, ser implantadas medidas para o gerenciamento sustentável do aquífero, de modo a garantir água, não apenas em quantidade suficiente para a população, mas com qualidade.

1.2. Objetivo

Este trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo comparativo entre os métodos de avaliação da vulnerabilidade natural de aquífero DRASTIC, AVI, GOD e GODS para o Aquífero Serra Grande no município de Tianguá, Ceará.

1.2.1. *Objetivos específicos*

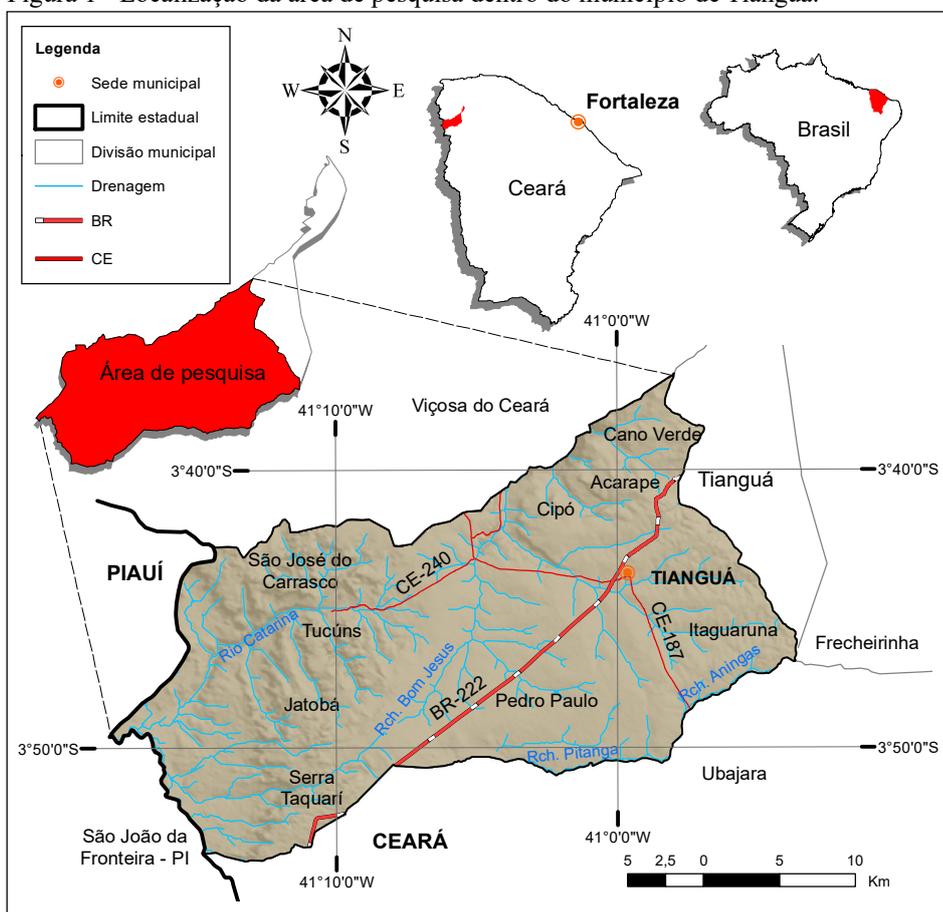
Os objetivos específicos são:

- a) Cadastramento de novos poços e enriquecimento da base de dados do SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas.
- b) Elaboração dos mapas de avaliação da vulnerabilidade de aquífero à contaminação DRASTIC, AVI, GOD e GODS.
- c) Elaboração do mapa da distribuição dos pontos de captação de água com suas respectivas concentrações de N-NO_3^- (ml/L).
- d) Elaboração do gráfico da concentração de N-NO_3^- (ml/L) com o intuito de auxiliar os gestores no acompanhamento da evolução do mesmo nas águas subterrâneas.
- e) Elaboração do mapa da relação entre a vulnerabilidade DRASTIC e o uso e ocupação do solo.
- f) Auxiliar, de forma eficiente, o uso e ocupação do solo, permitindo que os gestores determinem as áreas mais apropriadas para cada tipo de atividade, tais como, instalação de poços comunitários, indústrias, aterros sanitários, a fim de minimizar os riscos de contaminação do aquífero.

2. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

O município de Tianguá possui 909,34 Km², sendo que deste total, 724,64 Km² estão localizados na Bacia do Parnaíba, mais precisamente na Microrregião da Ibiapaba, correspondendo à área de interesse deste trabalho, encontra-se delimitada a norte pelo município de Viçosa do Ceará, a leste pelo município de Tianguá que corresponde ao embasamento cristalino, a sul por Ubajara e a oeste pelo município de São João da Fronteira (Piauí). O acesso ao local de estudo pode ser feito através da BR-222, distando aproximadamente 317 Km de Fortaleza e por estradas, em grande parte, carroçáveis que servem de acesso às comunidades locais (Figura 1).

Figura 1 - Localização da área de pesquisa dentro do município de Tianguá.



Fonte: O autor (2016).

3. ESTADO DA ARTE SOBRE VULNERABILIDADE DE AQUÍFERO

Neste capítulo serão abordadas as principais definições para a avaliação da vulnerabilidade natural de aquífero, assim como risco a contaminação, métodos para mapeamento e a descrição dos modelos de vulnerabilidade de aquífero utilizados neste trabalho.

3.1. Revisão sobre vulnerabilidade de aquífero

Há mais de 40 anos, os pesquisadores têm voltado sua atenção para o aumento constante da preocupação da população com a degradação dos recursos hídricos subterrâneos, sejam eles em meio urbano ou rural (HIRATA, 2001).

De acordo com Hirata (op. cit), os primeiros estudos de vulnerabilidade surgiram na década de 60, inicialmente nos Estados Unidos, por Le Grand (1964), seguidos por Albinet e Margat (1970) na França. Após este início, houve uma maior divulgação no meio acadêmico a partir da década de 80 com Heartle (1983); Aller et al. (1985); Bachmat & Collin (1987); Foster (1987); Foster e Hirata (1988); Lobo Ferreira e Cabral (1991); Adams e Foster (1992); Carbone (1993); VRBA & Zaporozec (1994); Custódio (1995), assim como muitos outros autores que abordaram este tema e que foram citados neste trabalho: Koogan *et al.* (1994), Hirata (2001), Aguêro *et al.* (2002), Leitão (2003), Auge (2003), Auge (2004), Foster *et al.* (2006), Barreto (2006), Maia (2011).

Ao longo dos anos surgiram muitas definições para o termo vulnerabilidade de aquíferos e, segundo Auge (2004), não existe um consenso bem definido para o mesmo, mas duas grandes correntes a serem seguidas.

A primeira corrente considera a vulnerabilidade como uma propriedade exclusiva do meio (Vulnerabilidade intrínseca - Tipo de aquífero, cobertura, permeabilidade, profundidade, recarga, entre outros) sem levar em conta a carga contaminante. Já a outra, além do comportamento do meio, leva em conta os efeitos da carga contaminante (AUGE, 2004).

Hirata (2001) ressalta que, do ponto de vista técnico científico, a definição do primeiro grupo é a mais amplamente utilizada. Foster & Hirata (1988) relatam que, para alguns autores, o termo vulnerabilidade de aquífero deveria levar em conta apenas as propriedades da zona não saturada ou cobertura do aquífero.

Hirata (2001) ressalta que a definição mais utilizada não parece ser a correta, pois, “O termo, assim como foi cunhado, deveria se restringir à avaliação do impacto nas águas subterrâneas e não em captações que necessitaria de uma avaliação do transporte de contaminante na zona saturada, típica em perímetros de proteção de poços”.

É possível notar no Quadro 1, uma grande tendência dos autores a optarem por elementos que favoreçam a utilização das propriedades do meio aquífero, deixando de lado a carga contaminante.

Quadro 1 - Principais métodos para determinar a vulnerabilidade à poluição de aquíferos.

Método	Avaliação de	Fatores	Referência
Surface Impoundment Assessment	Sistema de disposição de águas servidas	<ul style="list-style-type: none"> • Zonas não saturadas; • Importância do Recurso; • Qualidade de águas subterrâneas; • Periculosidade do Material 	LE GRAND (1964)
Landfill Site Ranking (método Le Grand-Brown)	Aterros sanitários novos e em operação	<ul style="list-style-type: none"> • Distância aterro e poços produtores. • Profundidade do nível d'água • Gradiente do aquífero • Permeabilidade e capacidade de atenuação 	LE GRAND (1983)
Site Ranking System	Disposição de produtos químicos, novos e em operação	<ul style="list-style-type: none"> • Solo, caract. hidráulica, sorção e tamponamento do aquífero • Ar • População próxima 	HAGERTY <i>et al.</i> (1973)
Poluição dos lençóis Aquíferos	Vulnerabilidade Geral	<ul style="list-style-type: none"> • Geologia (litologia e estruturas) 	TALTASSE (1972)
Waste-Soil Interaction Matrix	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas industrias	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito na Saúde • Características do produto químico • Comportamento do produto. • Capacidade do solo/atenuação • Hidrogeologia • Características do local 	PHILIPS <i>et al.</i> (1977)
Site Ranking Methodology	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas industrias	<ul style="list-style-type: none"> • Receptor-população/uso da água/uso local/degradação ambiental • Caminhos, nível e tipo de contaminação; profundidade do nível d'água; pluviometria; permeabilidade do solo (Continuação) • Característica do resíduo-toxicidade, persistência • Prática de manejo, aspectos operacionais e construtivos 	KULFS <i>et al.</i> (1980)
TPE	Áreas de risco de contaminação	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade da água subterrânea • Porcentagem de argila • Atividade potencialmente contaminante • Exploração dos aquíferos 	SILVA <i>et al.</i> (1980)
Hazard Ranking System	Áreas prioritárias para a limpeza de aquíferos	<ul style="list-style-type: none"> • Migração – características do meio e resíduo; quantidade de produto; população próxima • Explosão e fogo • Contato direto 	CALDWELL <i>et al.</i> (1981)
Mapa de Vulnerabilidade	Vulnerabilidade geral	<ul style="list-style-type: none"> • Características litológicas • Área de recarga e descarga 	DUARTE (1980)

Método	Avaliação de	Fatores	Referência
EPIK	Vulnerabilidade em aquífero	<ul style="list-style-type: none"> • Carstificação superficial • Cobertura de proteção • Infiltração • Rede cárstica 	DOERFLIGER & ZWAHLEM (1997)
Brine Disposal Methodology	Águas de formação em campos de petróleo e gás	<ul style="list-style-type: none"> • Método de disposição • Volume • Geologia • Densidade de poços de petróleo • Proximidade de poços de água 	WESTERN MICHIGAN UNIVERSITY (1981)
Pesticide Index	Pesticida, uso normal	<ul style="list-style-type: none"> • Características físico-químicas de pesticidas • Clima • Perfil do solo • Cultura 	RAO <i>et al.</i> (1985)
DRASTIC	Vulnerabilidade geral	<ul style="list-style-type: none"> • D - Profundidade da água subterrânea • R - Recarga • A - Meio aquífero • S - Solo • T - Topografia • I - Impacto no aquífero • C - Condutividade hidráulica 	ALLER <i>et al.</i> (1985)
GOD	Vulnerabilidade geral	<ul style="list-style-type: none"> • G - Tipo de aquífero • O - Litologia da zona vadosa • D - Profundidade da água 	FOSTER & HIRATA (1988)
Groundwater Vulnerability Map for Nitrate	Potencial de lixiviação	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de solo • Características hidráulicas e litológicas do aquífero 	CARTER <i>et al.</i> (1987)
IS	Vulnerabilidade geral	<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade da água • Recarga • Litologia • Topografia • Ocupação do solo 	FRANCES <i>et al.</i> (2001) & PARALTA <i>et al.</i> (2001)
Potential Waste Sites (PWDS)	Disposição de resíduos sólidos	<ul style="list-style-type: none"> • Vulnerabilidade • Confinamento do aquífero • Proximidade de fontes • Tipo e quantidade de contaminantes • Velocidade zona saturada • Percolação 	BGS (sem data)
(sem nome)	Vulnerabilidade geral, baseado na teoria do fluxo-pistão	<ul style="list-style-type: none"> • Condutividade hidráulica na zona não saturada • Profundidade da água subterrânea • Umidade do solo • Recarga real 	MARCOLONGO & PRETTO (1987)
SINTACS	Vulnerabilidade geral	Igual ao DRASTIC, com pesos diferentes	CIVITA <i>et. Al.</i> (1990)

Método	Avaliação de	Fatores	Referência
(sem nome)	Vulnerabilidade geral	<ul style="list-style-type: none"> • Características litológicas e de permeabilidade • Profundidade da água 	ADAMS & FOSTER (1990)
Perigo Associado a Sistema de saneamento in situ	Avaliar área de maior risco por sistemas de saneamento in situ	<ul style="list-style-type: none"> • Vulnerabilidade GOD • Densidade da população • Análises indicadores físico-químicos (condutividade elétrica) 	FERREIRA E HIRATA (1993)
Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (AVI)	Vulnerabilidade geral	<ul style="list-style-type: none"> • Espessura da camada acima do aquífero • Condutividade hidráulica 	VAN STEMPVOORT (1993)
EKv	Vulnerabilidade geral	<ul style="list-style-type: none"> • Espessura da zona saturada • Permeabilidade da zona saturada 	AUGE (1995)
$\Delta h.T'$	Vulnerabilidade em aquífero semiconfinado	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial hidráulico • Transmissividade vertical 	AUGE (2001)
EPPNA	Vulnerabilidade geral	<ul style="list-style-type: none"> • Características litológicas • Características Hidrogeológicas 	PLANO NAC. (PORT.) DA ÁGUA (1998)

Fonte: modificado de Hirata & Rebouças (1999).

Assim como Maia (2011), este trabalho faz uma alusão às inúmeras definições sobre vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação encontradas em Auge (2004) e muitos outros autores.

A vulnerabilidade de um aquífero pode ser entendida com base em duas funções. A primeira se refere a “acessibilidade hidráulica da zona não saturada à penetração de contaminantes (advecção de contaminantes)”. A segunda função é definida pela “capacidade de atenuação da camada que cobre a zona saturada, resultado da retenção ou reação físico-química de contaminantes (dispersão, retardação e degradação)” (FOSTER & HIRATA, 1988).

VRBA & ZAPOROZEC (1994) definem vulnerabilidade como uma propriedade intrínseca do sistema de água subterrânea, sendo esta dependente da sensibilidade aos impactos humanos e/ou naturais. Em referência a vulnerabilidade específica, estes autores retratam como sendo o perigo de contaminação da água subterrânea por certo tipo de contaminante ou família de contaminantes com características e comportamentos similares, como é o caso dos nitratos, matéria orgânica, metais, hidrocarbonetos e agrotóxicos.

Maia (2011) ressalta que a vulnerabilidade intrínseca se deriva das características peculiares do aquífero e de seu entorno, mas não levam em conta os efeitos dos contaminantes. Já a vulnerabilidade específica passa a considerar a ação dos contaminantes e as características do meio aquífero.

Para Foster & Hirata (1993) “a vulnerabilidade de um aquífero à contaminação, representa sua sensibilidade para ser adversamente afetado por uma carga contaminante imposta.” No entanto, Auge (2004), parece entender que o termo “carga contaminante imposta” empregada pelos autores anteriormente citados, está se referindo a um contaminante de origem artificial, mas, na realidade, deixa uma certa imprecisão com a utilização do termo, pois é notória a generalização da palavra (MAIA, 2011).

Custódio (1995) ressalta que “a vulnerabilidade à poluição expressa a incapacidade do sistema de absorver as alterações, tanto naturais como artificiais”.

Em detrimento das inúmeras atividades agrícolas por determinar a facilidade com que um contaminante, aplicado na superfície, alcance o aquífero, a EPA (1991) incorpora em suas definições, além das condições do meio aquífero, as propriedades dos contaminantes e as práticas de cultivo (vulnerabilidade específica).

De acordo com Carbonell (1993), os contaminantes tendem a disseminar-se no aquífero, após serem derramados na porção não saturada do mesmo, interferindo diretamente no grau de vulnerabilidade a contaminação.

3.2. Risco à contaminação

Para Foster (1987) o risco à contaminação é “o perigo de perda da qualidade da água armazenada em um aquífero, pela existência real ou potencial de substâncias contaminantes em seu entorno” (apud AUGE, 2004).

O termo risco à contaminação foi inicialmente empregado de maneira indefinida por muitos autores, mesmo se referindo à “susceptibilidade relativa dos aquíferos à contaminação”. “A expressão passou a ter diferentes significados para diferentes pessoas” (FOSTER *et al.*, 2006).

Foster (1987) apresentou uma definição plausível e de grande utilidade para determinar a facilidade de um aquífero sofrer as consequências adversas de uma dada carga contaminante, ou seja, deve-se levar em conta o conjunto das características intrínsecas dos estratos entre a superfície e a camada saturada.

A ideia mais próxima de risco à contaminação de água subterrânea para Foster *et al.* (1988) seria uma interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e a carga contaminante que pode ser aplicada ao solo ou em subsuperfície, mesmo sem estar associada a desastres naturais. Para os mesmos autores, em muitos casos, mesmo em situações com alta vulnerabilidade, mas com ausência de carga poluidora, o risco de contaminação pode ser inexistente ou vice-versa.

Para Foster *et al.* (op cit.) todos os aquíferos são, de alguma forma, vulneráveis a médio e/ou a longo prazo à contaminantes com características persistentes e móveis, gerados por atividades amplamente disseminadas em uma região. Cargas poluidoras podem ser modificadas e/ou controladas, no entanto, isso não ocorre com a vulnerabilidade natural de um aquífero, pois faz parte da propriedade intrínseca do mesmo.

Para Koogan *et al.* (1994) “a vulnerabilidade está sempre relacionada à maior ou menor fragilidade de um determinado ambiente e pode ser expressa pela qualidade de ser vulnerável, susceptível, de ser ofendido ou tocado.” Em resposta a esta afirmação, Maia (2011) menciona que o conceito de vulnerabilidade de um aquífero foi baseado “na suposição de que determinadas características do meio aquífero podem oferecer algum grau de proteção da água subterrânea contra o impacto humano e natural”.

Para Aguêro, Valver e Mesalles (2002), é importante conhecer as zonas de maior vulnerabilidade à contaminação e estabelecer programas direcionados ao monitoramento sobre possíveis fontes de contaminação, assegurando desta forma, a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos subterrâneos.

Como sendo uma propriedade intrínseca ao meio, a vulnerabilidade pode ser amplamente empregada em trabalhos de planejamento de uso e ocupação do solo, quanto para água. Para casos em que há perigo de deterioração pela presença de substâncias contaminantes no sistema, a vulnerabilidade específica adere a concepção de risco. (AUGE, 2003).

Para Barreto (2006), a carga contaminante é um aspecto que deve ser considerado para a vulnerabilidade natural de um aquífero. Leitão *et al.* (2003) exemplifica que a qualidade da água subterrânea pode ser muito vulnerável a uma determinada carga contaminante, tais como pesticidas/nitratos que tiveram suas origens a partir de atividades agrícolas incorretas, mas por outro lado, pode apresentar baixa vulnerabilidade a cargas patogênicas, pois este último pode apresentar uma alta mortalidade natural.

3.3. Mapeamento e modelos para a vulnerabilidade de aquíferos

Foster & Hirata (1988) ressaltam a necessidade de se criar um sistema mais simplificado e generalizado para o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero. A solução para suprir essa carência seria a produção de um mapa integrado da vulnerabilidade, desde que os termos que serão utilizados estejam bem definidos e com suas limitações precisamente descritas.

Para LNEC (2002), um dos fatores importantes para um gerenciamento eficiente dos recursos hídricos é a busca de medidas preventivas à contaminação das águas subterrâneas.

No entanto, a falta de informações como variação espacial e litológica dos aquíferos, dificulta o monitoramento e, conseqüentemente, torna as atividades de remediação caras e, em geral, não práticas.

Para Foster *et al.* (2006), é importante que se enfatize os mapas regionais de vulnerabilidade do aquífero à contaminação, como uma ferramenta de medidas para proteção das águas subterrâneas (FOSTER *et al.*, 2006).

Maia (2011) indica que as avaliações regionais não são suficientes para definir a potencialidade dos poluentes e quais medidas serão adotadas para sua contenção, pois levam em conta apenas a vulnerabilidade intrínseca do aquífero. Para o mesmo autor, estes mapas apenas visam indicar possíveis riscos potenciais à contaminação da água subterrânea.

Maia (2011) entende que muitos autores têm sua atenção voltada à vulnerabilidade dos aquíferos devido à preocupação da sociedade com a degradação dos mesmos. Uma maneira de compatibilizar as atividades antrópicas com a capacidade de atenuação do terreno seria a cartografia de vulnerabilidade, como uma maneira de gerenciar e proteger os aquíferos.

Para Hirata (2001), é notório o crescimento de modelos e técnicas como ferramentas de apoio para o mapeamento de vulnerabilidade à poluição de aquífero. “A cartografia de vulnerabilidade tem servido à racionalização de ações de proteção de aquífero, na medida em que tenta compatibilizar as atividades antrópicas com a capacidade do terreno em suportá-las, sem prejuízo à qualidade das águas subterrâneas”.

Foster *et al.* (2006) ressaltam que mapeamentos são, comumente, seguidos por um cadastro de uma dada carga contaminante e que, os mesmos, são realizados ao menos em áreas mais vulneráveis.

Para Auge (2004), o método DRASTIC, por apresentar um número de variáveis maior, torna-se um método mais robusto se comparado ao GOD, mas, por outro lado, se transforma em um inconveniente quando há dificuldade de obtenção e a falta de alguns destes valores. Para o mesmo autor, a repetição do alcance de parâmetros como a recarga (R) e condutividade (C), que estão associados a renovação de água no aquífero é visto de forma negativa.

Maia (2011) colabora com a crítica de Auge (2004), pois variáveis obtidas por meio de tabelas, tais como litologia e solos, produzem valores repetidos que, “associados aos efeitos dos fatores de ponderação, distorcem os índices de vulnerabilidade produzindo resultados semelhantes em áreas com o mesmo tipo de solo ou de rocha”.

Um dos problemas enfrentados em desenvolver mapas de vulnerabilidade de aquífero é encontrar índices de vulnerabilidade onde sejam priorizados os aspectos

quantitativos sobre os qualitativos e que os mesmos possam ser indicadores de vulnerabilidade de todos para qualquer tipo de aquífero (MAIA, 2011).

Uma vantagem para a utilização do método GOD, principalmente, para países com poucos recursos, está atrelada a sua simplicidade de operação, ocasionada por seu reduzido número de parâmetros. Por outro lado, sua aplicação produz resultados com menos resolução se comparado a modelos como DRASTIC e SINTACS (modelo análogo ao DRASTIC, mas com variações em seus índices). Este método também não considera a incidência do solo, visto que é um fator relevante como protetor natural contra a contaminação (AUGE, 2004).

Um ponto de vista a ser discutido é a consideração ou não do uso do parâmetro solo em modelos de avaliação da vulnerabilidade de um aquífero, pois em áreas urbanas ou zonas rurais que não possuam saneamento básico, associadas à presença de fraturas e solos pouco espessos, onde poluentes são lançados diretamente abaixo da camada de solos, tendem a anular este parâmetro e, desta maneira, alcançar o aquífero de forma mais rápida.

Para Hirata (2001), todo ambiente tem suas características particulares, o que os torna únicos e, ao mesmo tempo, provoca uma dificuldade em modelos de vulnerabilidade para classificar os aquíferos de forma absoluta, mas sim de forma relativa.

De acordo com Auge (2004), as escolas Alemã e Checa divergem na representação cartográfica. A primeira mantém a necessidade do surgimento de novas técnicas para tornar a vulnerabilidade em uma variável quantitativa. A segunda escola ressalta a permanência do alcance qualitativo, pois há uma inconveniência de se atribuir grandezas aos parâmetros e processos que atuam sobre a vulnerabilidade.

Maia (2011) destaca que os métodos mais tradicionais são utilizados por todos, sem o mínimo questionamento e emprego de suas funcionalidades. O mesmo autor ressalta ainda que, desde os anos 70, houve uma predominância pela procura por sistemas qualitativos mais genéricos e menos refinados para o mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos pelo fato de serem mais facilmente aplicáveis.

O primeiro passo de uma gestão sustentável da água subterrânea é a escolha de uma escala adequada para o mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos que, por sua vez, fornecerá informações gerais para o uso e ocupação do território e da água (MAIA, 2011).

3.4. Modelos utilizados no trabalho

Neste capítulo serão abordadas e descritas as metodologias DRASTIC, AVI e GOD que serão utilizadas neste trabalho para que, posteriormente, sejam comparadas e analisadas e definir, dentre estas, qual metodologia se adequa melhor à região pesquisada.

3.4.1. DRASTIC

O DRASTIC é um modelo qualitativo, desenvolvido por Aller et al. (1987) para a EPA (*U.S. Environmental Protection Agency*) e tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade intrínseca do aquífero à uma carga poluente a partir de variáveis hidrogeológicas. O DRASTIC leva em consideração as seguintes premissas para o seu desenvolvimento:

- a) O contaminante entra em contato com a superfície;
- b) O contaminante é transportado até a água subterrânea por meio de infiltração;
- c) O contaminante possui a mobilidade da água;
- d) A área mínima a ser avaliada deve corresponder a 40 hectares.

As variáveis utilizadas pelo DRASTIC correspondem às sete letras que formam seu nome e, para cada uma destas, são atribuídos pesos (*weight*) que podem variar de 1 a 5 de acordo com o grau de significância de cada parâmetro (Quadro 2). Estes parâmetros possuem suas próprias faixas de intervalos e, dependendo destas, podem ser classificados com valores ou notas (*rating*) que variam de 1 a 10.

Quadro 2 - Descrição dos parâmetros utilizados pelo método DRASTIC com seus respectivos índices de ponderação.

	Parâmetros	Índice de ponderação (w)
<i>Depth</i>	Profundidade do nível estático	5
<i>Recharge</i>	Recarga	4
<i>Aquifer</i>	Litologia do aquífero	3
<i>Soil</i>	Solo	2
<i>Topography</i>	Topografia	1
<i>Impact</i>	Impacto sobre a zona saturada	5
<i>Conductivity</i>	Condutividade hidráulica	3

Fonte: Aller *et al.*, 1987.

A profundidade (D) é um parâmetro que define o espaço em que um poluente lançado na superfície pode alcançar o aquífero. Quanto maior a espessura não saturada de um aquífero, menor a possibilidade de contaminação, pois irá influenciar diretamente no tempo de transporte e atenuação dos poluentes (Quadro 3). O espaço que deve ser considerado para efeito de classificação, para aquíferos livres, será a espessura da camada não saturada. Para aquíferos confinados deve ser considerada a distância da superfície ao topo do aquífero e, no caso de aquíferos semiconfinado, deve-se escolher entre a zona não saturada ou o espaçamento entre a superfície e o topo do aquífero.

Quadro 3 - Intervalos de profundidade e seus valores de classificação.

(D) Profundidade do Nível Estático	
Intervalo de Valores (m)	Valor (r)
<1,5	10
1,5-4,5	9
4,5-9	7
9-15	5
15-23	3
23-30	2
>30	1

Fonte: Aller *et al.*, 1987.

A recarga (R) representa a quantidade de água que chega ao aquífero por meio da infiltração (Quadro 4). Essa infiltração está diretamente condicionada as precipitações ou por rios influentes que podem, respectivamente, lixiviar contaminantes da superfície ou de uma outra região para o aquífero. Este parâmetro é diretamente proporcional à vulnerabilidade do aquífero, ou seja, quanto maior a recarga de um aquífero, maior sua chance de ser contaminado, mas por outro lado, uma alta taxa de recarga pode atuar como um agente dispersor e diluidor de poluentes. Maia (2011) ressalta que os autores do DRASTIC e demais métodos só consideram este parâmetro como fator negativo, pois não levam em conta a dispersão e a diluição dos contaminantes solúveis e a remoção destes do aquífero por meio do fluxo subterrâneo. Outro fator que o mesmo autor chama a atenção é a capacidade de proteção nas zonas de surgência do aquífero, devido ao fluxo ascendente que não permitem a penetração dos contaminantes.

Quadro 4 - Intervalos de recarga e seus valores de classificação.

(R) Recarga	
Intervalo de Valores (mm)	Valor (r)
0-50	1
50-100	3
100-180	6
180-255	8
>255	9

Fonte: Aller *et al.*, 1987.

A composição da litologia (A) de um aquífero pode ser a responsável ou não pela atenuação das substâncias contaminantes e pela mobilidade na zona não saturada (Quadro 5). Em determinados casos, essa ação atenuante pode ser diminuída ou anulada com a presença de fraturas que podem acelerar o fluxo do contaminante em direção ao aquífero.

De acordo com as características litológicas do aquífero que podem variar, desde uma rocha sedimentar friável até uma rocha cristalina, deve-se atribuir um valor de referência

dentro do seu intervalo de classificação, mas quando não há informações específicas sobre esta, um valor comum (r) deve ser atribuído.

Quadro 5 - Litologia do aquífero e seus intervalos.

(A) Litologia		
Litologia	Intervalo	Valor (r)
Argilas, margas e siltes	1-3	2
Rochas ígneas e metamórficas	2-5	3
Rochas ígneas e metamórficas alteradas	3-5	4
Intercalações de arenitos, argilas e calcários	5-9	6
Arenitos maciços	4-9	6
Calcários maciços	4-9	6
Areias, cascalhos e conglomerados	6-9	8
Vulcânicas	2-10	9
Calcários cársticos	9-10	2

Fonte: Aller *et al.*, 1987.

O solo (S) é a parte que recobre o aquífero, podendo ser de origem da própria rocha adjacente ou, por processos de erosão, ter sido transportado e depositado em outra região. Assim como a litologia, o solo (Quadro 6) pode ser um agente de atenuação de poluentes, tanto por sua espessura como pela existência de atividades bacteriológicas, que decompõe certos tipos de compostos orgânicos e inorgânicos.

Quadro 6 - Tipo de solos e seus valores de classificação.

(S) Tipo de Solo	
Tipo de Solo	Valor (r)
Argila não expansiva e não agregada	1
Orgânico	2
Marga argilosa	3
Marga siltosa	4
Marga	5
Marga arenosa	6
Argila expansiva e agregada	7
Turfa	8
Areia	9
Cascalho	10
Solos pouco espessos ou ausentes	10

Fonte: Aller *et al.*, 1987.

A topografia (T) de um terreno é a responsável pela variação da velocidade e direção de fluxo superficial, assim como o fluxo de água subterrânea. Este parâmetro é classificado por meio de porcentagens que definem a declividade do terreno (Quadro 7). Quanto maior a declividade, menor será o tempo de permanência de um poluente na superfície e menor a chance de infiltração. Por outro lado, com a situação inversa, haverá um maior tempo de permanência do contaminante sobre a superfície.

Quadro 7 - Intervalos de declividade e seus valores de classificação.

(T) Topografia	
Intervalo de Valores (%)	Valor (r)
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

Fonte: Aller *et al.*, 1987.

O impacto da zona vadosa (I) é avaliado a partir do seu reconhecimento. É caracterizada pela porção que contém umidade e ar (gases) em seus interstícios, está situada entre a superfície freática e o solo, quando este último existe, ou não. Assim como a litologia do aquífero e solo, este parâmetro também é responsável pela atenuação das substâncias contaminantes e por sua mobilidade.

De acordo com Maia (2011) os parâmetros litologia do aquífero e solos, quando este tiver sua origem a partir do material do próprio aquífero, e impacto da zona vadosa, são diretamente relacionáveis, ou seja, seus valores são obtidos por meios de tabelas, onde há certa repetição com tendências de produzirem índices de vulnerabilidades com valores repetidos ou muito próximos. O Quadro 8 mostra a classificação do impacto na zona vadosa de acordo com a litologia existente.

Quadro 8 - Classificação do impacto da zona vadosa e seus intervalos.

(I) Impacto da Zona Vadosa		
Litologia	Intervalo	Valor (r)
Argilas, margas e siltes	1-2	1
Xistos e ardósias	2-5	3
Calcário	2-7	6
Arenito	4-8	6
Intercalações de arenitos, argilas e calcários	4-8	6
Areias e cascalhos com matriz argilosa	4-8	6
Ígneas e metamórficas	2-8	4
Areias e cascalhos	6-9	8
Vulcânicas	2-10	9
Calcários Carstificados	8-10	10

Fonte: Aller *et al.*, 1987.

A condutividade hidráulica (C) é um parâmetro dependente das características do meio, tais com: porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, além das características pertencentes aos fluidos que estão escoando, como viscosidade e massa específica (FEITOSA, 2008). Estas características somadas ao gradiente hidráulico da região interferem diretamente na velocidade e na direção de fluxo da água ou substâncias poluentes

no aquífero. O Quadro 9 mostra a classificação da condutividade hidráulica com base na variação dos intervalos em m/dia.

Quadro 9 - Classificação da condutividade hidráulica e seus intervalos.

(C) Condutividade Hidráulica	
Intervalo de Valores (m/dia)	Valor (r)
<4	1
4-12	2
12-28	4
28-40	6
40-80	8
>80	10

Fonte: Aller *et al.*, 1987

De acordo com a equação 1, o índice da vulnerabilidade DRASTIC pode ser obtido a partir da soma ponderada entre os produtos dos sete parâmetros (ALLER *et al.*, 1987).

Índice de Vulnerabilidade DRASTIC:

$$Dr.Dw + Rr.Rw + Ar.Aw + Sr.Sw + Tr.Tw + Ir.Iw + Cr.Cw \quad \text{[Equação 1]}$$

Onde:

r (valor); w(peso);

O resultado desta equação, para o índice de classificação DRASTIC, pode variar entre os valores mínimo e máximo de 23 e 226 respectivamente, quando todos os parâmetros forem submetidos a valores de classificação 1 ou 10 respectivamente. Barreto (2006) e Maia (2011) apontam que, normalmente, os índices dominantes variam entre 50 e 200. No Quadro 10, podem ser observados os intervalos para cada índice e suas respectivas classificações de acordo com (ALLER *et al.* 1987).

Quadro 10 - Classificação DRASTIC.

Classificação DRASTIC	
Índices de vulnerabilidade	Classificação de vulnerabilidade
<100	Insignificante
101-119	Muito baixa
120-139	Baixa
140-159	Moderada
160-179	Alta
180-199	Muito alta
200	Extrema

Fonte: Aller *et al.*, 1987.

3.4.2. AVI

Este modelo foi desenvolvido no Canadá pela *National Hydrology Research Institute* (NHRI). É caracterizado por ser um método numérico e generalista, ou seja, avalia a vulnerabilidade geral do aquífero. Van Stempvoort et al. (1993) consideram apenas dois parâmetros para o cálculo do índice de vulnerabilidade do aquífero: a espessura da zona não saturada (d_i) e a condutividade hidráulica estimada (K_i) para cada camada que confina o aquífero (Equação 2) e, por esta razão, é indicado para sistemas multicamadas, mas também pode, por simplificação, ser aplicado a um sistema freático que admite apenas uma camada, ou seja, a zona vadosa (MAIA, 2011). O Índice AVI representa, em unidade de tempo, a resistência hidráulica da camada confinante de um aquífero ao fluxo vertical e sua relação com a vulnerabilidade pode ser observada no Quadro 11.

Cálculo do Índice de Vulnerabilidade AVI:

$$C = \sum (d_i/K_i) \quad \text{[Equação 2]}$$

Onde:

d_i : espessura da zona não saturada;

K_i : Condutividade hidráulica estimada.

Quadro 11 - Relação entre vulnerabilidade e resistência hidráulica.

Classificação AVI	
Resistência Hidráulica vertical (ANO)	Vulnerabilidade
0-10	Extremamente alta
10-100	Alta
100-1.000	Moderada
1.000-10.000	Baixa
>10.000	Extremamente baixa

Fonte: Stempvoort *et al.* (1992) apud Maia (2011).

3.4.3. GOD e GODS

A metodologia GOD (Grau de confinamento da água subterrânea, Ocorrência de estratos de cobertura e Distância até o lençol freático) de avaliação da vulnerabilidade do aquífero foi desenvolvida por Foster (1987) e Foster & Hirata (1988) para a Organização Mundial de Saúde, para atender as necessidades de países em desenvolvimento por não necessitar de grandes quantidades de informações em relação ao método DRASTIC. De acordo com Foster (2006), foi durante a década de 1990 que este método foi largamente utilizado e testado na América Latina e Caribe. Considera dois fatores básicos:

- a) As barreiras hidráulicas ou nível de inacessibilidade à zona saturada do aquífero;
- b) A capacidade de atenuação da litologia da zona vadosa e camadas confinantes do aquífero.

O mesmo autor enfatiza que estes fatores não podem ser medidos diretamente e necessitam da combinação de outros parâmetros que podem ser observados no Quadro 12. É bastante comum a falta de informações hidrogeológicas necessárias para uma caracterização completa da vulnerabilidade do aquífero à contaminação e a simplificação do número destas informações é inevitável quando se visa desenvolver mapeamentos da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação.

Quadro 12 - Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade do aquífero a contaminação.

Componentes de Vulnerabilidade	Dados Hidrogeológicos	
	Idealmente necessários	Disponíveis
Inacessibilidade Hidráulica	Grau de confinamento do aquífero.	Tipo de confinamento da água subterrânea.
	Profundidade até o lençol freático ou a posição da água subterrânea.	Profundidade até o lençol freático.
	Condutividade hidráulica vertical e teor de umidade da zona não saturada (zona vadosa) ou camada confinante.	
Capacidade de atenuação	Distribuição granulométrica dos sedimentos e fissuras na zona vadosa ou camada confinante.	Grau de consolidação / fissuração desses estratos.
	Mineralogia dos estratos na zona vadosa ou camada confinante.	Características litológicas.

Fonte: Foster, 2006.

Foster (1987) e Foster & Hirata (1988) tomando como base estas considerações, caracterizam a vulnerabilidade do aquífero à contaminação através do índice de vulnerabilidade GOD de acordo com os parâmetros do Quadro 13.

Quadro 13 - Parâmetros de caracterização para o método GOD.

Parâmetros de Caracterização para o Método GOD		
<i>Groundwater occurrence</i>	Confinamento hidráulico da água subterrânea	Livre, Semiconfinado ou Confinado
<i>Overall lithology of the unsaturated zone</i>	Litologia e grau de consolidação da zona vadosa	Litologia
<i>Depth to the water table</i>	Profundidade até o lençol freático	Espessura da zona vadosa

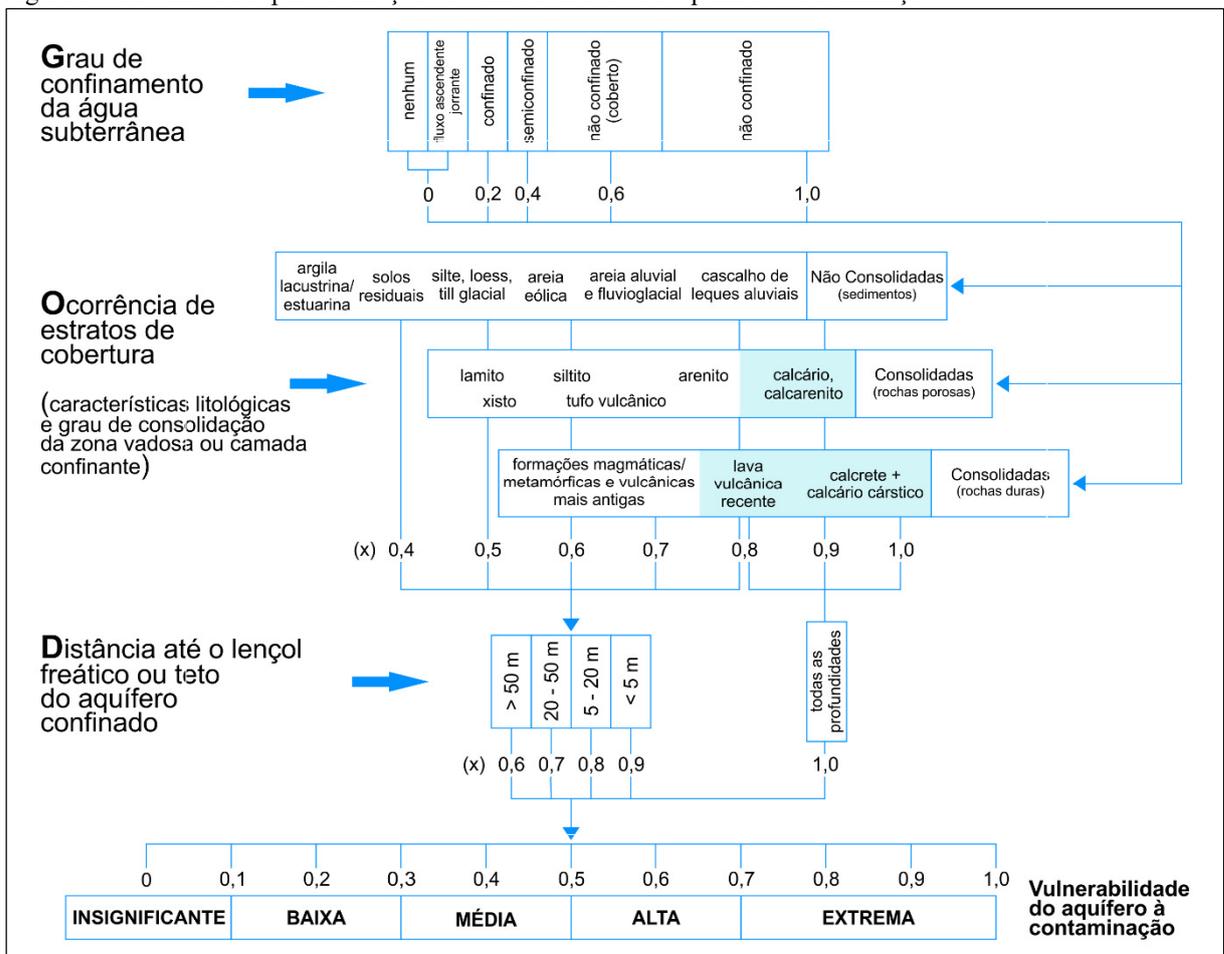
Fonte: Foster, 2006.

Segundo Foster (2006) o cálculo para o índice GOD é obtido através do produto entre os índices dos parâmetros observado na Figura 2 e demonstrado na Figura 3.

Foster (2006) enfatiza a importância de utilizar o índice que representa a litologia predominante ou limitante, em termos de permeabilidade, quando se há uma sequência variável de depósitos para definir a ocorrência de estratos de cobertura.

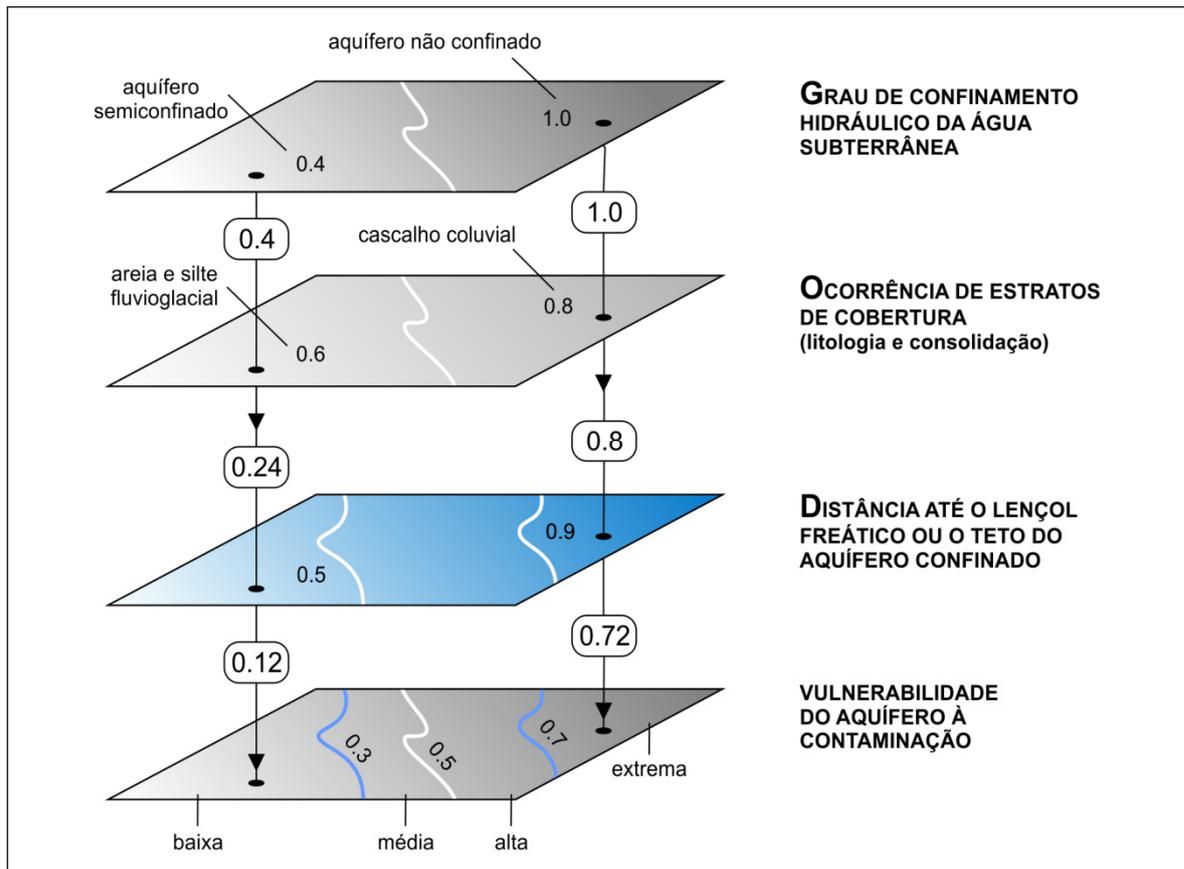
Um fator importante e preocupante para Foster (op. cit.) é o fato de se dar muita atenção à condutividade hidráulica e a porosidade efetiva, ou seja, seria dada mais atenção ao tempo de recarga do que a atenuação do contaminante. Desta maneira, a vulnerabilidade seria errônea, uma vez que se tornaria uma medida de tempo de quando um poluente chegaria ao aquífero. O mesmo autor chama a atenção para a probabilidade da existência de fraturas bem desenvolvidas, pois estas podem favorecer o fluxo preferencial, mesmo em estratos porosos (Figura 4). Com a possibilidade da existência de um fluxo preferencial, conseqüentemente ocorrerá um aumento da vulnerabilidade e conseqüentemente na redução do fator de atenuação dos contaminantes.

Figura 2 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.



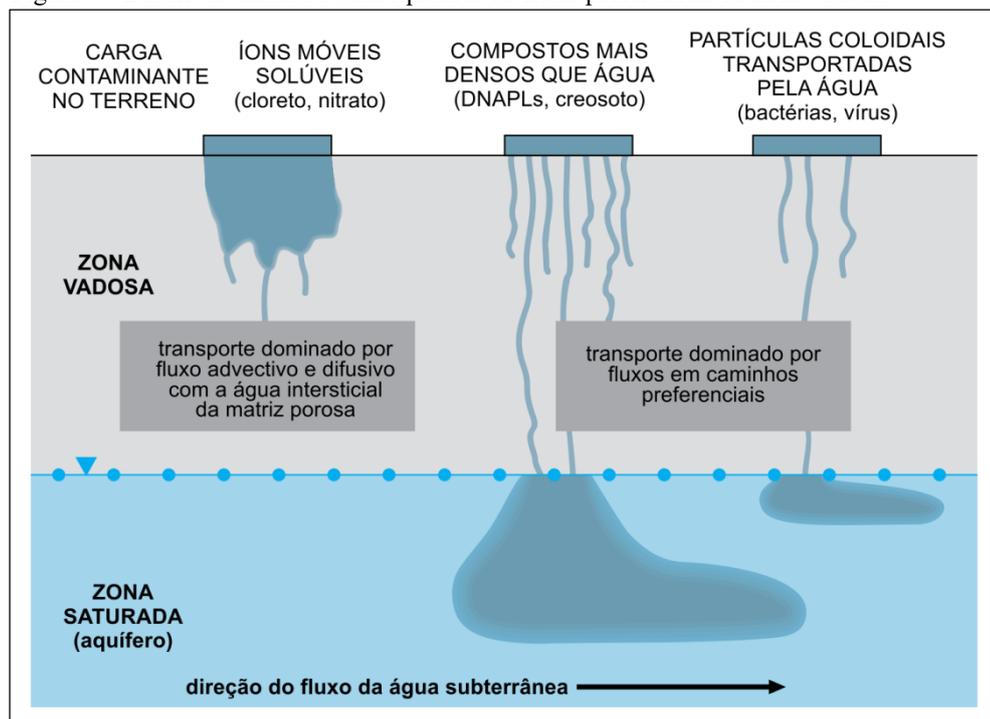
Fonte: Foster, 2006.

Figura 3 - Atributos/índices/parâmetros utilizados para a determinação da Vulnerabilidade utilizando o método GOD.



Fonte: Foster et al., (2006).

Figura 4 - Desenvolvimento e consequência do fluxo preferencial da zona vadosa.



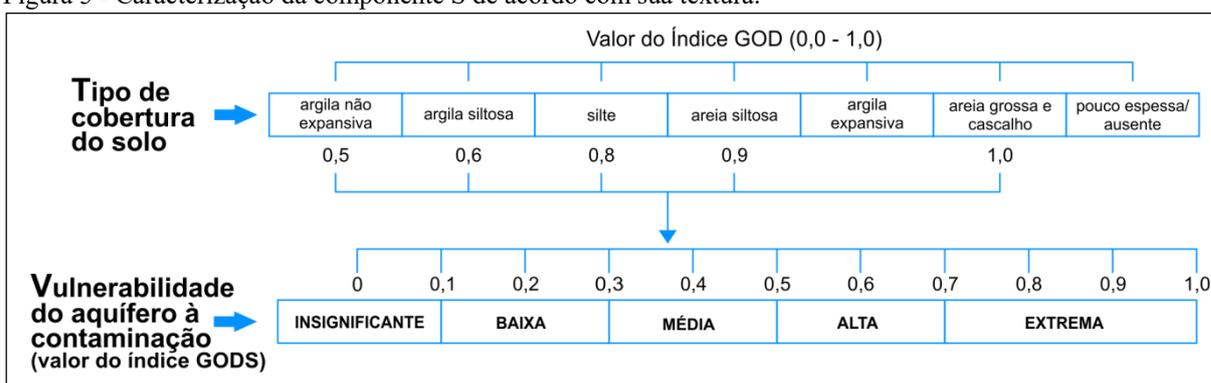
Fonte: Foster, 2006.

Inicialmente o índice de vulnerabilidade à contaminação GOD não incluiu um estudo de solos, sendo que, grande parte dos processos atenuadores e/ou que causam a eliminação de contaminantes abaixo da superfície, ocorre com maior potencial na zona biologicamente ativa do solo, pois é nesta região que se encontram os maiores teores de matéria orgânica, minerais argilosos e pela presença de grande atividade bacteriológica (FOSTER, 2006).

Como um quarto passo para tentar diminuir a pontuação geral de determinadas áreas definidas como de alta vulnerabilidade hidrogeológica, o Departamento de Engenharia e Ambiental da Pontifícia Universidade do Chile sugeriu uma modificação e introdução de uma nova componente S relativo à capacidade da cobertura de solo de atenuação dos contaminantes (Figura 5). Esta nova metodologia ficou conhecida como GODS e que, sua nova componente, era caracterizada de acordo com a textura do solo, variando de muito fina (argilas) a muito grossa (cascalhos) e espessuras maiores que 0,5 metros (FOSTER *et al.*, 2006).

De uma maneira ampla, Foster *et al.* (2006) validam a inclusão de uma componente S (Solo) no método GOD, mesmo esta não sendo aplicável em áreas cujo perfil de solo, por ventura, tenha sido removido ou alterado, principalmente em áreas urbanas. Outro fator negativo para a utilização desta nova componente seria se, o contaminante, fosse aplicado diretamente abaixo da base do solo.

Figura 5 - Caracterização da componente S de acordo com sua textura.



Fonte: FOSTER *et al.*, (2006).

Os valores índices obtidos para os métodos GOD ou GODS estão dentro de uma faixa que varia de 0 a 1, podendo classificar o aquífero entre uma vulnerabilidade insignificante (0 – 0,1) até uma vulnerabilidade extrema à contaminação (0,7 – 1) de acordo com o Quadro 14.

Quadro 14 - Definição prática das classes de vulnerabilidade do aquífero.

Definição das Classes de Vulnerabilidade	
Classe de Vulnerabilidade	Definição Correspondente
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação.
Alta	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação.
Moderada	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados.
Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados.
Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação).

Fonte: FOSTER et al (2006).

4. MÉTODOS E MATERIAIS DA PESQUISA

Para a comparação entre os métodos de avaliação da vulnerabilidade natural de aquífero DRASTIC, AVI, GOD e GODS foram necessários um grande número de informações como: litologia do aquífero, profundidade do nível d'água, tipo de solo, área de recarga do aquífero, topografia da região, condutividade hidráulica, gradiente hidráulico, textura e espessura da zona vadosa, porosidade e tipo de aquífero. Com a interseção destas informações dentro de cada método, será possível delimitar as áreas de menor e maior risco de vulnerabilidade, servindo como uma importante ferramenta de auxílio para os gestores públicos e sociedade.

É importante ressaltar que “Os resultados apresentados nos mapas de vulnerabilidade mostram apenas valores relativos uns aos outros e não valores absolutos, fazendo com que comparações entre áreas distintas sejam às vezes difíceis” (GUIGUER & KOHNKE, 2002).

A metodologia utilizada neste trabalho foi subdividida em: levantamento bibliográfico, levantamento dos poços pré-existentes da área de estudo, cadastramento adicional de poços, determinação dos parâmetros DRASTIC, AVI, GOD e GODS, correlação e comparação entre os modelos de vulnerabilidade, seleção dos poços para análise de nitrato, coleta de amostras e determinação de nitrato e o uso e ocupação do solo.

4.1. Levantamento bibliográfico

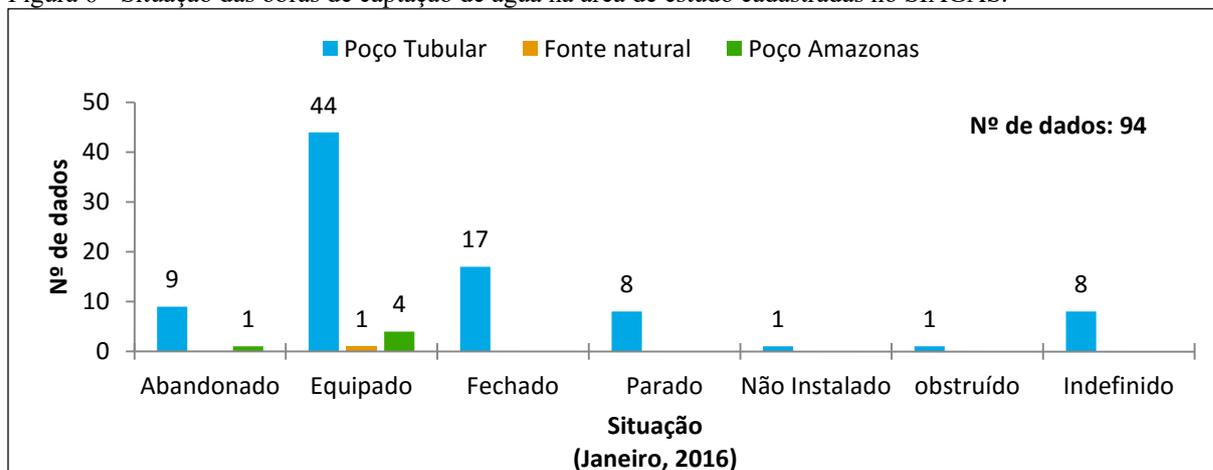
O levantamento bibliográfico foi a base inicial para o estado da arte sobre vulnerabilidade de aquíferos, assim como seus modelos e aplicação de cada método utilizado neste trabalho. Além do estudo sobre a conceituação de vulnerabilidade de aquíferos, esta fase inicial teve, como metas, a busca por informações das características geoambientais para a área de estudo, tais como: precipitação, geomorfologia, solos, vegetação e o conhecimento geológico e hidrogeológico da região de estudo.

4.2. Levantamento dos poços pré-existentes da área de estudo

De novembro de 2014, início do levantamento dos dados, até o presente a área de trabalho possui 94 poços cadastrados no SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas e, destes, 88 são poços tubulares, 5 são poços amazonas e 1 é do tipo fonte natural. A Figura 6 retrata a distribuição destes poços com suas respectivas situações, conforme

descrição do SIAGAS, exceto para os poços classificados como indefinidos, pois estes não possuem informação para a situação.

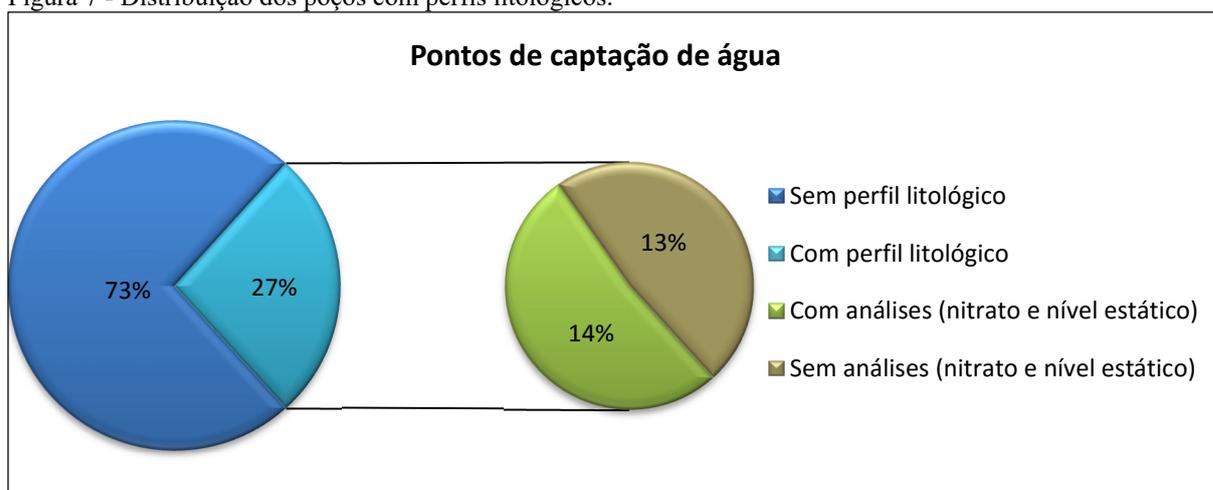
Figura 6 - Situação das obras de captação de água na área de estudo cadastradas no SIAGAS.



Fonte: O autor (2016).

Dos 94 pontos d'água cadastrados, apenas 25 (27%) foram selecionados, inicialmente, por apresentarem descrições de perfis litológicos, servindo, desta maneira, como base para as determinações do nível estático, nitrato e litologia do aquífero. Por outro lado, a utilização destes 25 poços com perfis litológicos foi comprometida por problemas relacionados à falta de acessibilidade, sendo que, destes, apenas 13 (14%) foram utilizados no trabalho (Figura 7) e mais 2 poços adicionais sem perfil litológico, totalizando 15 poços tubulares para medições de nível estático e nitrato.

Figura 7 - Distribuição dos poços com perfis litológicos.



Fonte: O autor (2016).

4.3. Cadastramento adicional de poços

Devido ao pequeno número de dados e, por falta de informações dos demais poços já cadastrados no SIAGAS, optou-se por cadastrar, em campo, novos pontos de captação de água durante o mês de novembro de 2014 e que, os mesmos, seguiram as premissas abaixo:

- a) Ampliar o número de poços do SIAGAS;
- b) Contornar problemas relacionados à acessibilidade aos poços previamente selecionados, ou seja, buscar poços adjacentes aos mesmos;
- c) Estabelecer uma configuração espacial que possibilite uma melhor distribuição entre as amostras, sem a necessidade de visitar grande parte dos mesmos, visto que, a maioria, está concentrada na sede do município e em seus arredores.

Seguindo estas premissas, esta etapa foi responsável pelo cadastramento de 42 novos pontos de captação de água. Além destes, também foram utilizados, para esta pesquisa, mais 15 poços pertencentes à base de dados do SIAGAS, mencionado no item 4.2, totalizando 57 poços.

4.4. Determinação dos parâmetros DRASTIC

Neste capítulo são apresentados os dados necessários para se elaborar o mapa da avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero pelo modelo DRASTIC, onde os valores obtidos serão aplicados diretamente na Equação 1 do item 3.4.1. Além dos parâmetros citados anteriormente como: profundidade do nível estático, recarga, litologia do aquífero, solo, topografia, impacto sobre a zona saturada e condutividade hidráulica, também foram levantados os dados de potenciometria e balanço hídrico. A potenciometria tem o intuito de se obter informações mais detalhadas sobre o nível estático do aquífero, já o balanço hídrico, a recarga do mesmo, sendo este último como forma de suprir a falta de etapas de campo inerente dos cortes orçamentários que impossibilitaram a aquisição de novas leituras.

4.4.1. Profundidade do nível estático - (D)

O nível estático foi estabelecido inicialmente através da interpolação pelo método do inverso das distâncias ponderadas (IDW - *Inverse Distance Weighted*) com a utilização do software ArcGIS 10.1 para as medidas de nível estático obtidas durante a etapa de campo, referente ao mês de novembro/2014. Contudo, a aplicação direta de métodos de interpolação para a geração de mapas de níveis estáticos ou potenciométricos a partir das medidas de campo

geram erros de medidas, ou seja, valores inexistentes nas regiões de vales, onde estes são completamente ignorados e, ao mesmo tempo, criando uma falsa direção de fluxo subterrâneo no caso dos mapas potenciométricos.

Uma maneira utilizada neste trabalho para a obtenção de um nível estático que acompanhe a superfície do terreno, contornando o problema da extrapolação dos níveis onde existem vales, consistiu na utilização das cotas das drenagens, subtraídas de um valor médio de 6 metros, valor este correspondente à média de profundidade para cacimbas existentes nas drenagens. Posteriormente, estes valores foram acrescentados aos valores de carga hidráulica. Com o resultado da junção dos dois conjuntos de valores foi possível gerar uma superfície potenciométrica que se encaixe à realidade da topografia da região.

A etapa seguinte se deu a partir da operação de subtração das cotas da superfície topográficas a partir dos valores de carga hidráulica da superfície potenciométrica. A resultante desta operação é a geração da superfície freática, ou seja, o nível estático.

A partir da obtenção do mapa de nível estático, foi possível delimitar os intervalos de classes de profundidade pré-definidos para este índice e, assim, definir os valores de classificação DRASTIC para o nível estático.

4.4.2. Recarga - (R)

De acordo com Villanueva *et al.* (2014) o balanço hídrico é, dentre muitas maneiras, uma das formas de se monitorar as oscilações de armazenamento da água no solo, fornecendo também estimativas da ETR (evapotranspiração real), da deficiência e do excedente hídrico de uma determinada região. Para Pereira *et al.* (1997), o cálculo do Balanço hídrico mostra a disponibilidade hídrica da região. Reichardt (1990) diz, de forma generalista, que este cálculo é uma forma de quantificar a água que entra e sai de uma camada de solo dentro de uma espessura L.

Para o estudo hidrogeológico de uma determinada região, o balanço hídrico pode ser utilizado como mais um tipo de ferramenta de aporte à mensuração da quantidade de água que entra e que sai de um aquífero. Para Castany (1975) é possível estimar as variações anuais do nível estático de um aquífero a partir do balanço hídrico. Lerner *et al.* (1990) ressaltam que os volumes precipitados podem ser convertidos diretamente em volumes de recargas quando os aquíferos são livres. Assim como Lerner (op. cit.), Villanueva *et al.* (2014) dizem que um aquífero possui uma recarga direta a partir da pluviometria que o abastece, uma vez que o aquífero seja livre e que não haja drenagens superficiais. É importante ressaltar que, mesmo não possuindo drenagens, os aquíferos livres podem ser recobertos por uma camada de solo

que, dependendo de sua espessura, textura e do volume de precipitação, pode não haver recarga no aquífero durante um determinado tempo, pois a água pode ficar retida no solo até superar seu índice de retenção.

Os cálculos para o balanço hídrico utilizados neste trabalho seguem a metodologia de Thornwaite & Matter (1955). Os dados utilizados para a determinação do balanço hídrico foram: Precipitação, evapotranspiração e a capacidade de água disponível no solo (CAD). Assim como Vasconcelos (2010), este trabalho efetuou o balanço hídrico a partir da análise dos dados através da planilha desenvolvida por Rolim *et al.* (1998). Os dados de precipitações utilizados pertencem às séries históricas das Estações Pluviométricas 340030 e 341033 localizadas, respectivamente, na sede municipal e no distrito de Pindoguába, ambos pertencentes ao município de Tianguá. Os dados de temperatura foram obtidos a partir da série histórica mensal entre os anos de 1990 e 1997 (EMPRAPA, 1998).

4.4.3. Litologia do aquífero - (A)

A determinação da litologia existente na área de estudo foi baseada na utilização dos 34 poços tubulares que possuem perfis litológicos descritivos, mencionados no capítulo 4.2. Como um parâmetro qualitativo dentro do modelo DRASTIC, o valor de classificação da litologia do aquífero seguirá as definições propostas no Quadro 5 do item 3.4.1.

4.4.4. Solo - (S)

A classificação do parâmetro de solos para o modelo DRASTIC foi realizada, inicialmente, com a utilização do mapa de solos, modificado do IPECE (2007) que será apresentado no item 5.3, seguindo as normas do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS. Os valores de classificação para cada tipo de solo existente na área de estudo foram determinados de acordo com o Quadro 6 do item 3.4.1.

4.4.5. Topografia - (T)

A determinação para classificação da topografia foi feita com base no mapa de declividade da área de estudo, gerado a partir do processamento do Modelo Digital do Terreno (MDT), mediante a utilização do software ArcGIS 10.1.

Para se obter a declividade do terreno, inicialmente, foram necessários dois procedimentos para o tratamento do MDT. Primeiramente, foram corrigidas pequenas imperfeições contidas na imagem a partir da utilização da ferramenta *fill* e, posteriormente, a

geração da declividade do terreno foi feita com a utilização da função *slope*, expressa em porcentagem. A partir desta última foi possível determinar os valores de classificação da topografia com base no Quadro 7 do item 3.4.1.

4.4.6. Impacto sobre a zona vadosa - (I)

As determinações para o impacto sobre a zona vadosa seguiram os mesmos princípios adotados na definição da classificação para a litologia, ou seja, baseou-se na utilização dos 34 poços tubulares que possuem perfis litológicos descritivos, mencionados no item 4.2. Desta maneira, os valores de classificação para o modelo DRASTIC, referente ao parâmetro do impacto sobre a zona vadosa, seguiu as definições propostas no Quadro 8 do item 3.4.1.

4.4.7. Condutividade hidráulica - (C)

Os valores de classificação para o parâmetro da condutividade hidráulica foram obtidos através da utilização dos resultados encontrados no trabalho de BARRETO (2006), referente à área de estudo, além dos poços tubulares pertencentes à base de dados SIAGAS que apresentam testes de vazões. As condutividades hidráulicas para os poços pertencentes ao SIAGAS foram obtidas a partir do trabalho de AGUIAR (no prelo), onde as análises dos testes de vazões foram feitas através da utilização do *software Aquitest* 2011.1. Com a junção dos dois grupos de condutividades hidráulicas (Quadro 15) foi possível definir o índice de classificação DRASTIC para o referido parâmetro, de acordo com o Quadro 9 do item 3.4.1.

Quadro 15 - Condutividade hidráulica da área de estudo.

Poço Código e/ou SIAGAS	Condutividade Hidráulica (m/d)	Fonte
2300021005	$1,5 \times 10^{-2}$	AGUIAR (no prelo)
2300021006	$9,74 \times 10^{-4}$	AGUIAR (no prelo)
2300021007	$7,01 \times 10^{-4}$	AGUIAR (no prelo)
2300021008	$1,35 \times 10^{-3}$	AGUIAR (no prelo)
P-32 / 2300021306	$1,02 \times 10^{-3}$	AGUIAR (no prelo)
P-33 / 2300021308	$8,592 \times 10^{-4}$	AGUIAR (no prelo)
2a	$5,8 \times 10^{-3}$	BARRETO (2006)
5a	$1,15 \times 10^{-3}$	BARRETO (2006)
9a	$1,8 \times 10^{-1}$	BARRETO (2006)
9b	$1,85 \times 10^{-1}$	BARRETO (2006)
10c	$5,65 \times 10^{-3}$	BARRETO (2006)
13	$2,45 \times 10^{-2}$	BARRETO (2006)
16	$6,9 \times 10^{-3}$	BARRETO (2006)
20	$6,95 \times 10^{-3}$	BARRETO (2006)

Fonte: AGUIAR (no prelo) e BARRETO (2006).

4.5. Determinação dos parâmetros AVI

O mapa de vulnerabilidade AVI para a área de estudo foi gerado a partir do produto entre a espessura da zona não saturada e a condutividade hidráulica da zona vadosa (Equação 2 do item 3.4.2).

4.5.1. Espessura da zona não saturada (d_i)

A espessura da zona não saturada foi representada pelo valor entre a superfície do terreno e o nível estático do aquífero. Desta maneira, este trabalho utilizou o mesmo princípio adotado no item 4.4.1, referente à determinação da profundidade do nível estático.

No entanto, a metodologia AVI não utiliza atribuição de valores para classificar os intervalos da profundidade não saturada do aquífero como o modelo de vulnerabilidade DRASTIC.

4.5.2. Condutividade hidráulica estimada (K_i)

A determinação da condutividade hidráulica para a área de estudo seguiu os mesmos princípios adotados no item 4.4.7, ou seja, utilizou os resultados encontrados no trabalho de BARRETO (2006) e as análises de AGUIAR (no prelo), ambos referentes à área de estudo (Quadro 16).

Diferentemente do modelo DRASTIC, onde a condutividade hidráulica recebe um valor de classificação, a metodologia AVI considera todos os valores para o cálculo da vulnerabilidade do aquífero. Como a área de pesquisa compreende apenas um tipo litológico, sendo esta, formada por arenitos do Grupo Serra Grande, optou-se pela utilização de um valor médio para a condutividade hidráulica, como pode ser observada no Quadro 16.

Quadro 16 - Condutividade hidráulica média para o método AVI aplicado à área de estudo.

Poço Código e/ou SIAGAS	Condutividade Hidráulica (m/d)	Fonte
2300021006	$9,74 \times 10^{-4}$	AGUIAR (no prelo)
2300021007	$7,01 \times 10^{-4}$	AGUIAR (no prelo)
2300021008	$1,35 \times 10^{-3}$	AGUIAR (no prelo)
P-33 / 2300021308	$8,592 \times 10^{-4}$	AGUIAR (no prelo)
2a	$5,8 \times 10^{-3}$	BARRETO (2006)
5a	$1,15 \times 10^{-3}$	BARRETO (2006)
10c	$5,65 \times 10^{-3}$	BARRETO (2006)
16	$6,9 \times 10^{-3}$	BARRETO (2006)
20	$6,95 \times 10^{-3}$	BARRETO (2006)
Valor Médio	$3,37 \times 10^{-3}$	

Fonte: AGUIAR (no prelo) e BARRETO (2006).

4.6. Determinação dos parâmetros para GOD e GODS

A determinação da avaliação da vulnerabilidade natural de aquífero para o modelo GOD, leva em consideração os parâmetros: grau de confinamento hidráulico da água subterrânea, litologia e espessura da zona vadosa. Para o modelo GODS, além dos parâmetros citados anteriormente, leva-se em conta o parâmetro solo.

4.6.1. Grau de confinamento da água subterrânea

O grau de confinamento foi definido com base nas análises dos testes de bombeamento feitas por AGUIAR (no prelo), referentes à área de estudo (Quadro 17). As análises mostraram que, em sua grande maioria, os testes de bombeamento se ajustaram melhores às curvas de HANTUSH, indicando um aquífero do tipo confinado com drenança. O resultado desta análise servirá como base para classificar o parâmetro, grau de confinamento da água subterrânea, de acordo com Figura 2 do item 3.4.3.

Quadro 17 - Valores de transmissividade e condutividade hidráulica.

Poço Código e/ou SIAGAS	Metodologia	T (m ² /h)	K (m/d)
2300021005	Hantush	$9,07 \times 10^{-2}$	$1,53 \times 10^{-2}$
2300021006	Hantush	$1,15 \times 10^{-2}$	$9,74 \times 10^{-4}$
2300021007	Hantush	$8,33 \times 10^{-3}$	$7,01 \times 10^{-4}$
2300021008	Hantush	$8,31 \times 10^{-3}$	$1,35 \times 10^{-3}$
P-32 / 2300021306	Hantush	$7,86 \times 10^{-3}$	$1,02 \times 10^{-3}$
P-33 / 2300021308	Hantush	$8,27 \times 10^{-3}$	$8,59 \times 10^{-4}$

Fonte: AGUIAR (no prelo). T - Transmissividade; K - Condutividade Hidráulica.

4.6.2. Ocorrência de estratos de cobertura

Assim como a metodologia DRASTIC (itens 4.4.3 e 4.4.6, respectivamente, litologia do aquífero e impacto sobre a zona vadosa), este parâmetro, também leva em conta o tipo de litologia do aquífero e, portanto, sua determinação consistiu na utilização dos 25 poços tubulares que possuem perfis litológicos descritivos, mencionados no item 4.2. O resultado desta análise servirá como base para classificar o parâmetro, ocorrência de estratos, de acordo com a Figura 2 do item 3.4.3.

4.6.3. Distância até o lençol freático

A distância até o lençol freático seguiu os mesmos princípios empregados no item 4.4.1, referente à profundidade do nível estático, diferenciando-se do referido item por não

possuírem os mesmos intervalos de classificação de profundidade. O resultado desta análise servirá como base para classificar o parâmetro, distância até o lençol freático, de acordo com Figura 2 do item 3.4.3.

4.6.4. Determinação do tipo de cobertura do solo

A determinação do parâmetro solo, para o modelo GODS, segue o mesmo princípio utilizado na classificação de solos para o modelo DRASTIC (item 4.4.4), ou seja, foi utilizado o mapa de solos, modificado do IPECE (2007), que será apresentado no item 5.3, seguindo as normas do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS. Os valores de classificação para cada tipo de solo existente na área de estudo foram determinados de acordo com Figura 5 do item 3.4.3.

4.7. Comparação entre os modelos de vulnerabilidade

A maioria dos métodos de avaliação da vulnerabilidade natural de um aquífero classificam os aquíferos de forma relativa, pois para cada ambiente hidrogeológico existente, há um grau de complexidade diferente, tornando-os únicos. Desta maneira, classificar os aquíferos de forma absoluta torna-se uma tarefa bastante difícil (HIRATA, 2001).

Apesar de Maia (2011) mostrar em seu trabalho que os modelos de avaliação da vulnerabilidade natural de aquífero não apresentam qualquer relação entre si, nem sempre pode ser seguida, pois tal afirmação se torna falsa para determinados casos, visto que, dependendo da escala de trabalho, resolução do alcance de cada modelo e geologia da região, os modelos podem apresentar resultados com certos níveis de correlação.

Como forma de comparação entre todos os resultados obtidos para cada modelo de vulnerabilidade proposto, o presente trabalho fez uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos entre todos os modelos, com o intuito de avaliar o comportamento dos mesmos para a área de pesquisa.

4.8. Seleção dos poços para análise de nitrato

É importante ressaltar que, na atual conjuntura que o país se encontra, durante todo o processo de elaboração e levantamento de dados para este trabalho, os recursos de financiamento para as campanhas de campo ficaram escassos, o que possibilitou, apenas, uma única leitura de nitrato para cada poço. Desta maneira, não foi possível tirar leituras médias durante o período de execução da dissertação. Por outro lado, esta única leitura para nitrato

pode ser utilizada como forma de comparação com trabalhos anteriores para verificar o aumento ou diminuição de suas concentrações na água, além de poder relacioná-las com o uso e ocupação do solo.

A escolha dos poços para serem realizadas as análises de nitratos baseou-se no cadastramento dos 42 poços feito em campo e nos 15 poços pertencentes ao SIAGAS, detalhados nos itens 4.2 e 4.3, sendo que, do total, apenas 54 foram utilizados para análises.

4.9. Coleta de amostras e determinação de nitrato

Durante a campanha de campo que teve duração de dez dias, as amostras foram coletadas em frascos de polipropileno de 50 mL, lavados previamente com água deionizada e, posteriormente, com a água do próprio poço. Após serem hermeticamente fechadas e identificadas, as amostras foram acondicionadas em um isopor com gelo para manter suas propriedades da hora da coleta e não as perder durante o transporte. As análises foram realizadas no término de cada dia de coleta e com intervalo inferior a 12 horas para determinação do nitrato. A Foto 1 mostra a coleta de amostra para análise de nitrato.

Foto 1 - Coleta de amostra para análise de nitrato.



Fonte: O autor (2016). Localização: Sítio Cacimbas, coordenadas UTM (WGS84) Y: 9581614 e X: 278708.

A metodologia para a determinação da concentração de nitrato foi baseada na utilização do fotômetro NOVA 60 (Foto 2), executado em campo. Este método baseia-se na absorvância e transmitância do comprimento do feixe de luz através da solução e segue os padrões rastreáveis ao NIST (Institute of Standards and Technology).

Os resultados obtidos por meio da utilização do fotômetro NOVA 60 foram expressos em mg/L de nitrato (NO_3^-) e convertidos para nitrato expresso como nitrogênio (N-

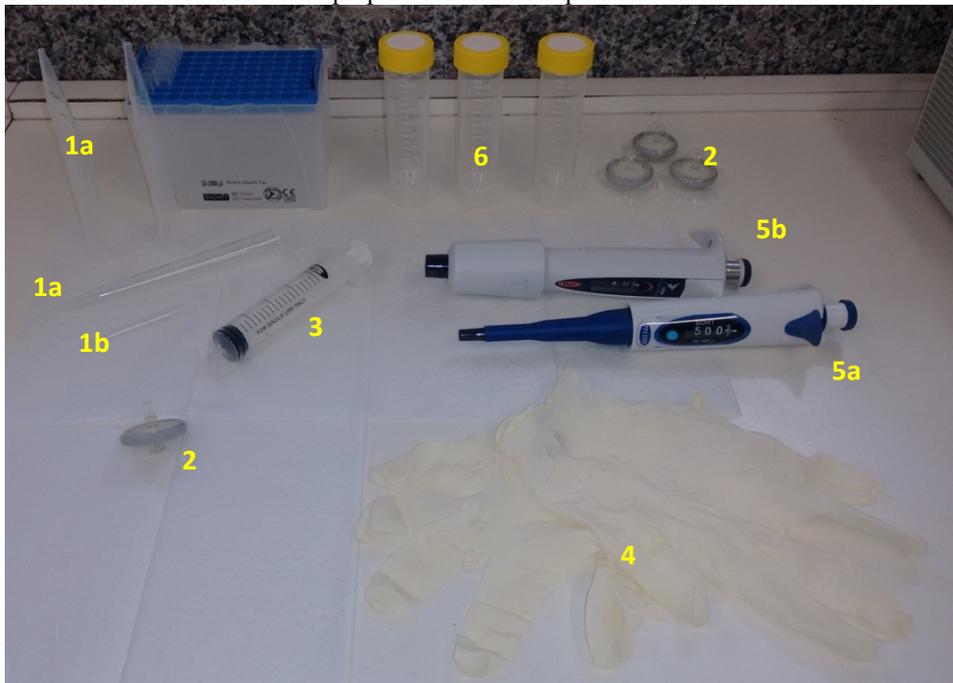
NO_3^-), de acordo com a Portaria do Ministério da Saúde do Brasil N° 2914 de 12/12/2011, onde o Valor Máximo Permitido (VMP) para N-NO_3^- é igual a 10 mg/L. As Fotos 3 e 4 apresentam os materiais utilizados para auxiliar na a determinação de nitrato.

Foto 2 - Fotômetro NOVA 60.



Fonte: O autor (2016).

Foto 3 - Material utilizado no preparo das amostras para análise de nitrato.



Fonte: O autor (2016). Legenda: 1 - Ponteiras para pipeta (a 1 - 10 ml; b 10 - 1000 µl); 2 - Filtro; 3 - Seringa; 4 - Luvas cirúrgica de vinil; 5 - Pipeta (a 1000 µl; b 10 ml); 6 - Tubo de ensaio de 50 mL.

Foto 4 - Reagente NO_3^{-1} e NO_3^{-2} utilizados durante o preparo das amostras.



Fonte: o autor (2016). 1 - Reagente NO_3^{-1} ; 2 - Reagente NO_3^{-2} ; 3 - auto seletor para nitrato (utilizado para selecionar a função de leitura para nitrato no fotômetro Nova 60); 4 - Água destilada (utilizada para configurar e ajustar o valor zero do fotômetro Nova 60); 5 - Cubeta de quartzo de 20 mL.

4.10. Uso e ocupação do solo

A determinação para o uso e ocupação do solo foi feita de duas maneiras:

- a) A primeira consistiu em delimitar, por meio de imagem de satélite, via Google Earth, com data de abril de 2014, as áreas com atividades agrícolas, assim como áreas urbanas e vegetações remanescentes.
- b) A segunda fase foi realizada com base nas atividades de campo, por meio da identificação pontual de aterros sanitários, lixões e cemitérios que possam causar contaminação ao aquífero.

Ao final do processo de elaboração dos mapas de vulnerabilidade natural de aquífero DRASTIC, AVI, GOD e GODS e, de acordo com o resultado apresentado pelos mesmos, foram aplicadas as camadas de uso e ocupação do solo para o modelo que melhor se adequou à área de pesquisa, a fim de confrontar os riscos que cada índice de vulnerabilidade apresentou com suas respectivas áreas de ocupação.

5. CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTAIS

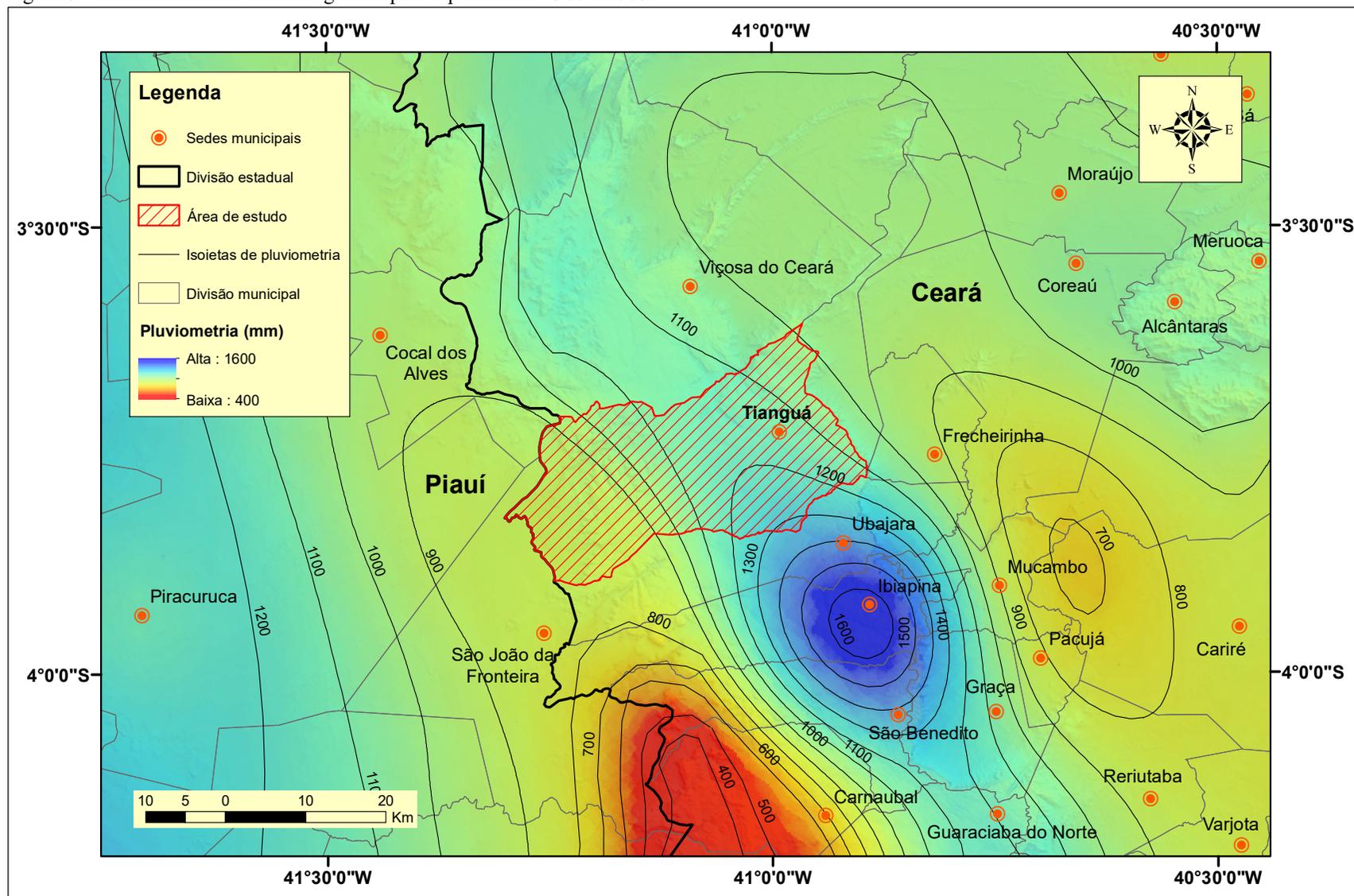
A caracterização geoambiental da região é de fundamental importância para a compreensão hidrogeológica do aquífero. As variações de precipitação, assim como geomorfologia, estruturação e composição dos solos e, até mesmo, a vegetação, estão ligadas diretamente com o comportamento do aquífero e podem interferir de maneira significativa na preservação do mesmo.

5.1. Precipitação

Devido a sua posição geográfica e, principalmente, por apresentar altitudes elevadas, próximo à borda da bacia e, em determinados pontos, altitudes superiores a 900 metros acima do nível do mar, recortados por vales, principalmente, cataclinais, a microrregião da Ibiapaba é fortemente favorecida por altas concentrações pluviométricas, superiores a 1000 mm/ano nas regiões mais elevadas e, próximo ao limite entre Ceará e Piauí, onde ocorrem diminuições topográficas, as médias históricas anuais são inferiores a 500 mm (Figura 8). As médias históricas para pluviometria estão datadas entre os anos de 1977 e 2006 (ATLAS PLUVIOMÉTRICO DO BRASIL, 2011). Com base nos dados de chuva e topografia, a região é dominada pelo clima tropical quente subúmido, mas nas sedes municipais de Guaraciaba do Norte e São Benedito, que apresentam as maiores elevações, os climas são do tipo tropical subquente úmido, passando para tropical quente úmido e, em direção ao Piauí, o clima passa a ser do tipo tropical quente semiárido brando.

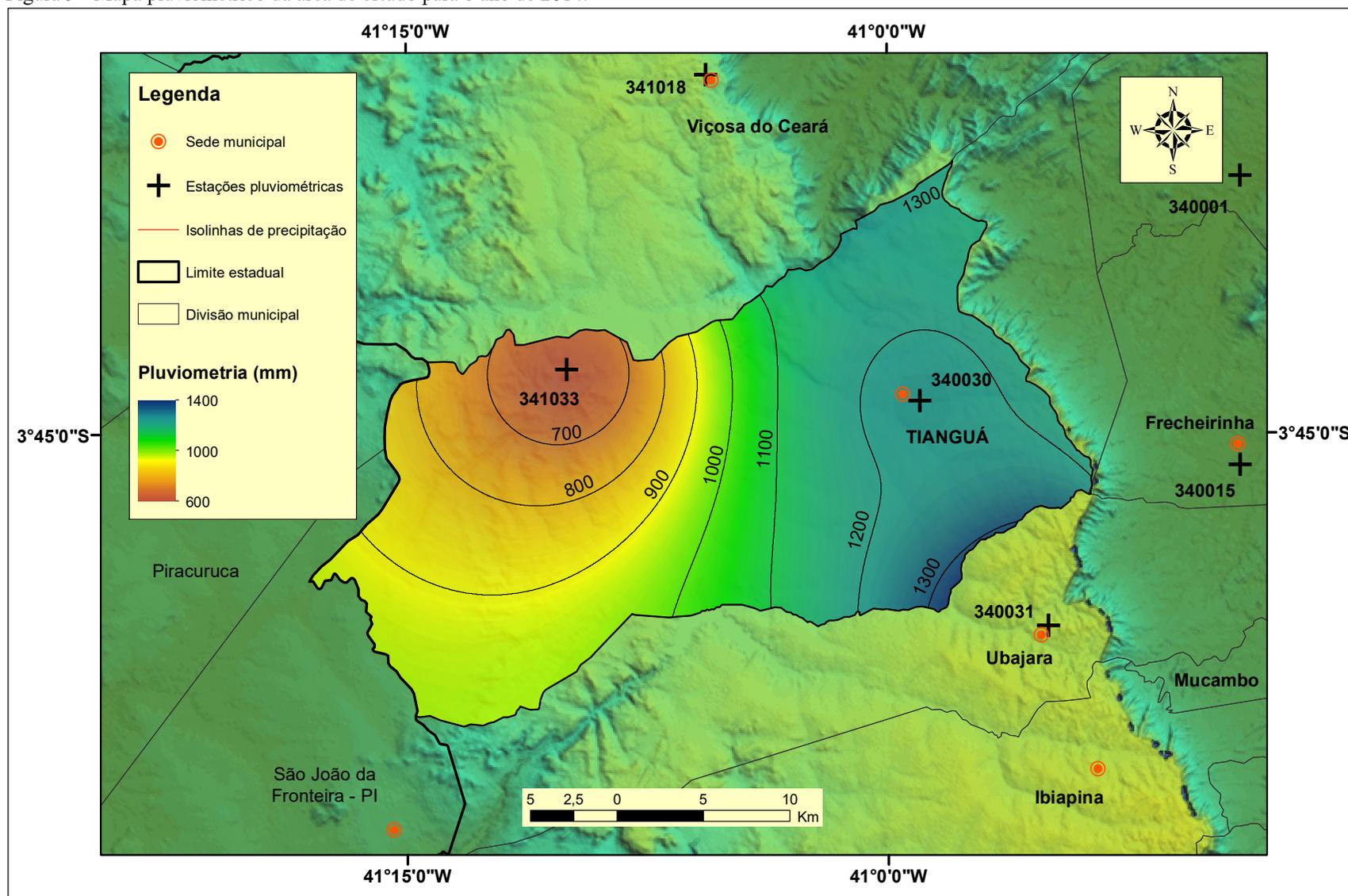
A Figura 9 mostra o mapa pluviométrico da área de pesquisa, confeccionado a partir das séries históricas das estações pluviométricas da FUNCEME, localizadas nos municípios de Tianguá, Viçosa do Ceará, Frecheirinha, Ubajara e Ibiapina. Os dados foram obtidos diretamente pelo Sistema de Informações Hidrogeológicas (HidroWeb) pertencentes a ANA (Agência Nacional de Águas). Tianguá conta com quatro estações pluviométricas, sendo que, apenas duas, possuem leituras acima de 20 anos. A estação 340030, localizada na sede, conta com leituras entre o período de 1912 a 2014, porém, os anos de 1932 e 1945 não possuem informações. A estação 341033 está localizada no distrito de Pindoguába e conta com dados do período de 1994 a fevereiro de 2014. As médias históricas anuais para estas duas estações são respectivamente 1216,9 mm e 623,66 mm. O mês mais chuvoso registrado pela estação 340030 foi janeiro de 1985 com precipitação de 2409,3 mm e abril de 1974 foi o mais chuvoso com 753,4 mm de acordo com as leituras da estação 341033. As Figuras 10 e 11 mostram o início da época chuvosa em dezembro com final entre junho e julho.

Figura 8 - Médias históricas anuais regionais para o período de 1977 a 2006.



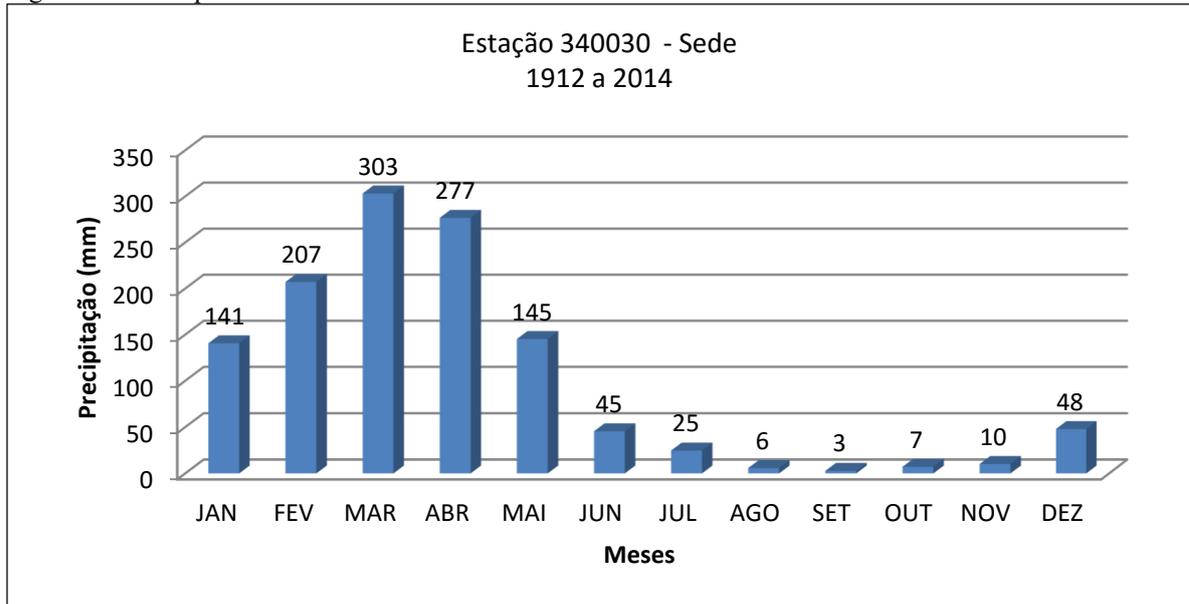
Fonte: Atlas Pluviométrico do Brasil (2011) modificado pelo autor.

Figura 9 - Mapa pluviométrico da área de estudo para o ano de 2014.



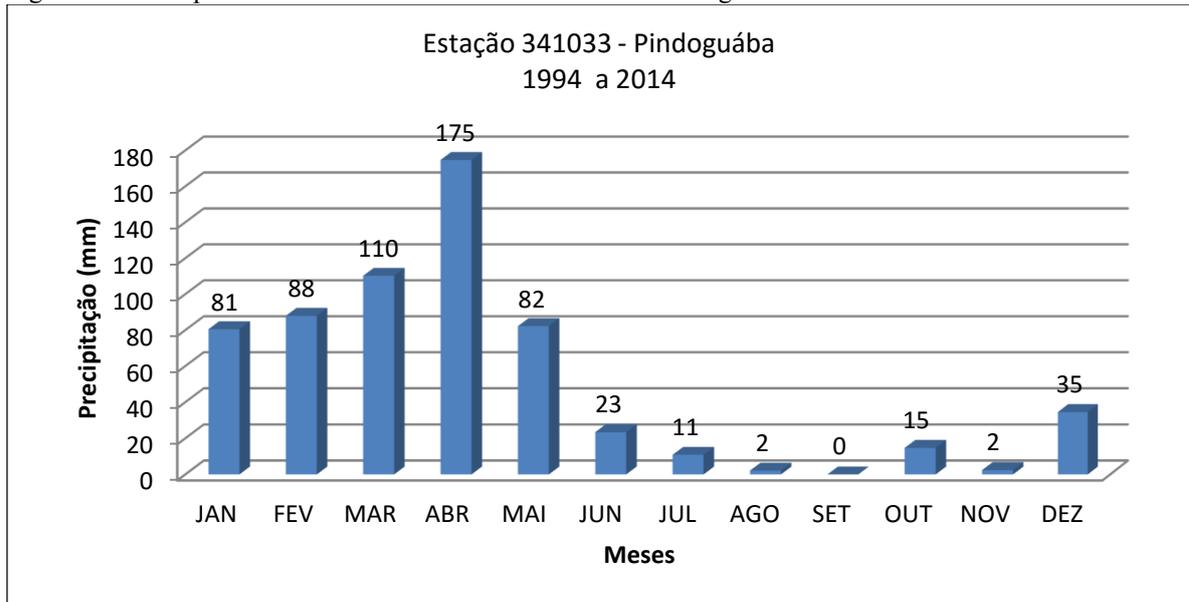
Fonte: O autor (2016)

Figura 10 - Série pluviométrica histórica da área de estudo - Sede.



Fonte: O autor.

Figura 11 - Série pluviométrica histórica da área de estudo - Pindoguába.



Fonte: O autor.

5.2. Geomorfologia

Destacando-se como uma das mais representativas formas de relevo do Ceará, o planalto sedimentar da Ibiapaba, constitui uma frente de declive íngreme, dissimétrica com reverso imediato estrutural, onde sua superfície cuestasiforme é limitada por uma escarpa erosiva (IMPLACE, 1997). Apresenta altitudes médias de 750 m acima do nível do mar e, podendo alcançar, altitudes superiores a 900 m em sua borda. Suas camadas apresentando mergulhos

suaves e inferiores a 5° W, recortados por inúmeros vales pedimentados de pequeno porte e, preferencialmente, de orientação cataclinal.

5.3. Solos

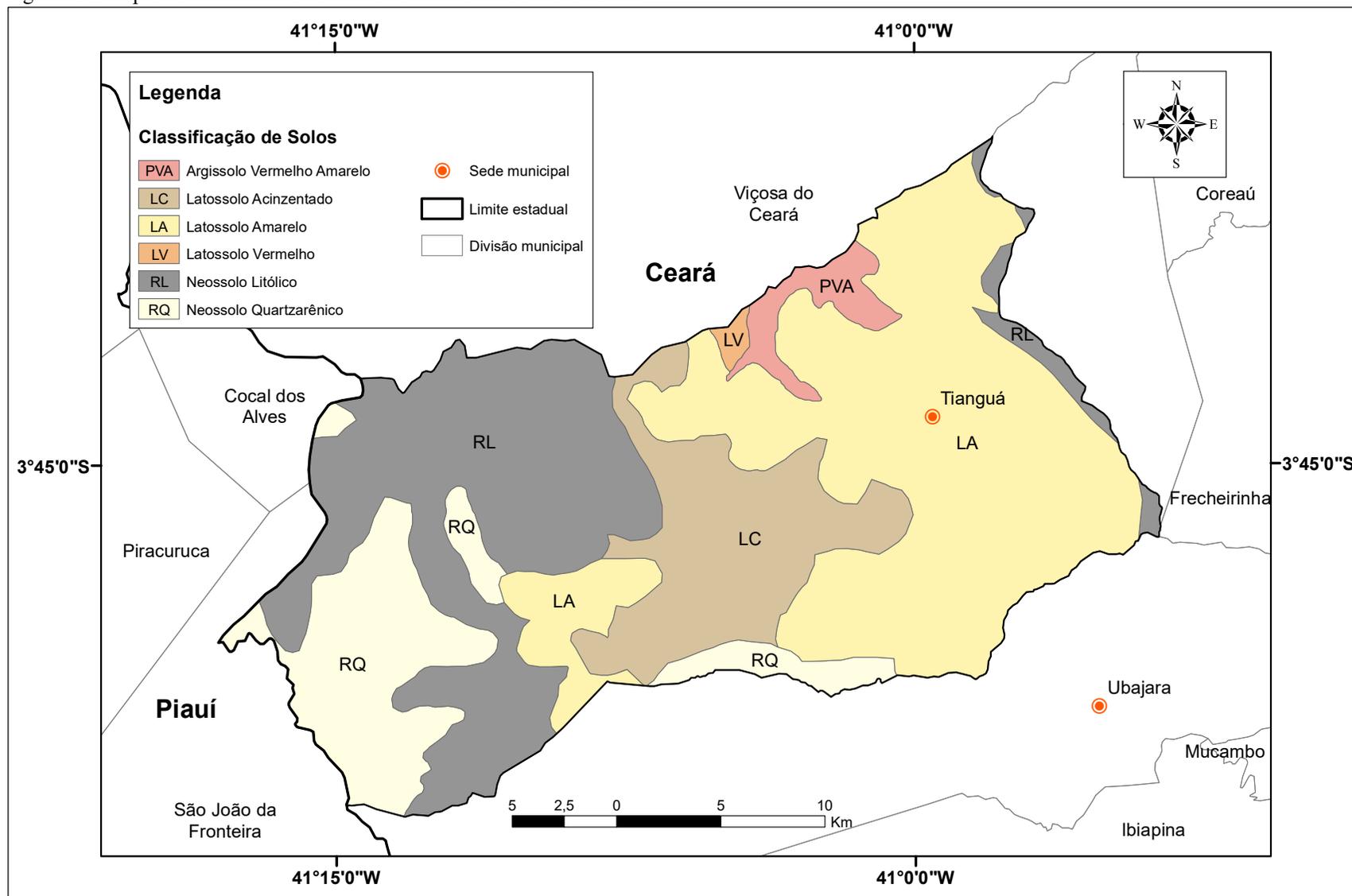
A área de estuda é composta por três tipos de solos: Neossolos, Argissolos e Latossolos (Figura 12) e, os mesmos, foram subdivididos e ordenados com base no mapa de classe de solos produzido pelo IPECE (2007) (Figura 13) para que se encaixe de uma maneira satisfatória ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS.

Os neossolos apresentam pouca utilização agrícola devido a sua baixa fertilidade natural. Esta classe possui duas subordens representadas pelos solos quartzarênicos e os litólicos. De acordo com a Embrapa (2014), os solos quartzarênicos são formados de rochas ou sedimentos de natureza essencialmente quartzosa. Sua textura é arenosa com profundidades inferiores a 1.5 m. Ocorre em relevos do tipo suave ondulado. É um solo com alta capacidade de drenagem, fertilidade natural muito baixa, baixo teor de matéria orgânica e com elevado risco a contaminação de águas subterrânea. Pode ser utilizado como substrato para a agricultura irrigada, pastagem, pecuária extensiva, preservação ambiental e como fonte de areia para construção civil. De acordo com Barreto (2006), as culturas de mandioca, fumo e abacaxi são de uso predominante nas áreas onde este tipo de solo ocorre. Os litólicos são, em geral, pouco espessos com contato lítico inferiores a 0.5 m. Sua ocorrência na área de estudo está associada às regiões mais escarpadas. Apresenta muitas limitações para o uso agrícola devido a sua pequena profundidade efetiva, baixa capacidade de armazenamento de água e alta susceptibilidade a erosão.

Os argissolos apresentam acúmulo de argila em subsuperfície, Horizonte B textural (Bt). São bem drenados e profundos a muito profundos. Apresentam boa capacidade de água e efluentes. Para Barreto (2006), o uso agrícola ocorre, preferencialmente, com milho, mamona, algodão, feijão, pecuária extensiva e culturas de subsistência.

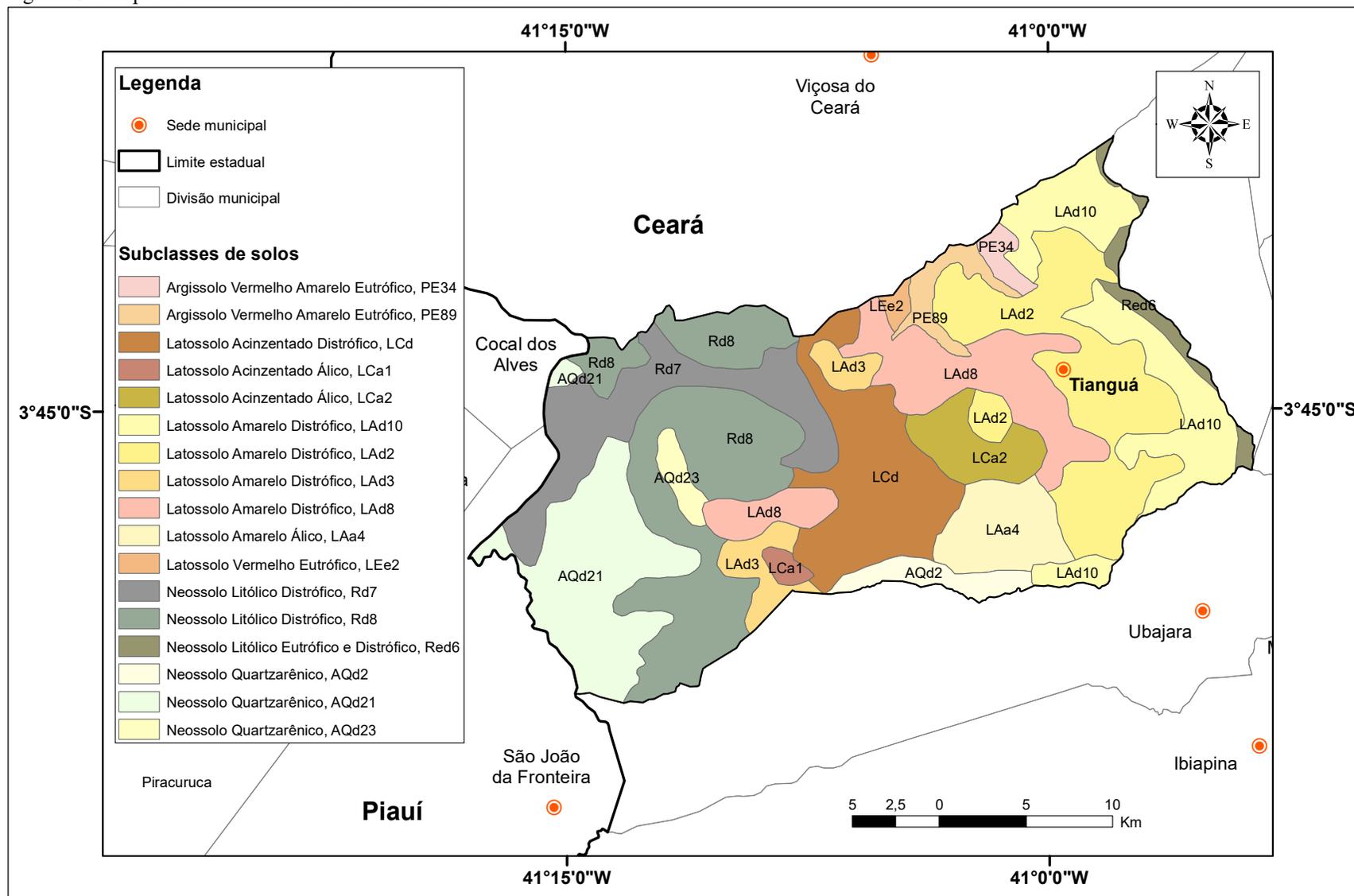
Os Latossolos estão localizados nas regiões com maiores incidências de chuvas, ou seja, nas áreas com maiores altitudes e nas zonas de escarpas e sua textura vai de média a argilosa, sendo bem drenado, alta porosidade, friável, bastante lixiviado, acentuado grau de alteração em profundidade, apresentando os níveis ABC com horizontes pouco diferenciados. Apesar de apresentar baixa fertilidade natural, pois seus solos são ácidos ou muito ácidos e com baixa soma de bases trocáveis, um grande número de culturas pode ser realizado, tais como, café, mandioca, milho, fruteiras e hortaliças.

Figura 12 - Mapa de solos da área de estudo de acordo com o novo SiBCS.



Fonte: Modificado pelo autor, a partir do mapa de solos do IPECE (2007).

Figura 13 - Mapa de subclasses de solos da área de estudo.



Fonte: Modificado pelo autor, a partir do mapa de solos do IPECE (2007).

5.4. Vegetação

A região possui duas unidades fito-ecológicas distintas. A primeira está localizada na porção leste, próximo às bordas da chapada e condicionadas, principalmente, pelas chuvas orográficas, devido as maiores altitudes. É representada pela unidade subperenifólia tropical plúvio-nebular (matas úmidas serranas) (Foto 5), composta por árvores de caules retilíneos, espessos, cobertos muitas vezes por líquens, orquídeas e bromélias, podendo alcançar 30 metros de altura.

Foto 5 - Vegetação do tipo mata úmida serrana.



Fonte: O autor (2016). Legenda: Foto retirada no Parque Nacional de Ubajara. O Parque ocupa uma área de aproximadamente 4.000 hectares e abrange parte dos municípios de Tianguá, Ubajara e Frecheirinha.

O segundo tipo de unidade fito-ecológica é representado pelo carrasco (Foto 6), localizado mais a oeste, onde os níveis pluviométricos são menores, composto por um grupo de arbustos densos de caules finos, muitas vezes cespitosos e por alguns tipos arbóreos (IPLANCE, 1997).

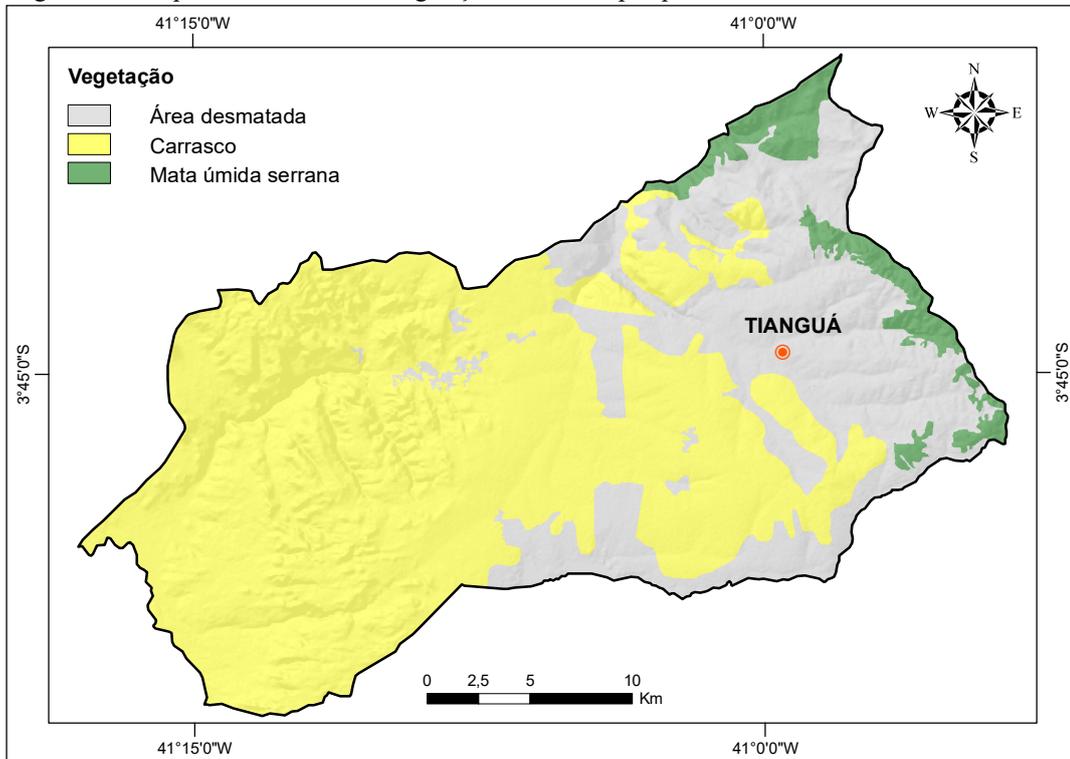
De acordo com o mapa de ocorrência da vegetação na área de pesquisa (Figura 14), além de podermos observar a distribuição dos dois tipos existentes de vegetação, o mapa ressalta, através da grande mancha de cor cinza, o desmatamento que ocorre na região provocado pelo aumento da ocupação territorial, principalmente para o desenvolvimento no setor da agricultura.

Foto 6 - Vegetação do tipo carrasco.



Fonte: O autor (2016).

Figura 14 - Mapa de ocorrência da vegetação na área de pesquisa.

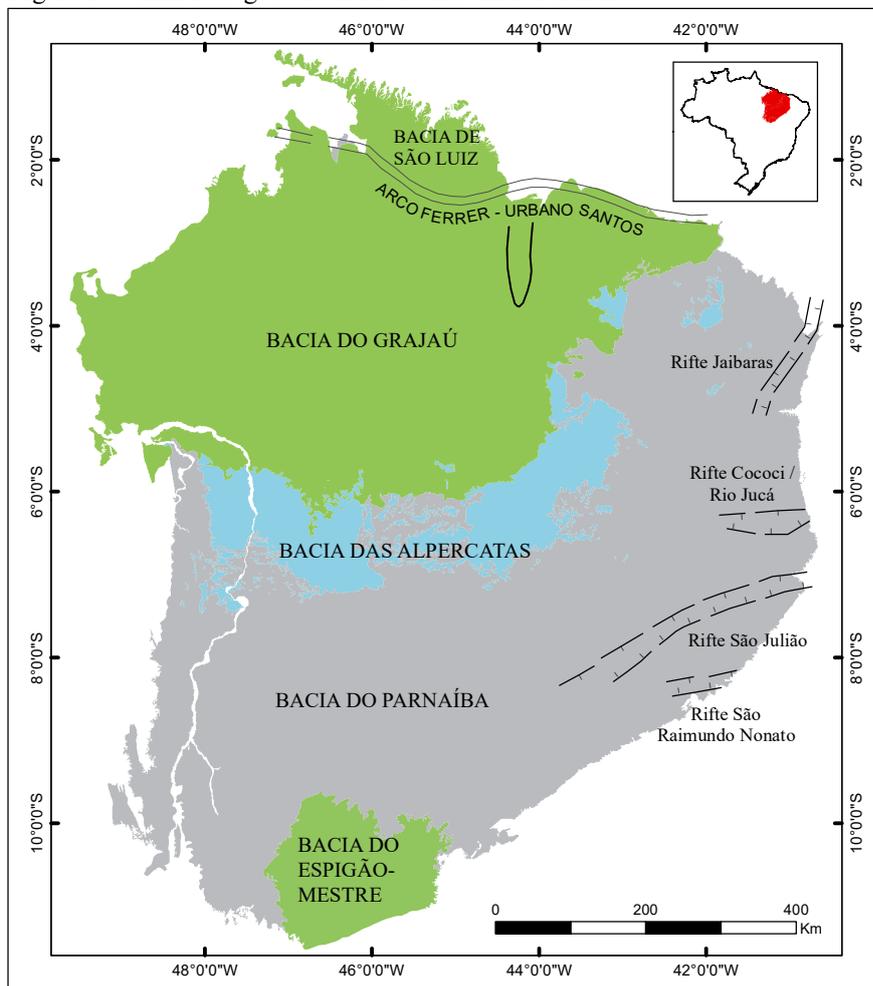


Fonte: o Autor (2016).

6. GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia Sedimentar do Parnaíba é parte integrante da Província Parnaíba, ocupando uma área de aproximadamente 377.980 Km² ou 69,5% da Província. De acordo com Augusto (2003) a Bacia do Parnaíba foi depositada sobre os riftes de idades cambro-ordovicianas do Jaibaras, Jaguarapi, Cococi/Rio Jucá, São Julião e São Raimundo Nonato (Figura 15) e engloba as superseqüências do Grupo Serra Grande (Siluriano), Grupo Canindé (Devoniano) e Grupo Balsas de Góes e Feijó (1994).

Figura 15 - Unidades geotectônicas da Província Parnaíba.



Fonte: modificado de Góes (1995), apud Augusto (2003).

Situada na região nordeste ocidental do território brasileiro e abrangendo, parcialmente, os estados do Piauí (55,11%), Maranhão (20,91%), Tocantins (21,44%), Pará (0,31%), Ceará (2,11%) e Bahia (0,13%). É uma bacia de origem intracratônica, cuja evolução foi caracterizada por uma deposição cíclica de seqüências arenosas e siltico-argilosas que deram origem a três sistemas aquíferos principais, conhecidos como Serra Grande, Cabeças e Poti-Piauí, com os Aquitardos Pimenteiros e Longá intercalados às formações arenosas.

Segundo Aguiar (2011), “A grande maioria dos estudos hidrogeológicos desenvolvidos na Bacia do Parnaíba foram concentrados na região centro-sul do estado do Piauí, mais precisamente no vale do rio Gurguéia, região bastante conhecida por seus inúmeros poços jorrantes. Destacam-se os estudos desenvolvidos pelo DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas) entre os anos de 1973 a 1990, AQUATER (1993) e BRUNETTI & PELLEGRINI (1999), dentre outros”.

6.1. Embasamento Cristalino

Kegel *et al.* (1958) agrupam as rochas pertencentes ao Embasamento Cristalino em dois grupos: O primeiro é formado a partir das rochas que compõem a Série Ceará, constituída por antigos xistos argilosos com quartzitos, arenitos e calcários transformados em mármore; o segundo ao Complexo Fundamental, constituído por gnaisses e xistos cristalinos.

As rochas definidas por Kegel *et al.* (1958) são constituídas por um grupo dominante de paragnaisses, ortognaisses em menor proporção, micaxistos, filitos, quartzitos, quartzitos-gnaiss e calcário cristalino.

Mabessone *et al.* (1971) ressaltam a presença de hornblenda-plagioclásio-biotita-gnaiss com direção E-W e mergulho de 35°S, localizado na estrada que liga Coreaú a Moraújo, biotita-gnaiss com direções N30° e N90°, a noroeste de Arapá, e gnaisses cataclásticos com presença secundária de fluorita, ametista, veios de quartzo e ferro ao longo do falhamento, sendo localizados na estrada entre Coreaú e Santa Luzia.

Para Ferreira (1972), o embasamento cristalino está situado na região de Dobramentos Brasileiros localizada na porção noroeste do Ceará e compreende antigas áreas cratônicas. Estas áreas foram rejuvenescidas juntamente com áreas dobradas pertencentes ao Ciclo Orogenético Brasileiro e sua estruturação é determinada por blocos limitados por falhas transformantes.

6.2. Grupo Serra Grande

Caputo & Lima (1984) utilizam a denominação Ipu, de Campbell (1949), para designar a base do Grupo Serra Grande. A Formação Tianguá denominada por Rodrigues (1967) se sobrepõe a Formação Ipú e representa um ambiente marinho raso durante a fase de máxima extensão da transgressão glacioeustática mundial que se seguiu à fusão do gelo no norte da África. Por fim, Caputo & Lima (op.cit.) colocam no topo do Grupo, a Formação Jaicós, anteriormente, denominada por Plummer *et al.* (1946), foi depositada em leques aluviais e

7. RECURSOS HÍDRICOS

Neste capítulo os recursos hídricos são subdivididos em águas superficiais e subterrâneas.

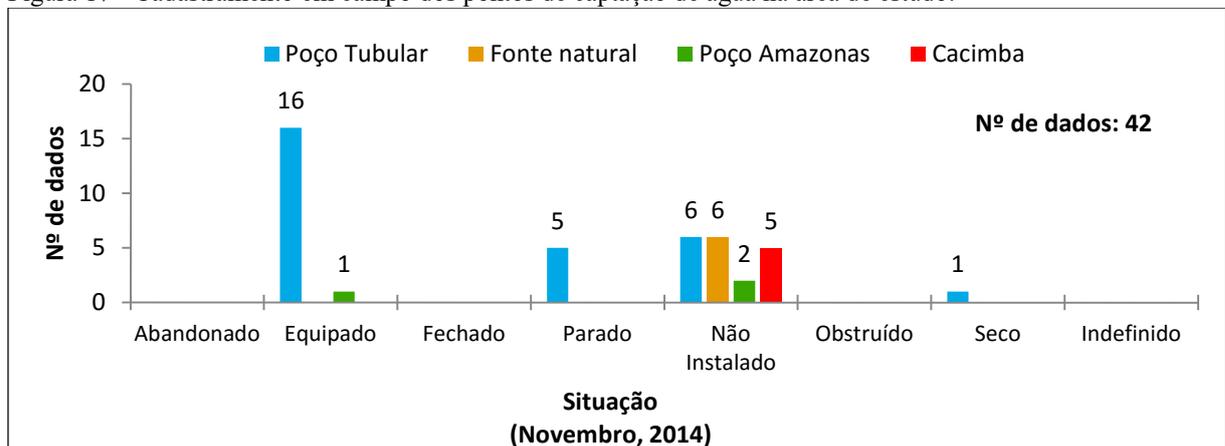
7.1. Águas Superficiais

Os recursos hídricos superficiais se concentram na utilização do açude Jaburu I, localizado na divisa entre Tianguá e Ubajara, sendo este responsável pelo abastecimento das cidades de Viçosa do Ceará, Tianguá, Ubajara, Ibiapina, São Benedito, Carnaubal e Guaraciaba do Norte, interligadas por adutoras. A capacidade máxima do reservatório é de $210 \times 10^6 \text{ m}^3$ e apresenta concentrações de cloretos inferiores a 250 mg/L (CEARÁ, 2008).

7.2. Águas Subterrâneas

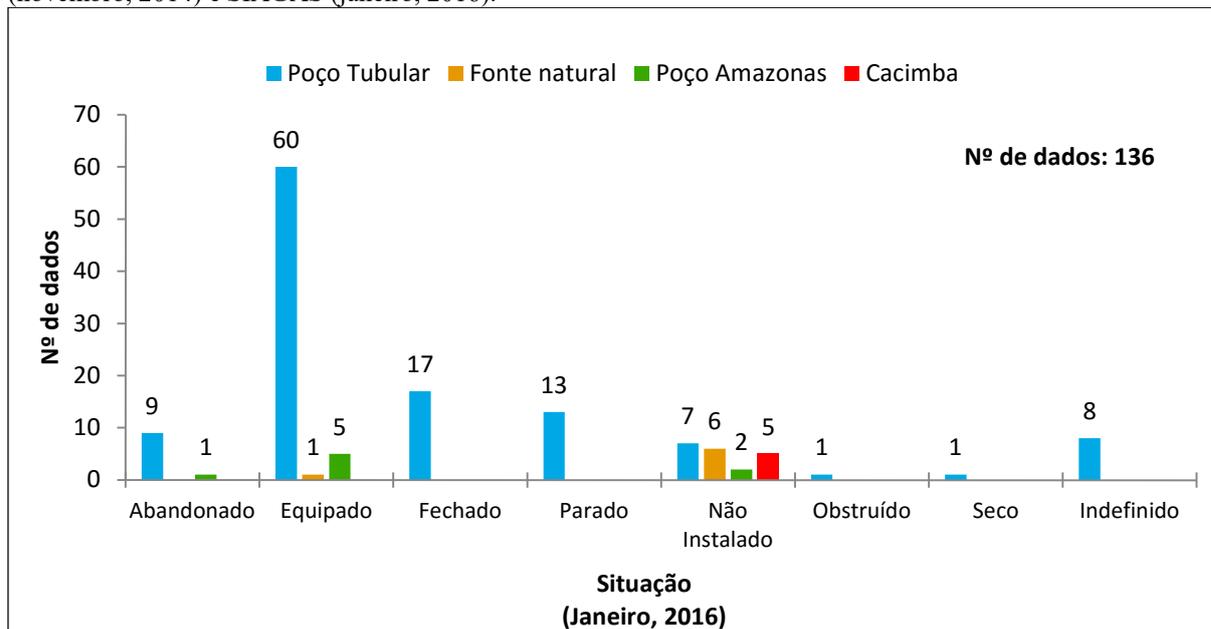
As águas subterrâneas do Aquífero Serra Grande são as principais fontes alternativas de abastecimento para a população local. Segundo informações pertinentes à base de dados do SIAGAS, referentes até o momento da publicação deste trabalho, a área pesquisada conta com 94 pontos d'água. Além destes, foram adicionados mais 42 pontos de captação de água durante a campanha de campo, realizada no mês de novembro de 2014 (Figura 17), totalizando 136, sendo 116 poços tubulares, 7 fontes naturais, 8 poços amazonas e 5 cacimbas (Figuras 18 e 19). As Figuras 17 e 18, assim como a Figura 6 do item 4.2, apresentam a distribuição dos poços com suas respectivas situações, conforme descrição do SIAGAS. É importante ressaltar que estes dados contabilizados não representam a quantidade real dos poços, pois durante este período de estiagem ocorreu um aumento significativo na construção de poços, tanto tubular quanto cacimbas.

Figura 17 - Cadastramento em campo dos pontos de captação de água na área de estudo.



Fonte: o autor (2016).

Figura 18 - Situação dos pontos de captação de água pertencentes à área de estudo, referentes a etapa de campo (novembro, 2014) e SIAGAS (janeiro, 2016).

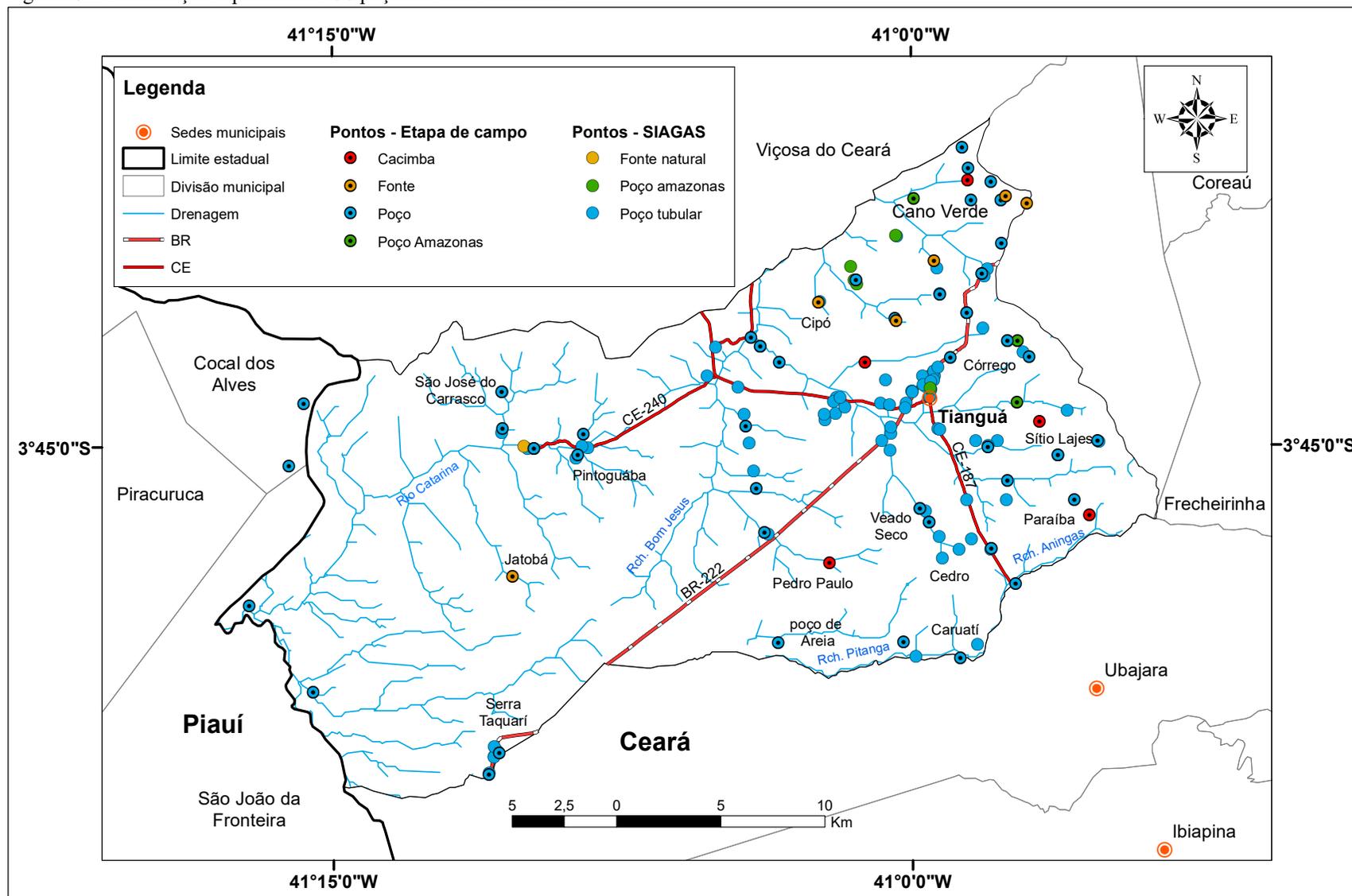


Fonte: O autor (2016).

O Aquífero Serra Grande ocorre livremente entre os limites do Ceará e Piauí, com maior área de exposição na porção noroeste do estado. Este aquífero é essencialmente formado por arenitos e conglomerados, com intercalações mais subordinadas de siltitos e folhelhos, com médio grau de fraturamento. Localmente, apresenta alto grau de consolidação, compactação e cimentação, que lhe atribui um comportamento similar ao fissural. No estado do Ceará encontra-se apenas a parte livre do aquífero, com 7.860 km², atuando como zona de recarga da unidade. Para AGUIAR & SOUSA (2014) esta área de recarga apresentou vazões médias entre 5 a 10 m³/h, podendo, localmente, apresentar vazões superiores a 10 m³/h. Sua espessura é de aproximadamente 100 metros na zona de recarga, apresenta vazão média de 5,5 m³/h e níveis estático e dinâmico médios aproximados de 33 e 57 metros, respectivamente. Suas águas são normalmente de boa qualidade química, com STD (Sólidos Totais Dissolvidos) em torno de 330 mg/L.

A recarga deste aquífero é feita através da infiltração pluviométrica direta, podendo levar consigo, contaminantes de diferentes tipos de fontes poluidoras, tais como: lixões, fossas sépticas, cemitérios, lançamentos de compostos orgânicos-sintéticos (tintas, solventes, plásticos, herbicidas, inseticidas, etc.) a atingirem o nível freático. Além destas fontes pontuais de poluição, o trabalho de Barreto (2006) evidencia a contaminação do aquífero através da utilização de pesticidas, tais como atrazina, simazina e metil paration.

Figura 19 - Distribuição espacial dos 136 poços na área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes aos modelos de avaliação da vulnerabilidade natural de aquífero DRASTIC, AVI, GOD e GODS, assim como nitrato, uso e ocupação do solo e a relação destes últimos com o modelo de vulnerabilidade que se mostrou mais adequado para a área estudada. A partir do que foi exposto anteriormente, o resultado deste trabalho vem com o intuito de auxiliar gestores e a sociedade no uso e ocupação mais eficiente do solo.

8.1. Avaliação da vulnerabilidade pelo modelo DRASTIC

A elaboração do mapa de avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação, pela metodologia DRASTIC, levou em consideração os parâmetros relacionados logo abaixo.

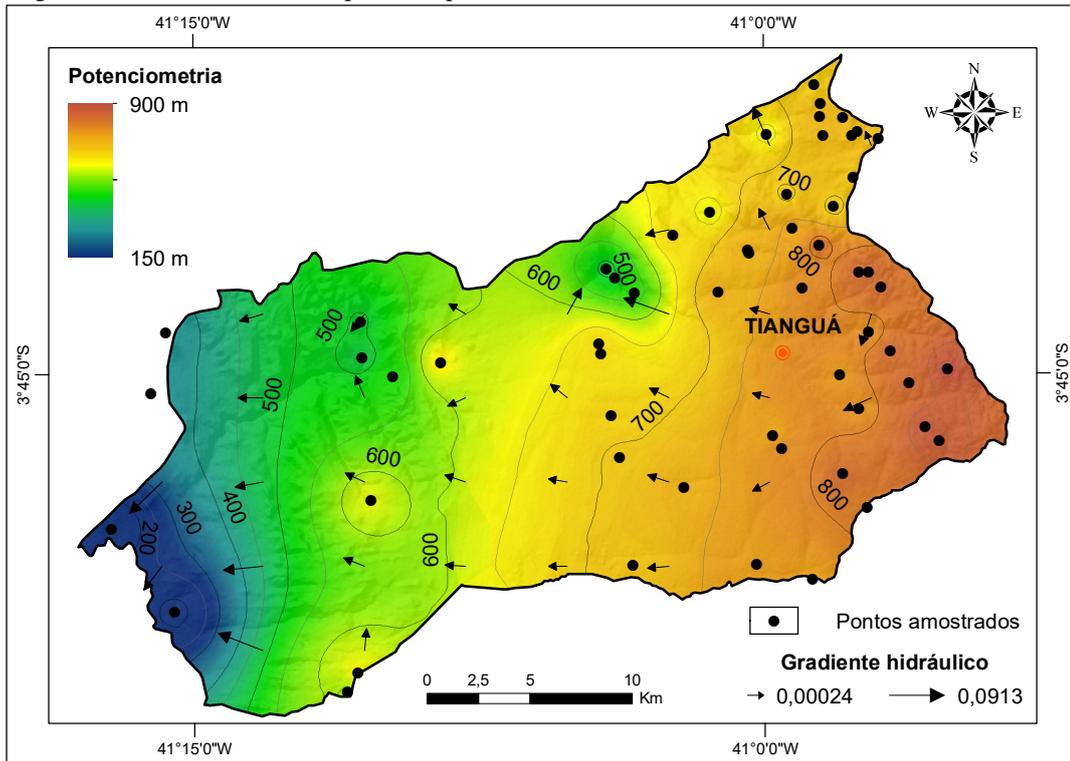
8.1.1. Profundidade do nível estático - (D)

Como uma forma de tentar produzir uma superfície freática mais próxima da realidade, buscando eliminar falsas representações gráficas criadas nas regiões representadas por vales, o presente trabalho utilizou o resultado entre a subtração do modelo digital do terreno (MDT) e a potenciometria.

Com base nas análises dos níveis estáticos pertencentes a área pesquisada, subtraídos de suas respectivas cotas topográficas, foi possível, inicialmente, com a utilização do software ArcGIS0.1, gerar um mapa potenciométrico pelo modelo de interpolação do inverso das distâncias ponderadas – IDW.

De acordo com a Figura 20, referente ao mapa potenciométrico gerado, o fluxo subterrâneo observado apresenta direção preferencial para oeste, ou seja, seguindo o caimento regional, referente à borda leste da Bacia do Parnaíba. No entanto, para escalas locais, esta resultante acaba, por sua vez, ocultando informações em regiões com a presença de vales, ou seja, criando superfícies potenciométricas “fantasmas”, superiores as cotas do terreno que está sendo analisado.

Figura 20 - Potenciometria simplificada para a área de estudo, referente ao mês de novembro/2014.



Fonte: O autor (2016).

Seguindo o que foi exposto no início deste item, foi necessário, além das cargas hidráulicas já calculadas, observadas no Quadro 18, um maior adensamento de pontos para se conseguir uma superfície potenciométrica que se ajuste de uma forma melhor ao terreno. Estes pontos adicionais (Figura 21) tiveram suas origens a partir da inserção pontual das cotas das drenagens e que, as mesmas, foram subtraídas de um valor médio, valor este referente as profundidades dos níveis estáticos de poços tubulares, poços amazonas, cacimbas ou fontes existentes nestas drenagens.

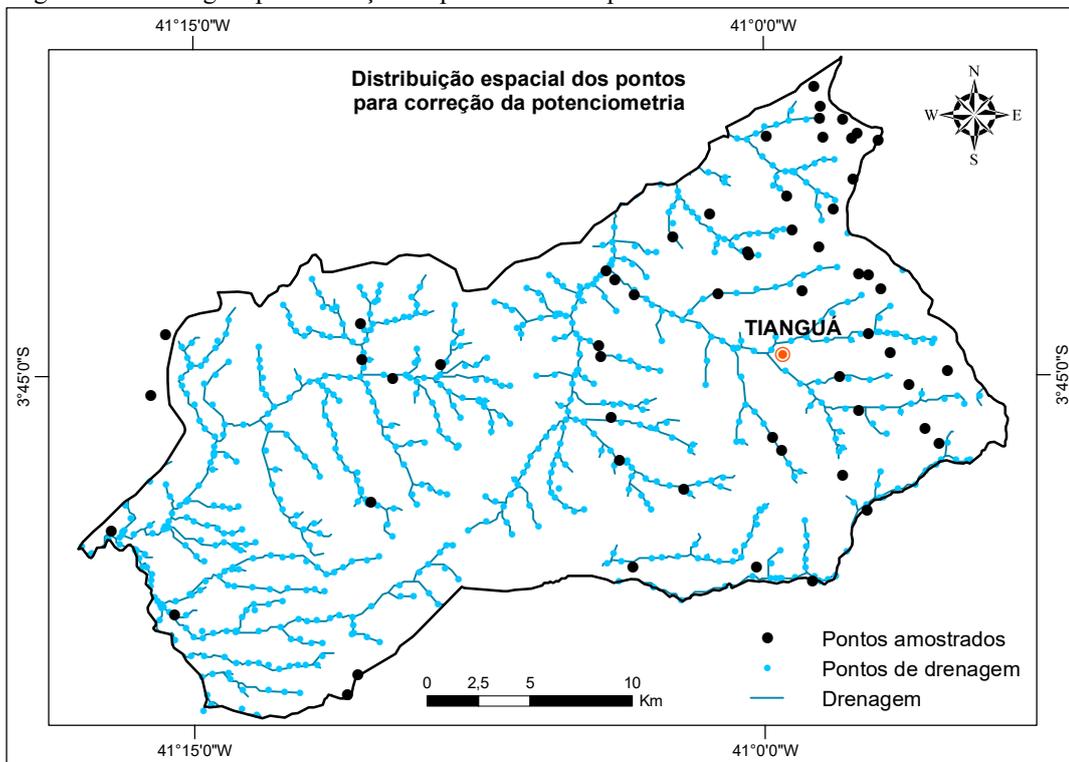
Quadro 18 - Cargas hidráulicas dos pontos amostrados.

Ponto	UTMN	UTME	Tipo	Cota	Nível estático	Carga hidráulica
EX-01	9594886	282185	Poço	709,06	12,70	696,36
EX-02B	9596798	283396	Fonte	707,01	0,00	707,01
EX-04	9597839	281682	Poço	740,99	9,99	731,00
EX-05	9596948	280716	Poço	740,01	17,57	722,44
EX-06	9597896	280541	Cacimba	748,01	8,35	739,66
EX-07	9598477	280573	Poço	716,97	7,35	709,62
EX-08	9597012	277959	Poço Amazonas	636,00	2,00	634,00
EX-09	9594059	278944	Fonte	692,08	0,00	692,08
EX-10A	9591333	277048	Poço	750,13	10,80	739,33
EX-10B	9591186	277111	Fonte	745,13	0,00	745,13
EX-11	9592069	273403	Fonte	680,08	0,00	680,08
EX-12	9589252	275621	Cacimba	746,16	2,76	743,40
EX-13	9590404	270150	Poço	501,08	16,00	485,08
EX-14	9589215	271523	Poço	558,11	24,00	534,11
EX-15	9590234	282945	Poço Amazonas	850,20	12,30	837,90
EX-16	9589497	283516	Poço	859,21	24,70	834,51
EX-17	9587326	282929	Poço Amazonas	775,26	3,70	771,56
EX-18	9586397	283994	Cacimba	841,28	6,60	834,68
EX-19	9585491	286786	Poço	911,26	21,45	889,81
EX-20	9581967	286387	Cacimba	872,37	5,40	866,97
EX-21	9582688	285679	Poço	885,37	17,00	868,37
EX-22	9583565	282473	Poço	795,39	23,00	772,39
EX-23	9578675	282863	Poço	828,50	23,00	805,50
EX-24	9575150	280202	Poço	774,49	10,15	764,34
EX-25	9575878	277481	Poço	788,44	22,00	766,44
EX-26	9575857	271476	Poço	727,28	20,65	706,63
EX-27	9579677	273936	Cacimba	750,31	8,40	741,91
EX-28	9585202	281518	Poço	770,33	4,00	766,33
EX-29	9581110	270810	Poço	734,21	29,08	705,13
EX-3	9596937	282128	Poço	762,01	29,10	732,91
EX-30	9583207	270418	Poço	717,18	28,17	689,01
EX-31	9586201	269913	Poço	698,13	17,83	680,30
EX-32	9586732	269811	Poço	690,12	17,92	672,20
EX-34	9579052	258701	Fonte	627,70	0,00	627,70
EX-35	9570593	258067	Poço	659,60	17,85	641,75
EX-36	9573528	249150	Poço	193,03	5,15	187,88
EX-37	9577613	246075	Poço	155,88	7,50	148,38
EX-38	9584261	247987	Poço	369,87	2,70	367,17
EX-39	9587240	248706	Poço	382,26	5,66	376,60
EX-3A	9597142	282378	Fonte	719,01	0,50	718,51
EX-40	9585809	262115	Poço	662,91	15,00	647,91
EX-41	9584797	261844	Poço	590,89	7,46	583,43
EX-42	9589428	279723	Poço	799,32	5,32	794,00
P-12	9584802	284897	Poço	878,32	41,80	836,52
P-17	9582250	278272	Poço	783,37	32,60	750,77
P-18	9581614	278708	Poço	810,39	18,10	792,29
P-19	9593154	275194	Poço	652,08	23,70	628,38
P-20	9585116	259756	Poço	562,79	34,30	528,49
P-21	9569604	257578	Poço	625,56	28,72	596,84
P-23	9580350	281686	Poço	867,48	36,16	831,32
P-28	9593454	281222	Poço	699,10	17,10	682,00
P-2A	9587828	258198	Poço	538,73	40,90	497,83
P-31	9592430	279210	Poço	804,12	47,24	756,88
P-32	9591586	280514	Poço	849,15	25,05	824,10
P-33	9590240	282479	Poço	860,20	22,75	837,45
P-34A	9586073	258253	Poço	539,72	57,10	482,62

Fonte: O autor, referente a etapa de campo (novembro, 2014).

A Figura 21 representa a drenagem da área de estudo e seus respectivos pontos de cota, pontos estes que tiveram seus valores de cotas diminuídos de seis metros para serem utilizados nas determinações de suas cargas hidráulicas, auxiliando, por sua vez, na geração de um mapa potenciométrico mais detalhado. Na mesma figura, podem ser observados dois padrões de drenagens. O primeiro e, com maior ocorrência, é do tipo dendrítico, localizado na porção centro-leste da área, associado às regiões mais aplainadas. O segundo tipo é uma combinação entre os padrões dendrítico e o paralelo, com menor ocorrência, situado mais a oeste da área, sendo este, associado às regiões mais inclinadas.

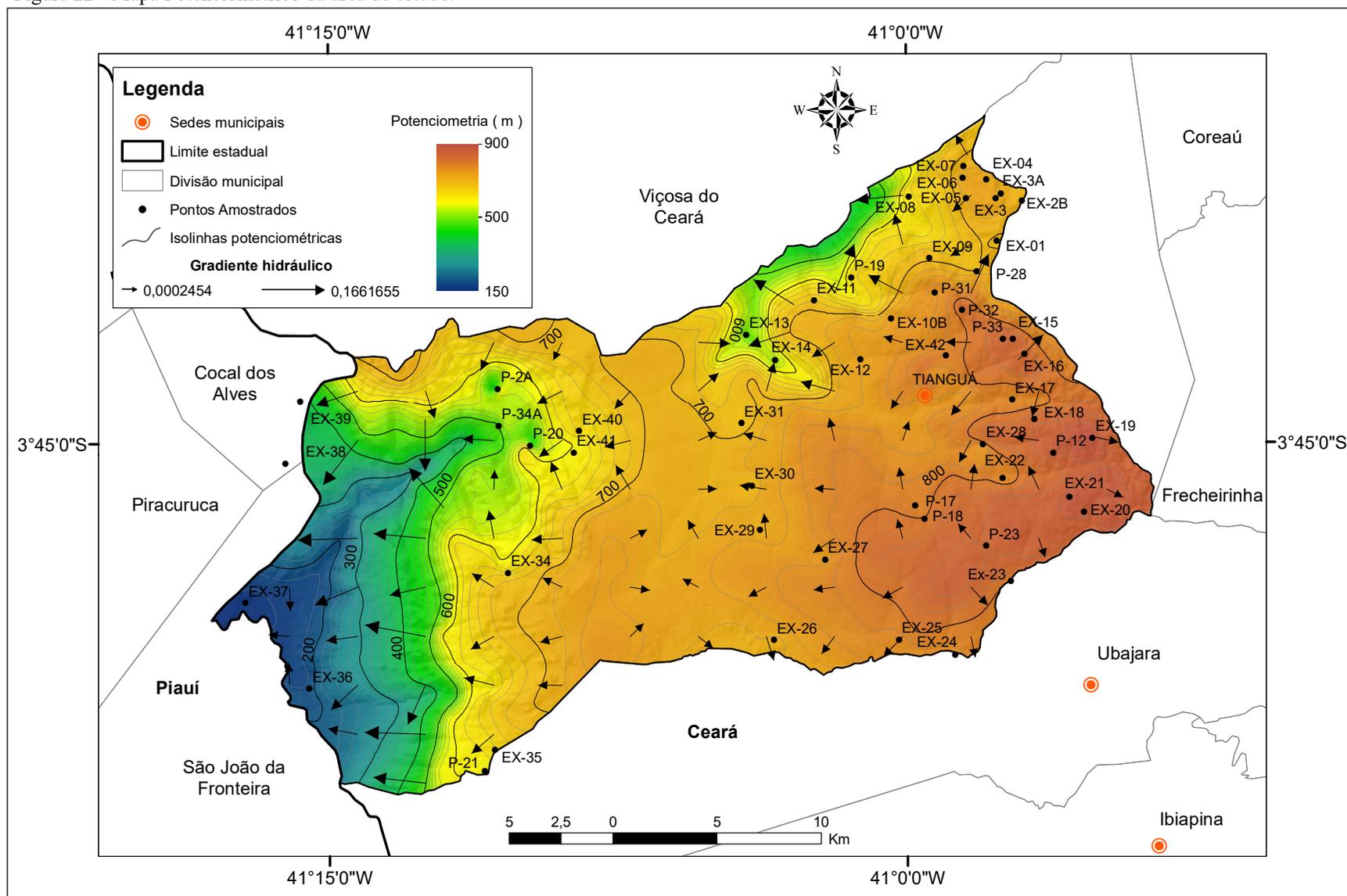
Figura 21 - Drenagem para correção da potencimetria pertencente a área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

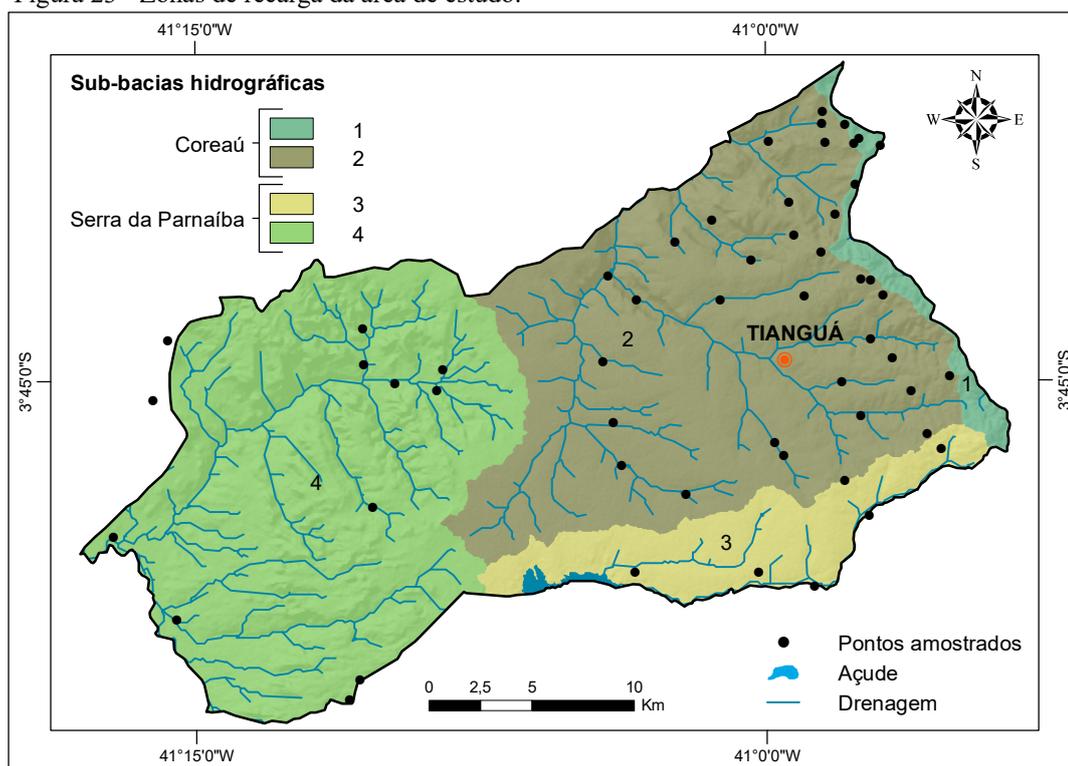
A resultante potenciométrica foi elaborada entre o final da estação seca e início da chuvosa (novembro, 2014), a partir da interpolação das cargas hidráulicas referentes aos pontos de drenagens e pontos amostrados (Quadro 18), podendo ser observada na Figura 22. Na referida figura, foram evidenciadas quatro zonas de recarga, das quais, originam-se as principais frentes de escoamentos subterrâneas da área pesquisada e que, estas, podem ser observadas mais facilmente na Figura 23.

Figura 22 - Mapa Potenciométrico da área de estudo.



Fonte: O autor. Potenciometria obtida a partir dos dados referentes à etapa de campo (novembro, 2014).

Figura 23 - Zonas de recarga da área de estudo.



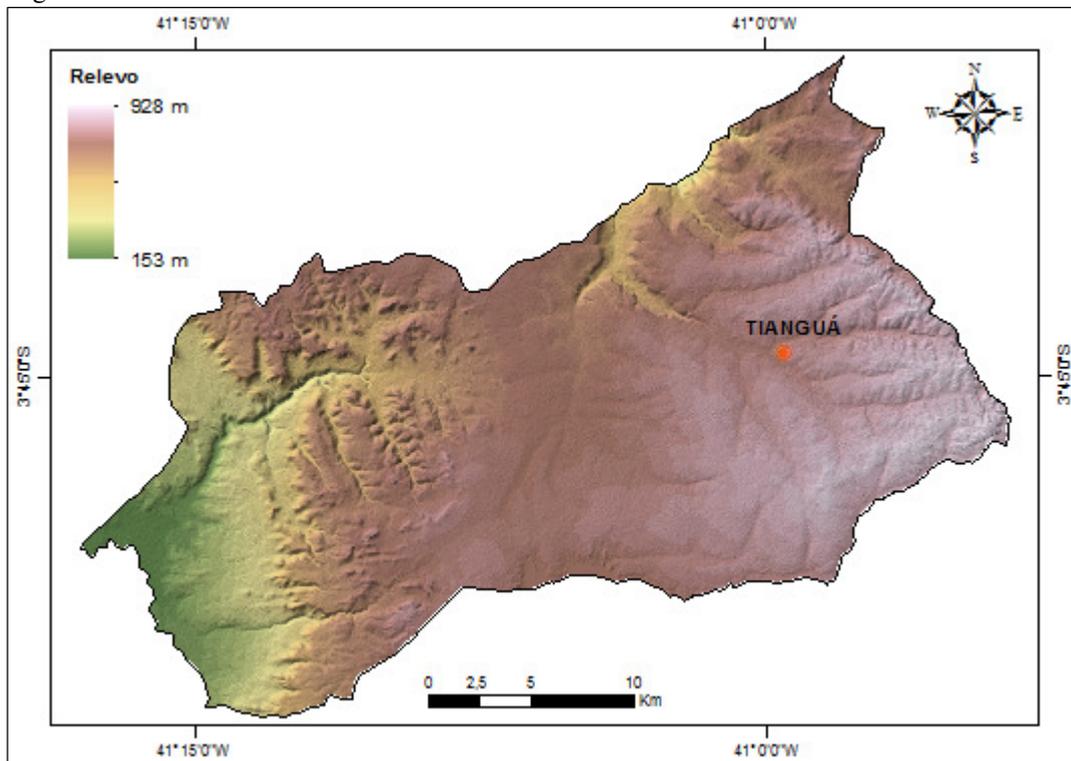
Fonte: O autor (2016).

As zonas de recarga 1 e 2 pertencem a sub-bacia hidrográfica de Coreau, onde a primeira está localizada na borda leste da Bacia do Parnaíba, ocupando 2,52% da área. Possui gradiente hidráulico moderado, com fluxo subterrâneo seguindo para leste. A segunda zona de recarga tem uma taxa de ocupação de 44,52%, localizada na porção centro-leste, converge seu fluxo para norte, em direção ao município de Viçosa do Ceará. Esta última, em sua maior parte, possui linhas de fluxo distantes, representando gradientes hidráulicos da ordem de 10^{-4} e 10^{-3} , o que favorece as condições de recarga do aquífero, no entanto, no limite com o município de Viçosa do Ceará, seu gradiente hidráulico passa para a ordem de 10^{-1} , condicionados pela topografia íngreme da encosta, dificultando a recarga.

As zonas de recarga 3 e 4 pertencem a Sub-bacia Hidrográfica da Serra da Parnaíba. A zona 3 ocupa 10,22% da área, localizada na porção Sudeste, converge seu fluxo subterrâneo para sul, em direção ao município de Ubajara e seus gradientes hidráulicos variam de 10^{-3} e 10^{-2} . Por fim, a quarta zona está localizada na porção oeste, ocupando 42,74% da área estudada e, evidencia, o fluxo regional, preferencial, de direção oeste, que converge para o Estado do Piauí. A zona 4 é fortemente marcada por gradientes hidráulicos da ordem de 10^{-1} e 10^{-2} devido à grande presença de vales escarpados, produzidos por intensos processos intempéricos e erosivos ao longo dos anos.

A Figura 24 representa o Modelo Digital do Terreno - MDT do planalto sedimentar da Ibiapaba, referente a área de estudo. Esta imagem foi utilizada no cálculo para a obtenção do nível Estático. No MDT pode ser observada uma variação topográfica em torno de 775 m, resultante entre a menor e maior cota. A área possui altitudes superiores a 900 m, nas proximidades com a borda leste da Bacia, decrescendo para valores em torno de 150 m, próximo ao limite oeste da área. Como mencionado no item 5.2, as camadas sedimentares possuem mergulhos suaves e, sendo estes, inferiores a 5° W, favorecendo o fluxo regional.

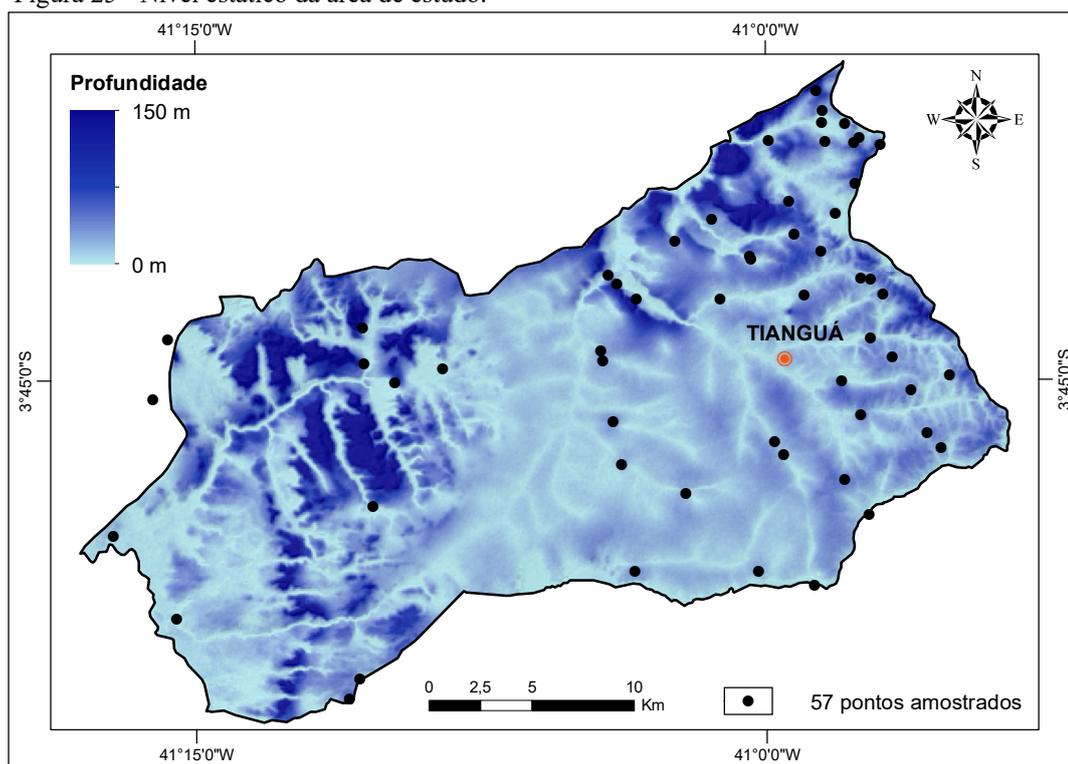
Figura 24 - MDT da área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

A Figura 25 representa a variação da profundidade do nível estático da área estudada, resultado da subtração entre o MDT e a potenciometria. Os valores obtidos estão dentro de uma faixa de 0 a 150 m, onde, as maiores profundidades estão associadas às áreas com inclinações mais acentuadas e, conseqüentemente, com os gradientes de maior ordem, ou seja, 10^{-1} . As menores profundidades estão associadas aos gradientes potenciométricos de menor ordem, 10^{-4} e 10^{-3} , concentradas, em sua maioria, na região central da área de estudo e, em menor proporção, nos vales ou calhas de rios e riachos.

Figura 25 - Nível estático da área de estudo.



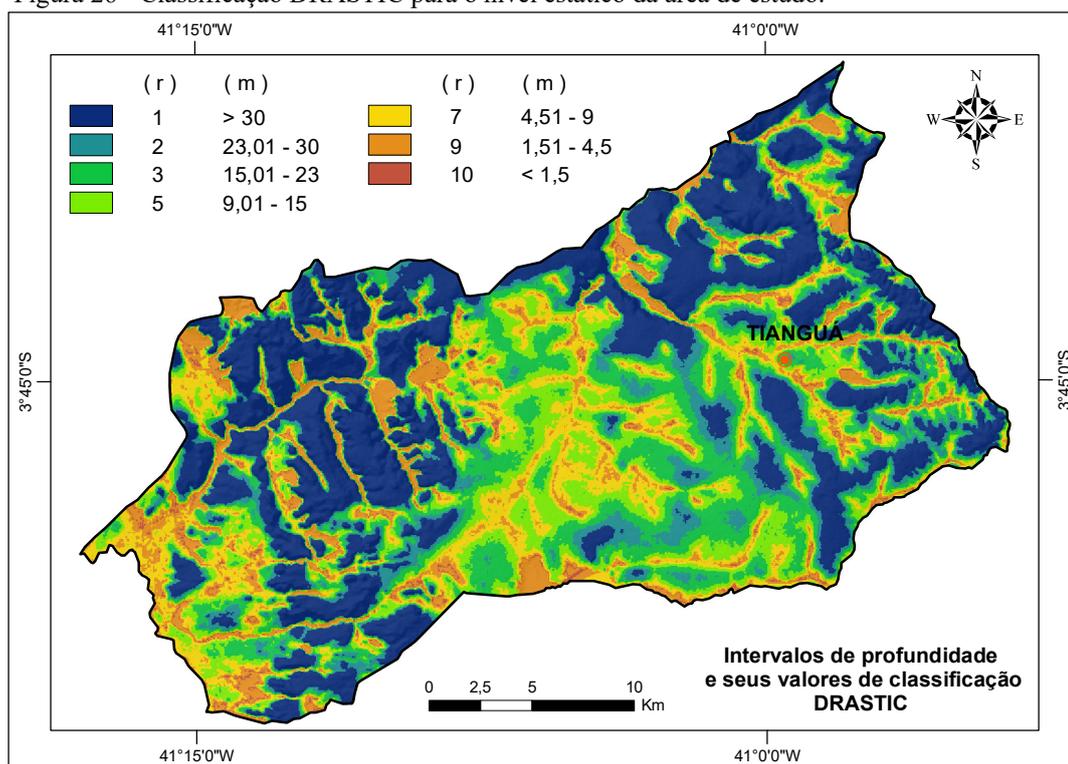
Fonte: O autor (2016).

A partir da obtenção do mapa de nível estático, foi possível delimitar os intervalos de classes de profundidade pré-definidos para este parâmetro e, assim, definir os valores de classificação DRASTIC para o nível estático. Na Figura 26 é possível observar as sete faixas de intervalos de classificação para a profundidade, sendo estas agrupadas em dois grupos de acordo com sua ocorrência.

O primeiro e, com maior expressividade, estão os valores acima de 30 m de profundidade. Abrangendo 32,18% da área estudada, são representando pelo valor de classificação 1 e distribuídos em duas porções, uma a leste e a outra a oeste, respectivamente, 15,49% e 16,69% de ocupação. São áreas onde se encontram as maiores altitudes, associados com as maiores inclinações e os maiores gradientes hidráulicos.

A segunda ocorrência é uma associação entre as classes 2 (9,92%), 3 (17,39%), 5 (15,79%), 7 (13,29%), 9 (10,34%), e 10 (1,09%), onde, somadas, perfazem 67,82% da área. A distribuição ocorre, principalmente, nas áreas com menor declividade, representada por regiões mais aplainadas da porção central e, em menores proporções, situada nos vales ou calhas de rios e riachos.

Figura 26 - Classificação DRASTIC para o nível estático da área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

8.1.2. Recarga - (R)

Os resultados obtidos para o parâmetro de Recarga podem ser observados a seguir, de acordo com as análises feitas, separadamente, para as duas estações pluviométricas citadas no item 4.4.2.

De acordo com os dados de pluviometria da Estação 340030, localizada na sede municipal de Tianguá, o cálculo para o balanço hídrico da porção leste da área de estudo apresentou déficit hídrico de 429,55 mm entre os meses de junho a janeiro e um excedente hídrico de 540,59 para os meses de fevereiro a maio, observados na Tabela 1 e Figura 27. Esse valor hídrico excedente ou infiltração efetiva (Ie) representa uma recarga potencial, ou seja, uma recarga disponível para o aquífero de 44,07% em relação à média pluviométrica histórica, sem levar em conta a declividade do terreno.

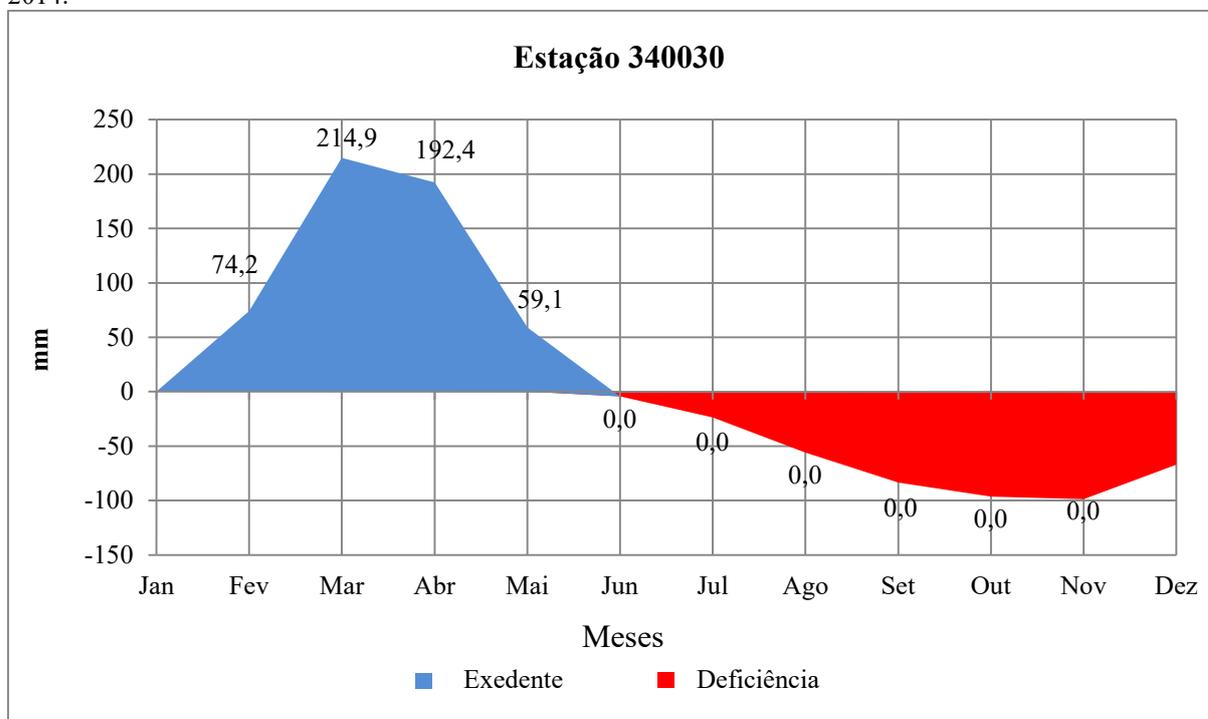
A taxa de reposição que ocorreu ficou em 99,47 mm para os meses de janeiro e fevereiro, que podem ser observados na Figura 28. Por outro lado, a ETR foi responsável pelo consumo de 686,10 mm/ano ou 55,93 % do valor da precipitação total. A Figura 29 mostra o balanço hídrico médio mensal para precipitação, ETP e ETR.

Tabela 1 - Valores referentes aos cálculos de balanço para a Estação Pluviométrica 340030 (Período de 1912 a 2014), localizada na sede municipal de Tianguá.

Meses	T °C	P mm	I	a	ETP mm	P-ETP mm	ARM mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Jan	23,00	141,70	10,08	2,70	94,89	46,81	47,31	94,89	0,00	0,00
Fev	22,40	209,00	9,68	2,70	82,11	126,89	100,00	82,11	0,00	74,20
Mar	22,50	306,30	9,75	2,70	91,38	214,92	100,00	91,38	0,00	214,92
Abr	22,40	279,00	9,68	2,70	86,60	192,40	100,00	86,60	0,00	192,40
Mai	22,20	145,70	9,55	2,70	86,63	59,07	100,00	86,63	0,00	59,07
Jun	21,50	45,70	9,10	2,70	76,43	-30,73	73,54	72,16	4,27	0,00
Jul	21,50	24,60	9,10	2,70	78,89	-54,29	42,73	55,41	23,48	0,00
Ago	22,10	5,90	9,49	2,70	85,33	-79,43	19,31	29,32	56,01	0,00
Set	23,50	2,80	10,41	2,70	98,24	-95,44	7,44	14,67	83,56	0,00
Out	24,00	7,20	10,75	2,70	108,38	-101,18	2,70	11,93	96,45	0,00
Nov	24,40	10,10	11,02	2,70	110,59	-100,49	0,99	11,81	98,78	0,00
Dez	24,50	48,70	11,09	2,70	116,18	-67,48	0,50	49,19	67,00	0,00
TOTAIS	--	1226,70	119,71	--	1115,65	--	594,53	686,10	429,55	540,59
MÉDIAS	22,83	102,23	--	--	92,97	--	--	--	--	--

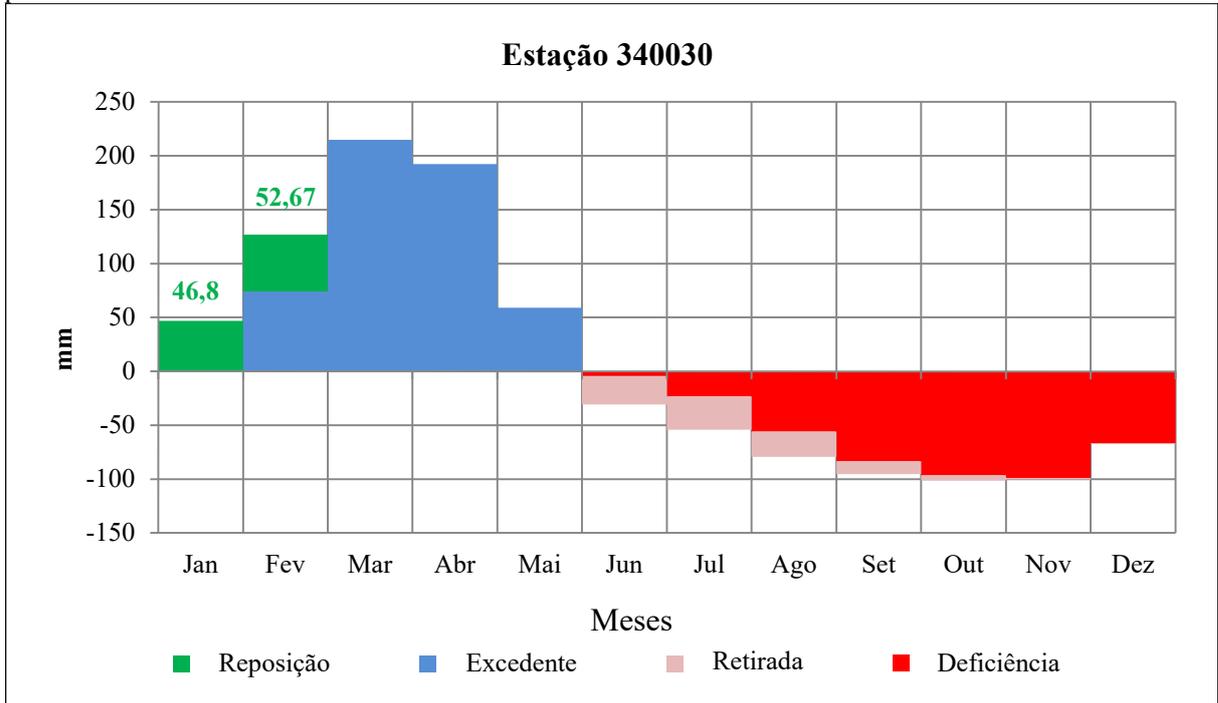
Fonte: O autor (2016). Legenda: T - temperatura; P - precipitação; I - índice térmico; a - constante; ETP - evapotranspiração potencial; ETR - evapotranspiração real; ARM - capacidade de armazenamento do solo; DEF - deficiência hídrica; EXC - Excedente hídrico.

Figura 27 - Estrato do balanço Hídrico mensal para a sede municipal de Tianguá, referente ao período de 1912 a 2014.



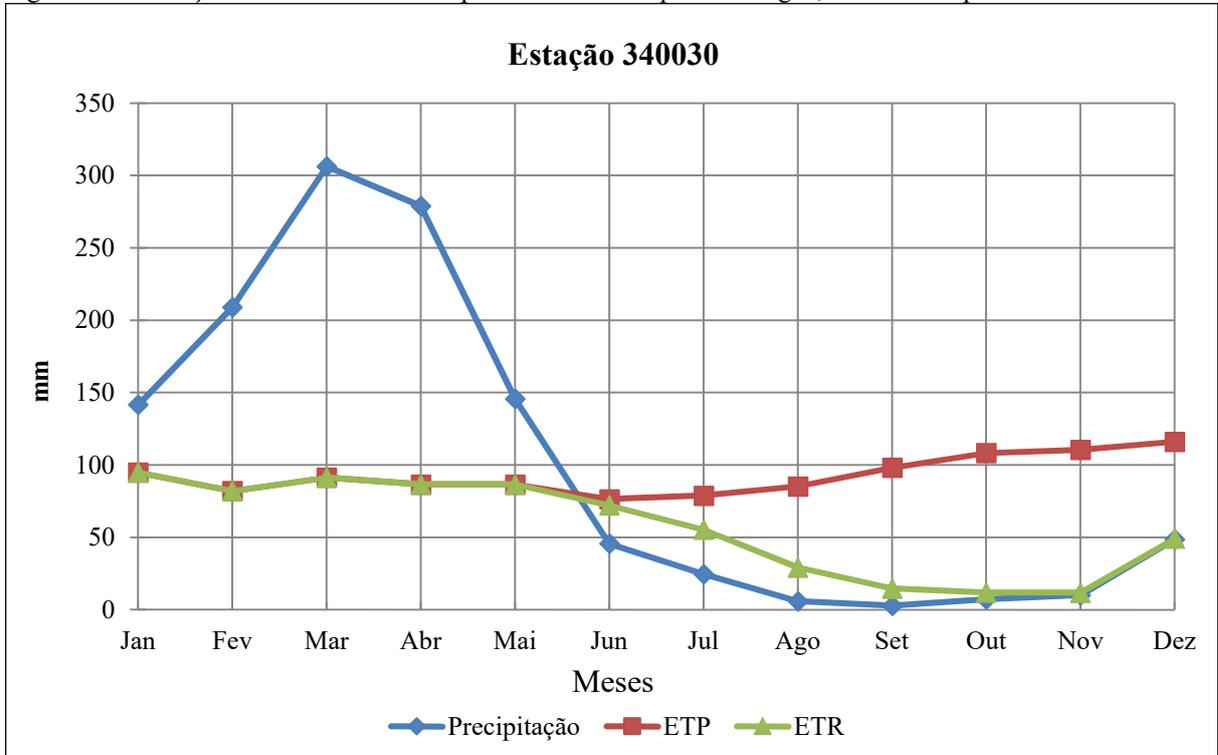
Fonte: O autor (2016).

Figura 28 - Deficiência, Excedente, Retirada e Reposição Hídrica para a sede municipal de Tianguá, referente ao período de 1912 a 2014.



Fonte: O autor (2016).

Figura 29 - Balanço hídrico médio mensal para a sede municipal de Tianguá, referente ao período de 1912 a 2014.



Fonte: O autor (2016).

O balanço hídrico, de acordo com os dados da pluviometria para a porção oeste de Tianguá, a partir da Estação Pluviométrica 341033, localizada no distrito de Pindoguába, se mostrou diferente do regime pluviométrico que atua na região leste da área estudada. O déficit hídrico calculado para a região oeste foi de 505 mm entre os meses de maio a janeiro e o excedente hídrico foi de, apenas, 13,01 mm ou 2,1% para o mês de abril, referente à média pluviométrica histórica entre os anos de 1994 e 2014, observados na Tabela 2 e na Figura 30.

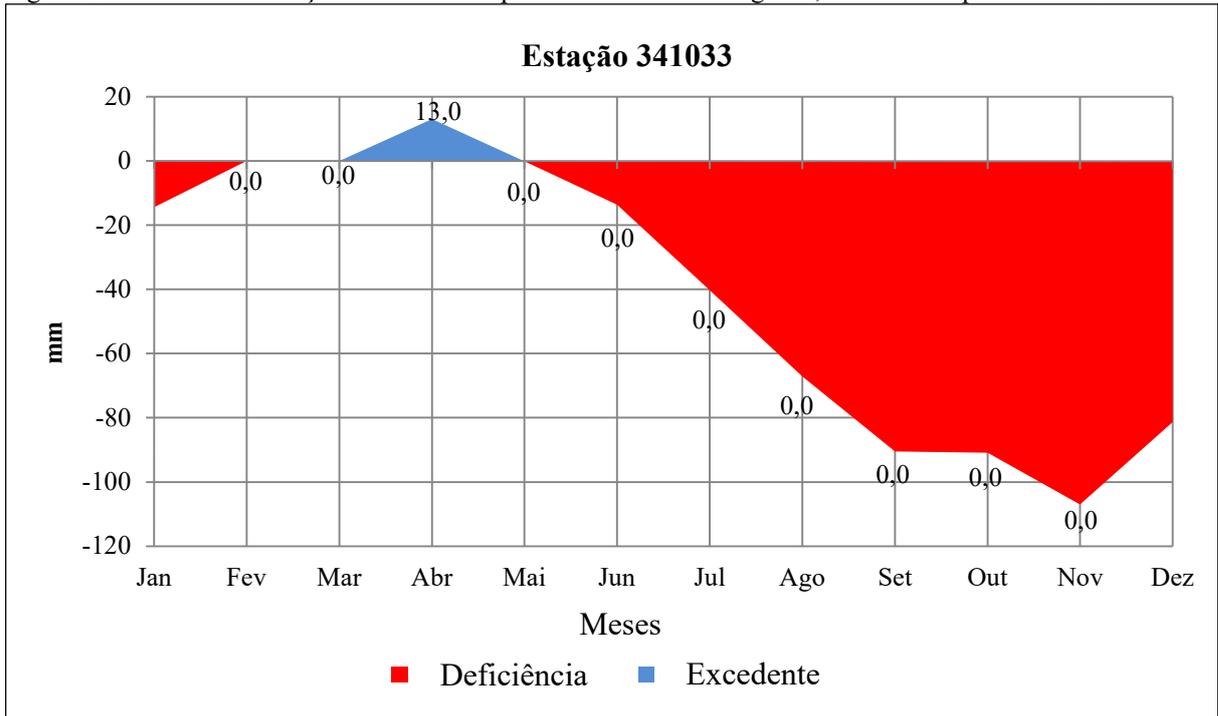
Para esta região houve uma reposição para os meses de fevereiro a abril de 99,76 mm que pode ser observado na Figura 31. Já o valor da ETR consumida foi de aproximadamente 610,65 mm anuais ou 97,9 % do valor da precipitação total. A Figura 32 mostra o balanço hídrico médio mensal para precipitação, ETP e ETR.

Tabela 2 - Valores referentes aos cálculos de balanço para a Estação Pluviométrica 341033 (Período de 1994 a 2014) localizada no distrito de Pindoguába.

Meses	T °C	P mm	I	a	ETP mm	P-ETP mm	ARM mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Jan	23,00	80,50	10,08	2,70	94,89	-14,39	0,24	80,54	14,35	0,00
Fev	22,40	87,95	9,68	2,70	82,11	5,84	6,07	82,11	0,00	0,00
Mar	22,50	110,24	9,75	2,70	91,38	18,86	24,93	91,38	0,00	0,00
Abr	22,40	174,67	9,68	2,70	86,60	88,07	100,00	86,60	0,00	13,01
Mai	22,20	82,21	9,55	2,70	86,63	-4,42	95,68	86,53	0,10	0,00
Jun	21,50	23,43	9,10	2,70	76,43	-53,00	56,32	62,79	13,64	0,00
Jul	21,50	10,87	9,10	2,70	78,89	-68,02	28,53	38,66	40,23	0,00
Ago	22,10	2,13	9,49	2,70	85,33	-83,20	12,41	18,24	67,09	0,00
Set	23,50	0,00	10,41	2,70	98,24	-98,24	4,65	7,77	90,47	0,00
Out	24,00	14,71	10,75	2,70	108,38	-93,67	1,82	17,54	90,85	0,00
Nov	24,40	2,42	11,02	2,70	110,59	-108,17	0,62	3,62	106,97	0,00
Dez	24,50	34,53	11,09	2,70	116,18	-81,65	0,27	34,87	81,31	0,00
TOTAIS	--	623,66	119,71	--	1115,65	--	331,54	610,65	505,00	13,01
MÉDIAS	22,83	51,97	--	--	92,97	--	--	--	--	--

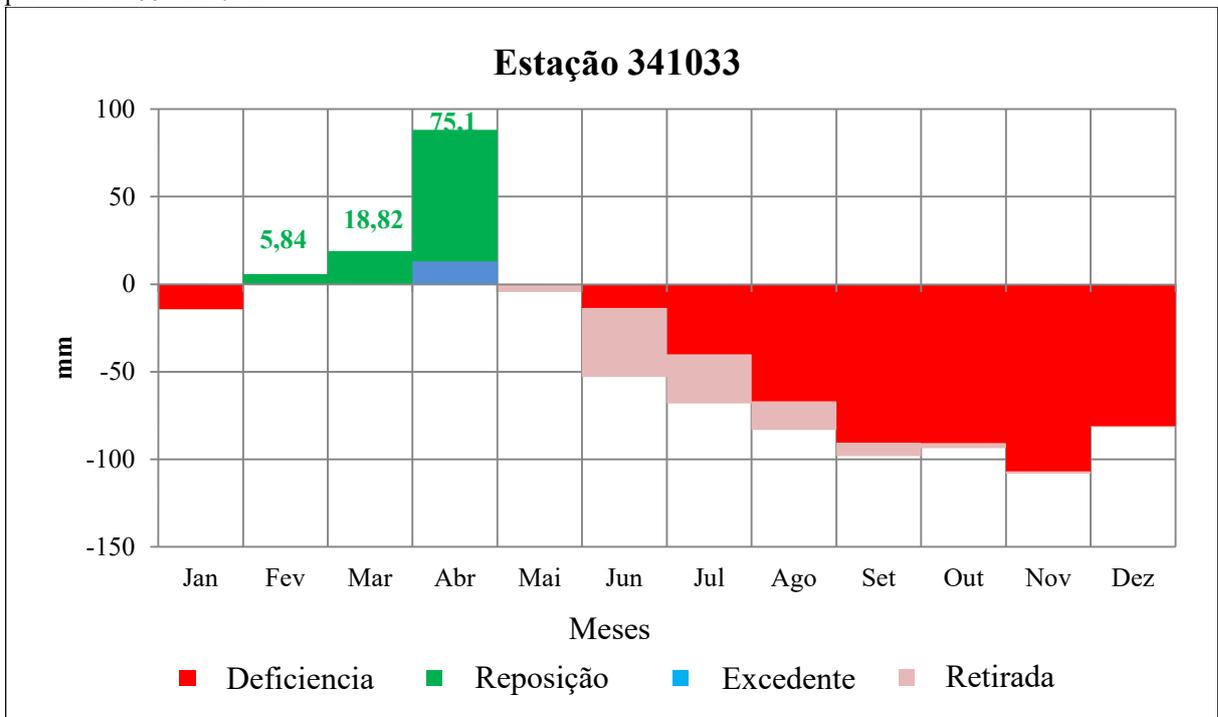
Fonte: O autor (2016). Legenda: T - temperatura; P - precipitação; I - índice térmico; a - constante; ETP - evapotranspiração potencial; ETR - evapotranspiração real; ARM - capacidade de armazenamento do solo; DEF - deficiência hídrica; EXC - Excedente hídrico.

Figura 30 - Estrato do balanço hídrico mensal para o distrito de Pindoguába, referente ao período de 1994 a 2014.



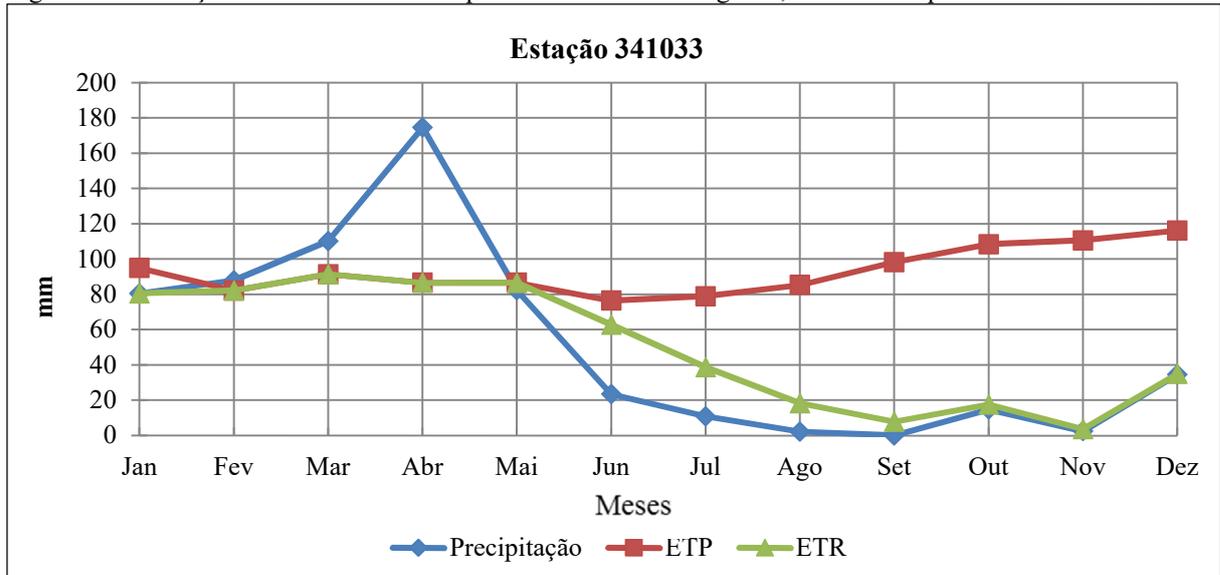
Fonte: O autor (2016).

Figura 31 - Deficiência, Excedente, Retirada e Reposição Hídrica para o distrito de Pindoguába, referente ao período de 1994 a 2014.



Fonte: O autor (2016).

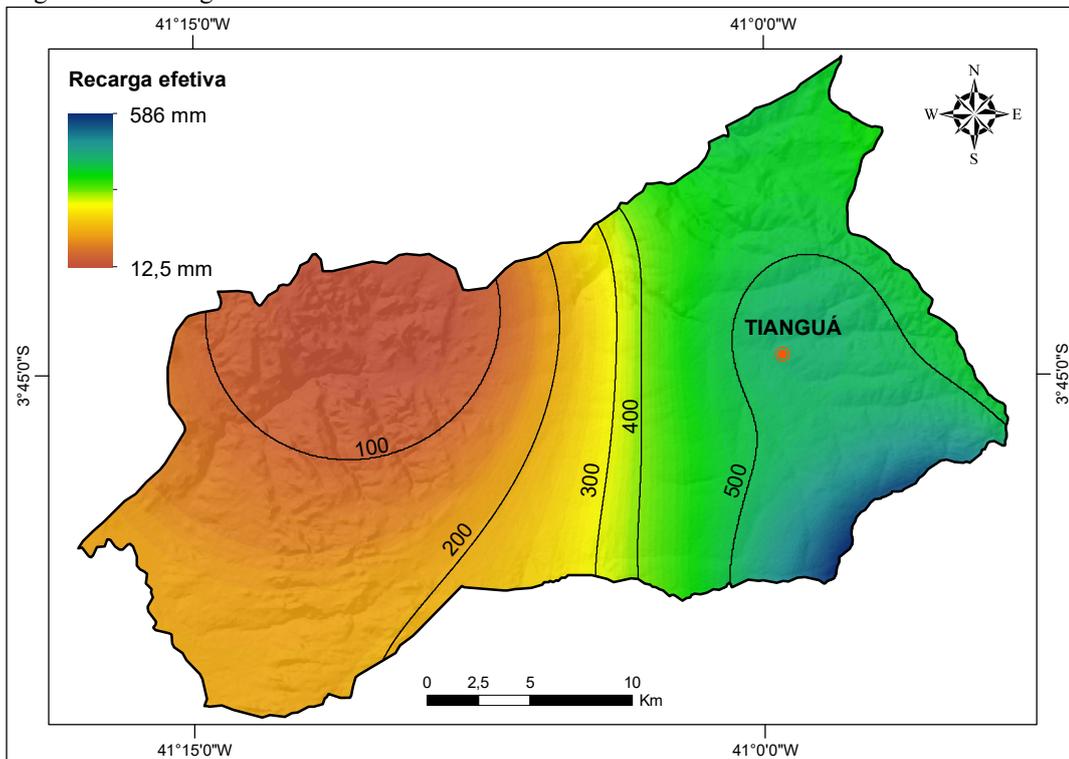
Figura 32 - Balanço hídrico médio mensal para o distrito de Pindoguába, referente ao período de 1994 a 2014.



Fonte: O autor (2016).

Tomando como base as duas estações pluviométricas citadas anteriormente e, com seus respectivos valores hídricos excedentes, foi possível gerar um mapa da recarga efetiva para a área de estudo, como pode ser observado na Figura 33. No entanto, ressalta-se que, a recarga efetiva, não representa a real infiltração para o aquífero, mas sim, uma recarga que está disponível para o mesmo.

Figura 33 - Recarga efetiva na área de estudo.

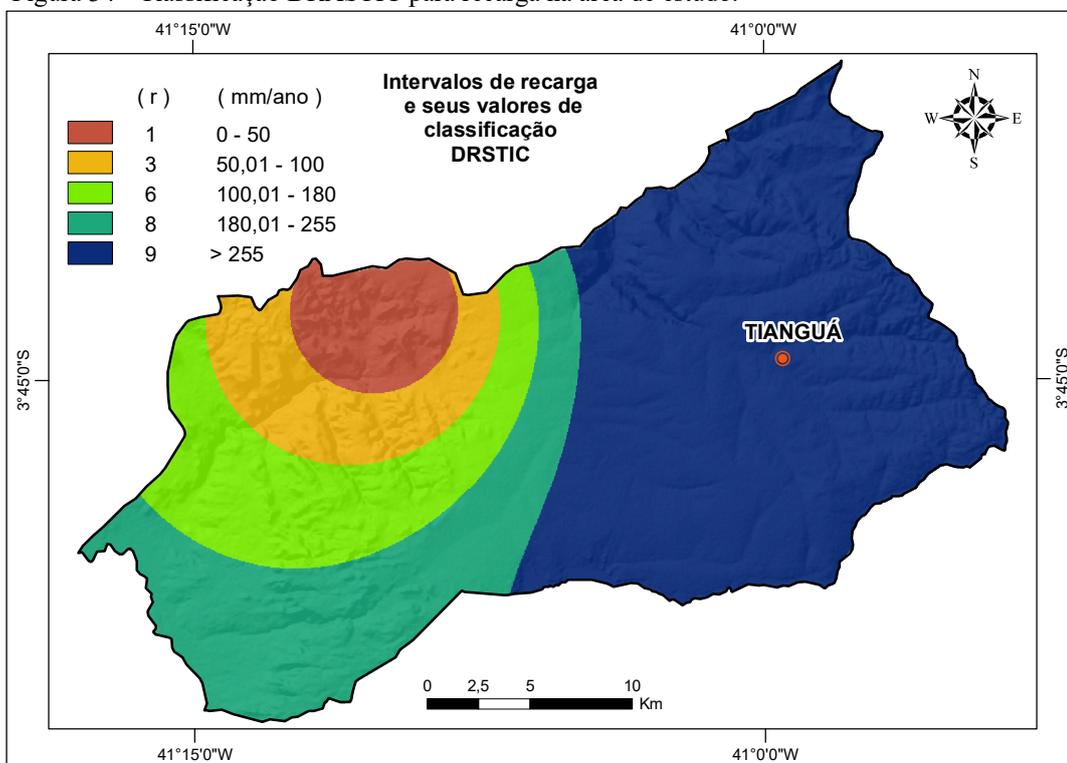


Fonte: O autor (2016).

O mapa do parâmetro de recarga (Figura 34) foi gerado a partir do zoneamento feito para o mapa de recarga efetiva, onde foi possível definir os valores de classificação de recarga DRASTIC, juntamente com a porcentagem de abrangência na área de estudo. Com base nas recargas calculadas, através do balanço hídrico, os valores encontrados foram 1 (5,9%), 3 (8,87%), 6 (14,8%), 8 (20,52%) e 9 (49,93%), de acordo com suas respectivas classes de intervalos 0-50, 50-100, 100-180, 180-255 e acima de 255, apresentadas no Quadro 4 do capítulo 3.4.1.

A classificação de valor 9, referente a classe acima de 255 mm de recarga, foi a que apresentou maior ocorrência, abrangendo uma área de 362,75 Km², indo deste a porção central da área até a borda leste. Esta recarga é, fortemente, favorecida pelas altas concentrações pluviométricas, em decorrência das chuvas orográficas produzidas pelas altitudes elevadas e da proximidade com a borda da bacia. Os demais valores de classificações 1, 3, 6 e 8 tendem a decrescerem as recargas em decorrência das menores precipitações, causadas pelo afastamento da borda da bacia e da diminuição do relevo, à medida que se aproxima do noroeste da área e em direção ao estado do Piauí.

Figura 34 - Classificação DRASTIC para recarga na área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

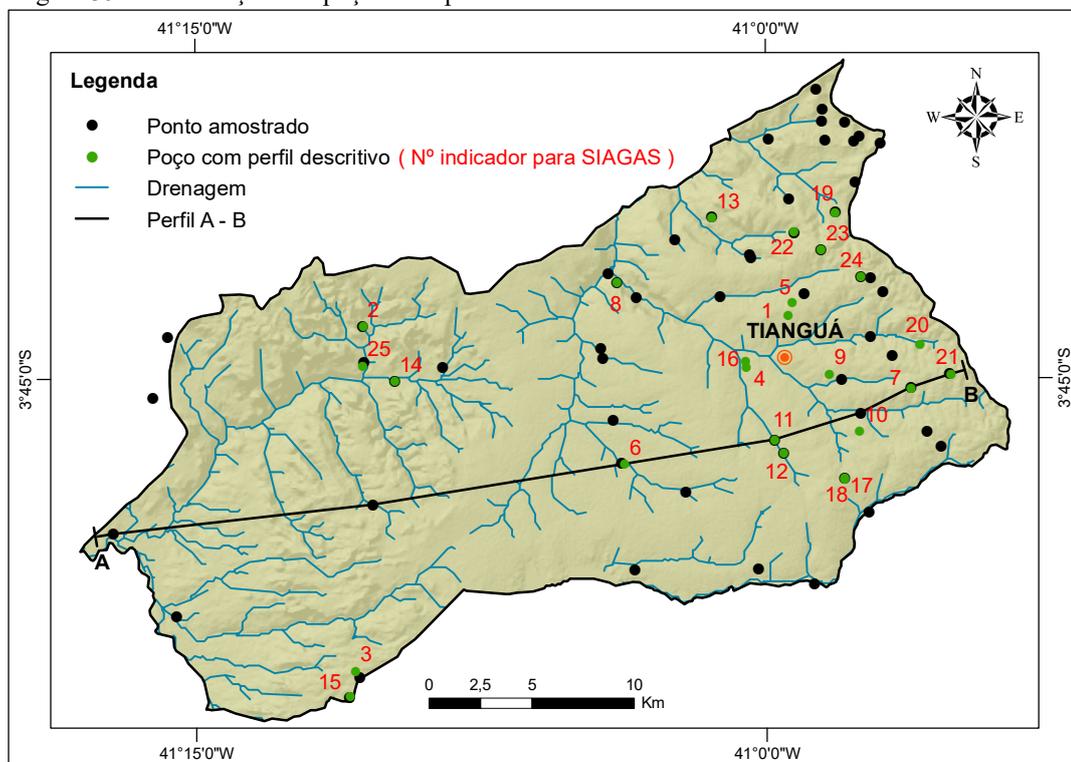
8.1.3. Litologia do aquífero - (A)

A determinação da litologia foi baseada nas análises dos poços com perfis litológicos descritivos, onde sua distribuição pode ser observada na Figura 35. De acordo com a mesma figura, os poços se distribuem em maior concentração, na porção leste da área, ocasionados pela maior ocupação territorial e, de forma menos expressiva no setor Oeste da área.

A maior profundidade de um poço analisado com perfil litológico descritivo foi de 169 m e de acordo com o Quadro 19 e a Figura 36 a área estudada é constituída, exclusivamente, pelos arenitos da Formação Jaicós, pois as espessuras analisadas são inferiores aos 380 m descritos por Goes & Feijo (1994) para a referida Formação. Estes Arenitos podem apresentar intercalações argilosas, granulometria variando de fina a grossa, podendo apresentar-se como silicificados ou não.

Desta maneira e, de acordo com a classificação DRASTIC para litologia, o arenito está dentro da classe que engloba as intercalações de arenitos, argilas e calcários para um intervalo de 5 a 9 de modo que o referido arenito foi definido com rating (r) de 6.

Figura 35 - Distribuição dos poços com perfil descritivos na área de estudo.



Fonte: Autor (2016).

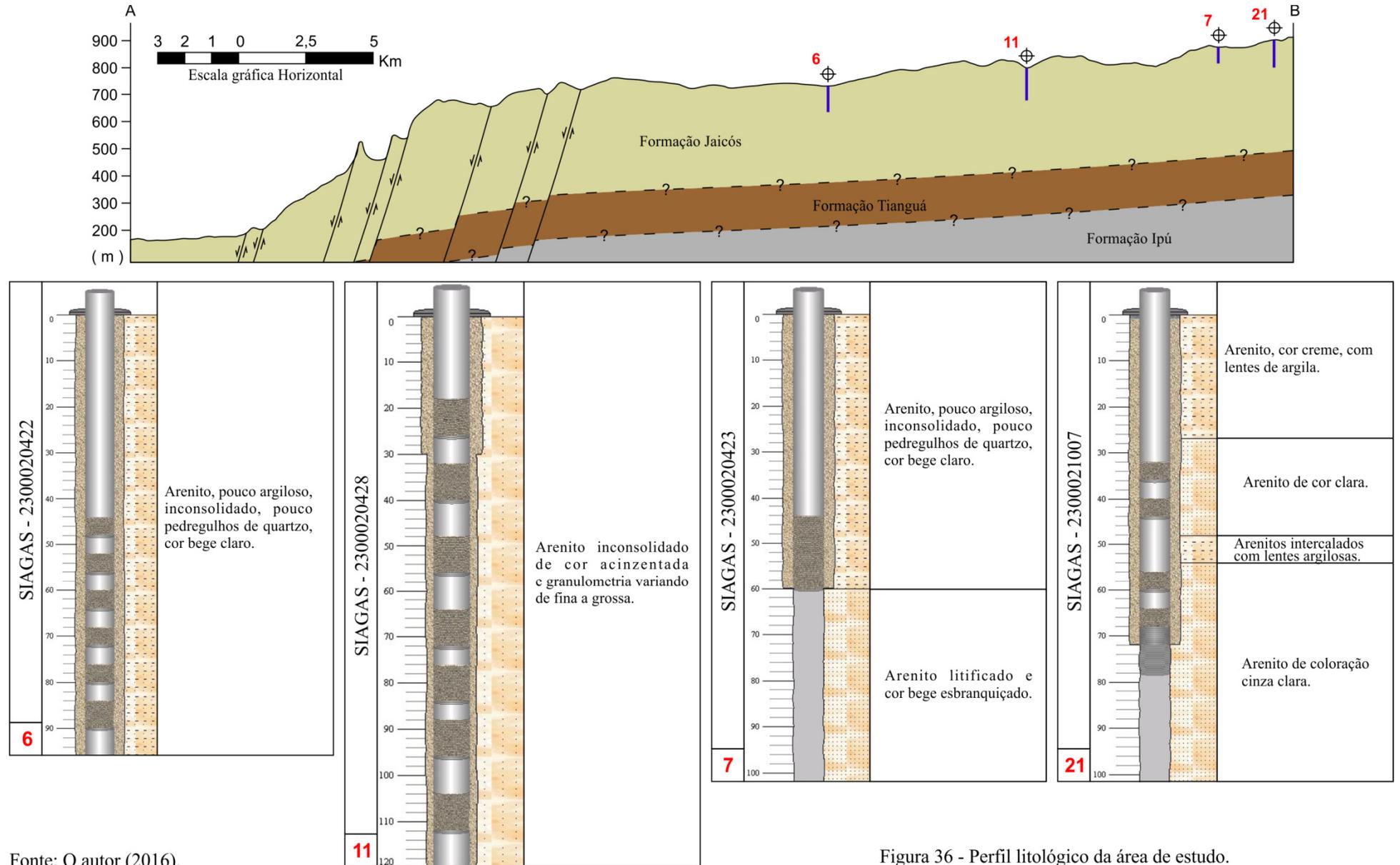
Quadro 19 - Perfil litológicos dos poços pertencentes à área de estudo

Ponto	SIAGAS	UTMN	UTME	Intervalo	Descrição litológica
1	2300011324	9588381	278922	0 - 15	Argila creme.
				15 - 55	Arenito. Formação Serra Grande.
2	2300018609	9587813	258217	0 - 20	Solo e rocha alterada.
				20 - 100	Rocha arenítica.
3	2300019403	9570915	257851	0 - 25	Arenito de granulometria fina e cor esbranquiçada, constituído essencialmente por feldspato alterado.
				25 - 90	Arenito esbranquiçado de granulometria fina com intercalações de rocha cristalina.
				90 - 135	Arenito esbranquiçado de granulometria fina constituído essencialmente por micas e feldspato alterado.
4	2300020312	9585836	276877	0 - 67	Arenito pouco argiloso, inconsolidado, pouco pedregulhos de quartzo, cor bege claro.
5	2300020315	9589006	279127	0 - 80	Rocha areno-argilosa inconsolidada de coloração acinzentada, granulometria fina a média.
6*	2300020422	9581062	270985	0 - 96	Arenito, pouco argiloso, inconsolidado, pouco pedregulhos de quartzo, cor bege, claro.
7*	2300020423	9584802	284897	0 - 60	Arenito, pouco argiloso, inconsolidado, pouco pedregulhos de quartzo, cor bege claro.
				60 - 102	Arenito, bastante consolidado, cor bege esbranquiçado.
8	2300020424	9589978	270604	0 - 90	Arenito, pouco argiloso, inconsolidado, pouco pedregulhos de quartzo, cor bege claro.
9	2300020426	9585506	280945	0 - 66	Arenito com granulometria fina a média, pouco argiloso, inconsolidado, cor cinza escuro.
				66 - 120	Arenito com granulometria fina a grosseira, consolidado, cor cinza claro.
10	2300020427	9582674	282418	0 - 66	Arenito, pouco argiloso, inconsolidado, cor bege claro.
				66 - 78	Arenito, bastante consolidado, cor bege esbranquiçado.
11*	2300020428	9582250	278272	0 - 120	Arenito inconsolidado, cor acinzentado, granulometria fina a grossa. Observaram-se pedregulhos de quartzo.
12	2300020429	9581614	278708	0 - 90	Arenito, pouco argiloso, inconsolidado, pouco pedregulhos de quartzo, cor bege claro.
13	2300020430	9593154	275194	0 - 114	Arenito pouco argiloso, inconsolidado, silicificado, pouco pedregulhos de quartzo, fraturado, cor bege claro.
14	2300020431	9585112	259749	0 - 60	Arenito pouco argiloso, inconsolidado, pouco pedregulhos de quartzo, cor bege claro.
				60 - 120	Arenito silicificado, pouco fraturado, cor bege esbranquiçado.

Continuação

Ponto	SIAGAS	UTMN	UTME	Intervalo	Descrição litológica
15	2300020776	9569639	257607	0 - 11	Arenito inconsolidado, cor acinzentada, granulometria fina a grossa. Observou-se pedregulhos de quartzo.
				11 - 102	Arenito consolidado, homogêneo, granulometria variando de fina a grosseira. Cor cinza claro e escuro.
16	2300020798	9586132	276867	0 - 60	Arenito, pouco argiloso, silicificado, consolidado, bastante fraturado, pouco pedregulhos de quartzo, cor bege claro.
17	2300020799	9580350	281686	0 - 120	Material areno-argiloso, granulometria fina a média, coloração amarelo esbranquiçado, pouco consolidado, e poucos pedregulhos de quartzo.
18	2300020800	9580343	281675	0 - 120	Material areno-argiloso, granulometria fina a média, coloração amarelo esbranquiçado, pouco consolidado, e poucos pedregulhos de quartzo.
19	2300021005	9593429	281222	0 - 27	Arenito esbranquiçado, fino.
				27 - 54	Arenito, cor creme, granulometria média.
20	2300021006	9586931	285339	0 - 9	Arenito fino, esbranquiçado.
				9 - 30	Arenito, cor creme, granulometria variando de fina a média.
21*	2300021007	9585451	286851	0 - 27	Arenito, cor creme, com lentes de argila.
				27 - 48	Arenito, cor clara.
				48 - 54	Arenito com intercalações argilosas.
				54 - 102	Arenito cor cinza claro.
22	2300021008	9592492	279216	0 - 33	Sedimento inconsolidado, cor marrom, granulometria fina (arenito).
				33 - 54	Rocha alterada, cor cinza claro.
23	2300021306	9591600	280515	54 - 78	Rocha sã, cor cinza escura, sem fraturamento com água neste intervalo.
				0 - 12	Areia de granulometria fina.
24	2300021308	9590240	282479	12 - 78	Arenito silicificado.
				0 - 6	Areia, granulometria fina.
25	2300021309	9585886	258205	6 - 60	Arenito silicificado, coloração alternando creme e avermelhado, granulometria fina a média.
				0 - 8	Areia de granulometria fina.
				8 - 96	Arenito silicificado.

Fonte: O autor (2016). Utilização do SIAGAS até janeiro de 2016. * Estes números são os indicadores dos poços tubulares pertencentes ao SIAGAS, utilizados no perfil litológico (A - B), visualizados nas Figuras 39 e 40.



Fonte: O autor (2016).

Figura 36 - Perfil litológico da área de estudo.

8.1.4. Solo - (S)

Os solos dependendo de sua composição, tais como espessura e textura, podem ser um bom atenuador à substâncias poluentes. A área de estudo conta com cinco tipos de solos, sendo eles: neossolos litólicos, neossolos quartzarênicos, latossolos vermelho e amarelo, latossolos acinzentados e argissolos (Figura 37), distribuídos de acordo com as características do ambiente, do qual tiveram sua formação.

Os latossolos ocupam 55,85% do território de pesquisa, estendendo-se de sudoeste à leste da área. São representados pelos latossolos vermelho e amarelo e os latossolos acinzentados, ocupando respectivamente 41,92% e 13,93% da área. Estes solos variam sua textura de média a argilosa, profundos, relacionados à alta pluviosidade da região, como foi observada no item 8.1.2, sendo que o primeiro são solos bem drenados, enquanto o segundo não.

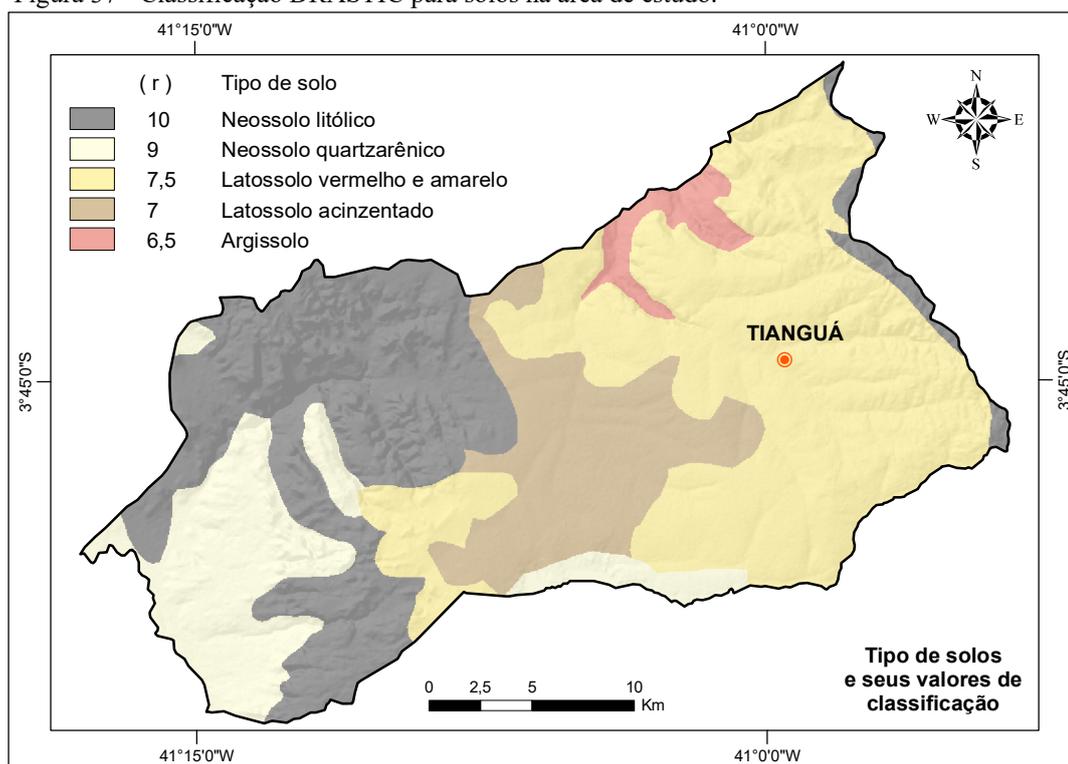
Os neossolos litólicos ocupam, principalmente, a porção noroeste da área, estendendo-se para sudoeste e, com menor frequência, na borda leste, perfazendo um total de 27,31% do total da área. Este tipo de solo, em consequência de sua imaturidade, provavelmente pelas menores precipitações pluviométricas (porção noroeste), apresentam perfis pouco desenvolvidos, inferiores a 0,5m, não oferece qualquer resistência a possíveis cargas contaminantes.

Os solos quartzarênicos ocorrem nos terrenos do tipo suave ondulado, concentrando-se na porção oeste da área e, com menor frequência, no centro sul. Ocupando 14,31% da área, são solos de textura arenosas, com profundidades inferiores a 1,5 m e constituídos por rochas ou sedimentos de natureza, essencialmente, quartzosa,

Os argissolos são caracterizados por serem solos profundos a muito profundos e conterem acúmulo de argilas em subsuperfície. Essa concentração de argila forma uma barreira de proteção maior a contaminantes, em relação aos demais solos citados anteriormente. Estes solos ocorrem em menor proporção na área, 2,53%, e estão situados na porção norte/nordeste.

De acordo com o Quadro 6 (pertencente ao item 3.4.1), em referência a classificação DRASTIC para o Parâmetro solo, foi possível atribuir uma nota para cada tipo de solo existente na área de estudo. Como mencionado no início deste capítulo, a região estudada conta com solos do tipo neossolo litólico, neossolo quartzarênico, latossolo vermelho e amarelo e argiloso onde, os mesmos, foram classificados com as respectivas notas (r) 10; 9; 7,5; 7 e 6,5 (Figura 41).

Figura 37 - Classificação DRASTIC para solos na área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

8.1.5. Topografia - (T)

A partir da utilização do mapa de declividade, Figura 38, foi possível observar, com base na proposta da metodologia DRASTIC, cinco classes de declividade na área de estudo, sendo elas: 0 a 2; 2,01 a 6; 6,01 a 12; 12,01 a 18 e >18, medidas em porcentagem e com seus respectivos valores de classificação (r) 10, 9, 5, 3 e 1.

O valor 10, referente ao intervalo de declividade 0 a 2, representa a maior nota de classificação à vulnerabilidade para o parâmetro de topografia. Está associado às regiões planas e levemente onduladas e que, por sua vez, podem ocorrer as maiores taxas de infiltração para o aquífero. Ocupa 13,97% da área estudada e se distribuem, principalmente, na porção central e, com menor ocorrência, à oeste da área.

Relacionado ao intervalo de classe 2,01 a 6 e, associado às feições geomorfológicas de relevos suavemente ondulados, se encontram as áreas classificadas com valor 9. Dentre todos os valores ou notas de classificação, observados na Figura 38, este é o que possui a maior taxa de ocorrência, 43,87%, excetuando-se nas escarpas dos vales, distribuem-se por quase toda a região, mas, com menor ocorrência na porção central.

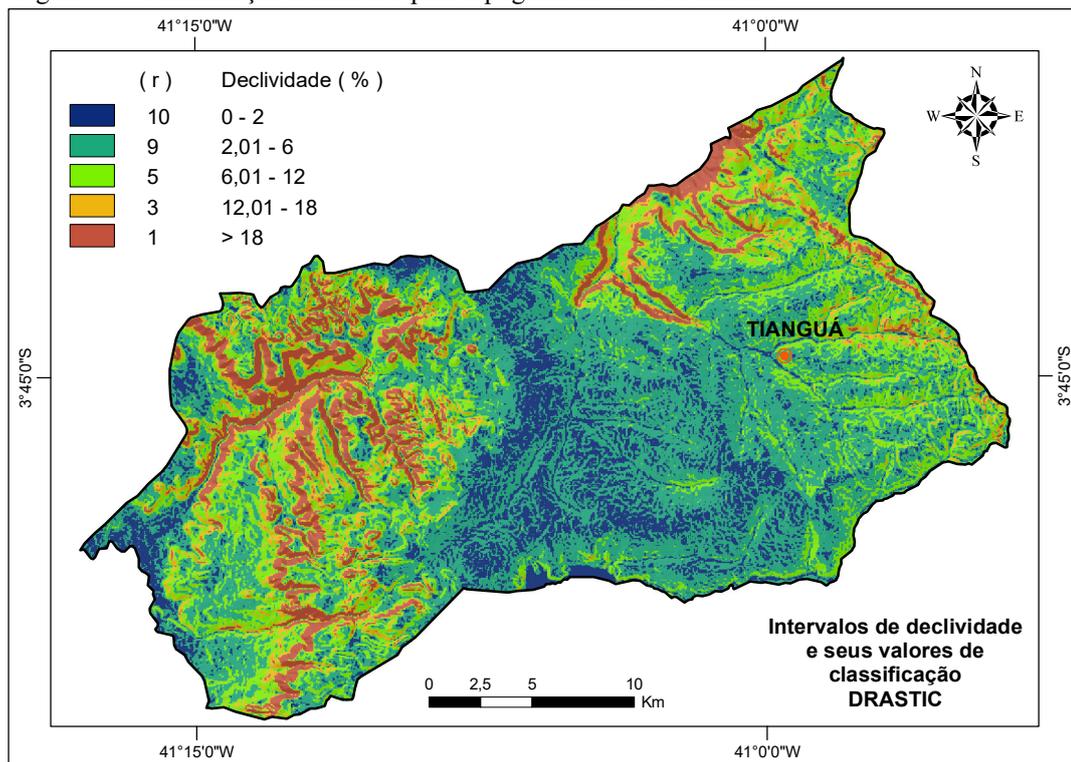
O valor 5, referente ao intervalo de classe 6,01 a 12, possui 24% de abrangência do território analisado, estando, associado às feições de relevos suavemente ondulados a

ondulados. Distingue-se das demais classificações por ocorrer separadamente pelos terrenos planos e suavemente ondulados, concentrando-se nas zonas leste e oeste, abrangendo, respectivamente, 12,17% e 11,83% da área.

A classe 12,01 a 18, referente ao valor de classificação 3, possui 7,97% de abrangência, sendo esta a classe de menor proporção, com ocorrência bastante dispersa na área estudada e associada às formas de relevos ondulados.

Por fim, a classe com inclinações maiores que 18% foram classificadas com valor 1, representadas pelas feições geomorfológicas que englobam os relevos ondulados, fortemente ondulados, montanhosos e escarpados, contribuindo de forma nula ou quase nula para a infiltração ao aquífero e, desta maneira, inibindo as possíveis fontes potenciais de contaminação. São feições que ocorrem restritamente às zonas escarpadas, ocupando uma área de 10,19%. Ocorrem em maiores proporções na porção oeste da área e outra, de menor ocorrência, na região nordeste.

Figura 38 - Classificação DRASTIC para topografia na área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

8.1.6. Impacto sobre a zona vadosa - (I)

A determinação do valor de classificação para a zona vadosa foi baseada nas análises dos parâmetros da profundidade do nível estático e litologia do aquífero, discutidos, respectivamente, nos itens 8.1.1 e 8.1.3. O primeiro parâmetro, mencionado anteriormente, foi responsável por quantificar as espessuras da zona vadosa na área de estudo, onde variam de 0 a 150 metros de profundidade, conforme a Figura 25 do referido item. O segundo parâmetro foi responsável por indicar os arenitos da Formação Jaicós como sendo a litologia que constitui a zona vadosa, pois os níveis estáticos encontrados foram inferiores a 380 metros de profundidade e, desta maneira, não atingido os arenitos da Formação Tianguá.

De acordo com o Quadro 8 do item 3.4.1, referente ao valor de classificação DRASTIC para o impacto sobre a zona vadosa, o arenito está dentro da classe de intervalo 4 a 8, englobando as intercalações de arenitos, argilas e calcários, tendo a referida litologia definida com o valor 6.

8.1.7. Condutividade hidráulica - (C)

Na área de estudo apesar de possuir 136 poços, como observados na Figura 18 do item 7.2, referente aos recursos hídricos subterrâneos, nem todos possuem testes de vazão e, conseqüentemente, impossibilitando que os mesmos possam ter suas condutividades hidráulicas mensuradas.

De acordo com os dados de condutividades hidráulicas pertencentes aos trabalhos de Aguiar (no prelo) e Barreto (2006), observados no Quadro 15 do capítulo 4.4.7, foi possível utilizar 14 resultados de condutividades hidráulicas. No entanto, destes 14 poços, 8 resultados pertencem ao trabalho de Barreto (2006) e os demais foram obtidos com base nos testes de vazão cadastrados no SIAGAS e analisados mediante a utilização do software Aquitest 2011.1.

Assim como o resultado de Barreto (op cit.), Aguiar (op cit.) também mostrou resultados inferiores a 4 m/d para as condutividades hidráulicas dos poços analisados para a área de estudo. Desta maneira e, seguindo as especificações do Quadro 9, referente ao item 3.4.1, este trabalho apresenta a classificação para o parâmetro de condutividade hidráulica como sendo de valor 1.

8.1.8. Mapa da avaliação da vulnerabilidade pelo modelo DRASTIC

Os resultados obtidos, referentes aos sete parâmetros DRASTIC, descritos ao longo dos itens 8.1.1 a 8.1.7 e, resumidos no Quadro 20, foram integrados a partir da utilização da Equação 1, observada no item 3.4.1.

Quadro 20 - Parâmetros DRASTIC e seus índices para a área de estudo.

D - Profundidade do Nível Estático (w = 5)		
Profundidade (m)	(r)	Índice = (r) x (w)
< 1,5	10	50
1,51 - 4,5	9	45
4,51 - 9	7	35
9,01 - 15	5	25
15,01 - 23	3	15
23,01 - 30	2	10
> 30	1	2
R - Recarga (w = 4)		
Recarga (mm/ano)	(r)	Índice = (r) x (w)
> 255	9	36
180,01 - 255	8	32
100,01 - 180	6	24
50,01 - 100	3	12
< 50	1	4
A - Litologia do aquífero (w = 3)		
Litologia	(r)	Índice = (r) x (w)
Arenito	6	18
S - Tipo de solo (w = 2)		
Solos	(r)	Índice = (r) x (w)
Neossolo litólico	10	20
Neossolo quartzarênico	9	18
Latossolo vermelho e amarelo	7,5	15
Latossolo acinzentado	7	14
Argissolo	6,5	13
T - Topografia (w = 1)		
Declividade (%)	(r)	Índice = (r) x (w)
0 - 2	10	10
2,01 - 6	9	9
6,01 - 12	5	5
12,01 - 18	3	3
> 18	1	1
I - Impacto da zona vadosa (w = 5)		
Litologia	(r)	Índice = (r) x (w)
Arenito	6	30
C - Condutividade Hidráulica (w = 3)		
Intervalo (m/d)	(r)	Índice = (r) x (w)
< 4	1	3

Fonte: O autor (2016). Legenda: r = valor e w = peso.

Como pode ser observado no Quadro 21, foi necessária uma análise estatística para se estabelecer o peso de contribuição ou grau de importância que cada parâmetro exerceu dentro do cálculo do índice DRASTIC e, desta forma, averiguar qual parâmetro teve maior participação na contribuição para o aumento ou diminuição da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação na área de estudo.

Quadro 21 - Nível de importância dos parâmetros D, R, A, S, T, I, e C.

	D	R	A	S	T	I	C
Mínimo	1	1	-	7	1	-	-
Máximo	10	9	-	10	10	-	-
Média	3,80	7,34	6	8,30	6,89	6	1
DP	2,80	2,40	-	1,20	2,99	-	-
CV (%)	73,68	32,70	-	14,46	43,40	-	-

Fonte: O Autor (2016). Legenda: D = profundidade do nível estático; R = recarga; A = litologia do aquífero; S = solo; T = topografia; I = impacto sobre a zona vadosa; C = condutividade hidráulica; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; - = dados inexistentes.

O solo (S), de acordo com o Quadro 21, foi o parâmetro que ofereceu o maior risco à contaminação do aquífero, apresentando valor médio superior a 8 e, demonstrando, o menor coeficiente de variação. Um pouco abaixo do risco à contaminação, apresentado pelo parâmetro solo, seguem os parâmetros de recarga (R) e topografia (T) com seus respectivos valores médios de 7,34 e 6,89, ambos com seus coeficientes de variação 32,70 e 43,40, respectivamente. A litologia do aquífero (A) e o impacto sobre a zona vadosa (I), por serem a mesma unidade litológica, não possuem coeficientes de variação e, de acordo com sua composição, apresentaram riscos moderados à contaminação, ambos com valor médio de 6. A profundidade do nível estático (D) possui índice médio de 3,8, apresentando baixo risco à contaminação, mas, por outro lado, foi quem apresentou o maior coeficiente de variação (73,68). A condutividade hidráulica (C) da área estudada apresentou valores inferiores a 4 m/d e, desta maneira, foi classificada com valor 1, não apresentando coeficiente de variação, indicando um risco insignificante à contaminação.

A integração de todos os parâmetros gerou um mapa de vulnerabilidade natural do aquífero com índices variando de 90 a 176 que podem ser observados no Quadro 22 e na Figura 39. Estes índices foram divididos em cinco classes de vulnerabilidade e acompanhados com seus respectivos valores de ocorrências na área de estudo, expressos em Km² e porcentagem: insignificante (48,48 Km² e 6,69%), muito baixa (112,68 Km² e 15,55%), baixa (327,32 Km² e 45,17%), moderada (192,32 e 26,54%) e alta (43,84 Km² e 6,05%).

Quadro 22 - Índice de vulnerabilidade DRASTIC para a área de estudo.

Classes	Intervalo de classe	Área (Km²)	Fração da Área (%)
Insignificante	90 - 100	48,48	6,69
Muito baixa	101 - 119	112,68	15,55
Baixa	120 - 139	327,32	45,17
Moderada	140 - 159	192,32	26,54
Alta	160 - 176	43,84	6,05
Total		724,64	100

Fonte: O Autor (2016).

A classe de vulnerabilidade insignificante ocorre, exclusivamente, na porção noroeste, abrangendo 48,48 Km² ou 6,69% da área de estudo. Esta classe insignificante, mesmo possuindo solos litólicos que elevam o cálculo do índice da vulnerabilidade do terreno, está associada, também, com os menores índices pluviométricos, maiores profundidades da superfície freática e aos maiores índices de declividade do terreno, prevalecendo-os sobre o parâmetro solo, conseqüentemente diminuindo significativamente os índices de vulnerabilidade DRASTIC.

A classe de vulnerabilidade muito baixa ocorre de forma similar a classe insignificante, mas com menores valores da profundidade da superfície freática e menores declividades do terreno. Abrange 112,68 Km² (ou 15,55%) da área estudada, ocorrendo em maior proporção na porção noroeste e, de forma restrita, no setor nordeste.

A classe de vulnerabilidade baixa ocupa 327,32 Km² (ou 45,17%), sendo esta, a classe com maior representatividade na área de estudo, mas com ocorrências discretas, evidenciadas em calhas de rios e riachos na porção noroeste. Estes índices intermediários estão associados, principalmente, às regiões planas e suavemente onduladas que favorecem um maior índice de recarga ao aquífero, superior à das demais classes.

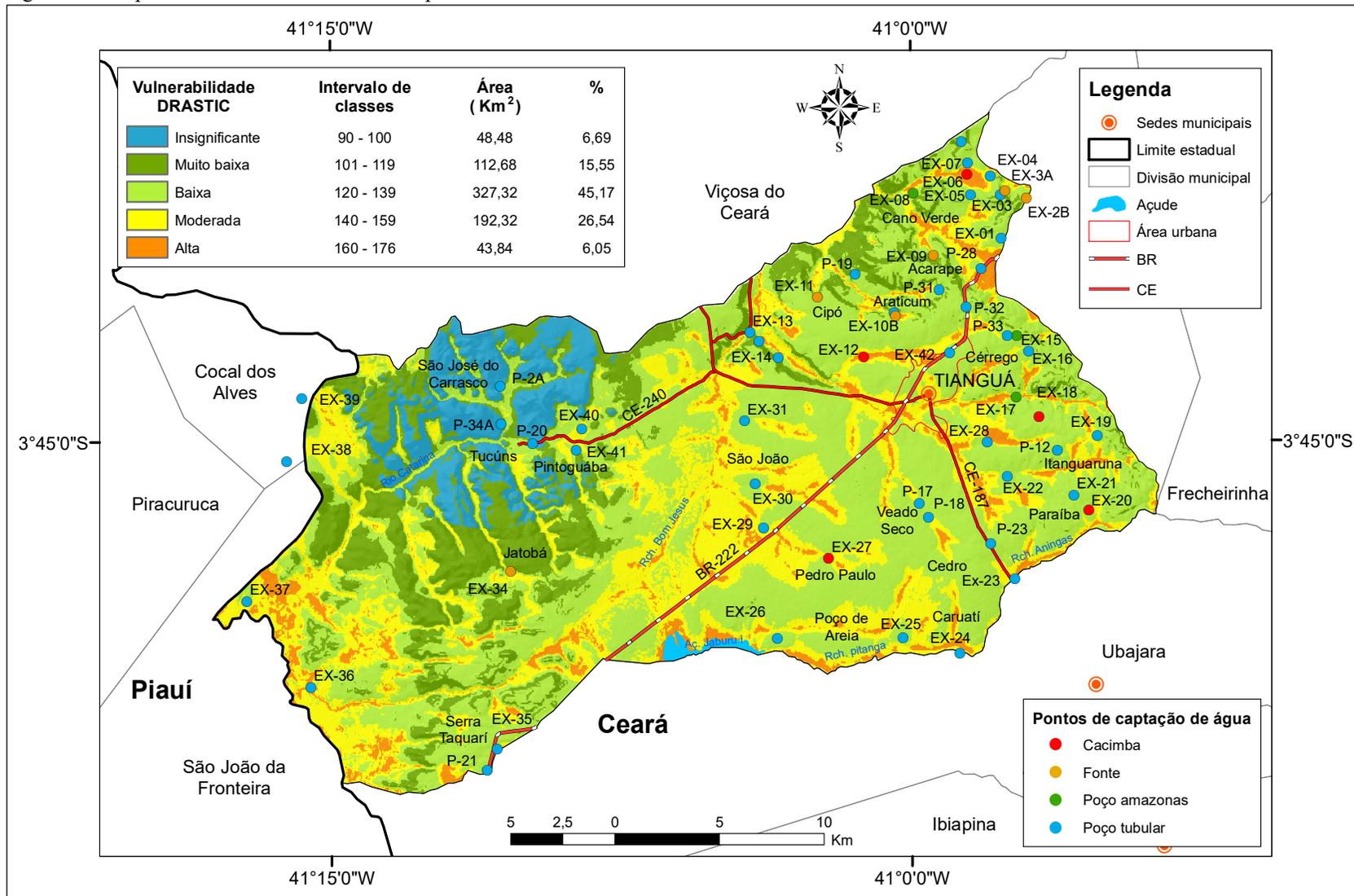
As classes de vulnerabilidade moderada e alta ocorrem de forma associadas por toda área de estudo evidenciadas, respectivamente, nas margens e córregos de rios e riachos. A primeira ocupa 193,32 Km² (ou 26,54%) e, a segunda, com a menor representatividade entre as demais classes, com 43,84 Km² ou (6,05%). Somadas perfazem um total de 236,16 Km² (ou 32,59%) da área. Para estas duas classes, o parâmetro da profundidade do nível estático foi quem contribuiu, principalmente, com a elevação do índice de vulnerabilidade, pois estas classes apresentaram os menores níveis de profundidade até a superfície freática.

A condutividade hidráulica atuou como parâmetro atenuante do índice de vulnerabilidade, enquanto a litologia do aquífero e litologia da zona vadosa atuaram como parâmetros intermediários. Mesmo sendo importantes na contribuição para o aumento ou

diminuição dos incides à contaminação, não foram mencionados nas discussões por não apresentarem variações, contribuindo de forma homogênea a todas as classes.

A pesquisa na área de estudo, visando também auxiliar os gestores e a sociedade em uma melhor forma de gerenciar a ocupação territorial e garantir uma maior proteção ao aquífero, mostrou que, de acordo os resultados encontrados para o modelo DRASTIC, observados na Figura 39, as regiões com melhores disponibilidades para a ocupação são aquelas classificadas com vulnerabilidade baixa. Estas regiões representam a maior proporção dentro da área pesquisada 45,17% (ou 327,32 km²), apresentam certa distância às margens dos rios e estão associadas a relevos suavemente ondulados. Por sua vez, as áreas com vulnerabilidade insignificante a muito baixa estão associados a relevos ondulados a montanhosos, o que dificultaria a ocupação do território. Seguindo a contramão ao que foi exposto anteriormente, as zonas de vulnerabilidade moderada e alta deveriam ser aquelas com menor índice de ocupação, mas por estarem associadas a feições geomorfológicas mais aplainadas apresentam alto índice de ocupação, seja ela por urbanização ou zonas agricultáveis.

Figura 39 - Mapa de vulnerabilidade DRASTIC para a área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

8.2. Avaliação da vulnerabilidade pelo modelo AVI

A elaboração do mapa de avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação pela metodologia AVI, levou em consideração os parâmetros relacionados logo abaixo.

8.2.1. Espessura da zona não saturada (*di*)

A espessura da zona não saturada ou zona vadosa, representa a variação entre a superfície topográfica e a superfície freática, ou seja, esta zona se refere à própria profundidade do nível estático da área de estudo. Desta maneira, não se torna necessária uma nova discussão sobre o assunto, pois sua variação, está dentro da faixa de 0 a 150 m de profundidade, conforme resultados discutidos no item 8.1.1, referente a profundidade do nível estático e que, estas variações, podem ser visualizadas através da Figura 25 do mesmo capítulo.

8.2.2. Condutividade hidráulica estimada (*Ki*)

As condutividades hidráulicas encontradas para a área estudada estão dentro de uma faixa que varia de $7,01 \times 10^{-4}$ m/d a $6,95 \times 10^{-3}$ m/d, observadas no Quadro 16, no item 4.5.2. A área pesquisada por apresentar um número reduzido de informações de condutividades hidráulicas, sendo estas de valores relativamente baixos e, por compreender apenas um tipo litológico, optou-se pela utilização de um valor médio para a condutividade hidráulica de $3,37 \times 10^{-3}$ m/d, observado no Quadro 16, citado anteriormente.

8.2.3. Mapa da avaliação da vulnerabilidade pelo modelo AVI

Os índices encontrados para a metodologia AVI variaram entre os valores 0 e 35.658,19, sendo que as classes extremamente alta (0 - 10) e alta (10 - 100) não possuem representatividade gráfica na escala de trabalho e, portanto, foram englobadas na classe moderada (100 - 1.000). Para este modelo de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação, apenas a espessura da zona saturada foi o parâmetro com maior peso nos cálculos dos índices de vulnerabilidade, pois o presente trabalho utilizou um valor médio de condutividade hidráulica e, desta maneira, não variou na área estudada. Os valores obtidos para a metodologia AVI foram agrupados em três classes de vulnerabilidade: extremamente baixa, baixa e moderada. O Quadro 23 mostra a divisão das classes de vulnerabilidade e a abrangência de cada uma dentro da área estudada.

Quadro 23 - Índice de vulnerabilidade AVI para a área de estudo.

Classes	Intervalo de classe	Área (Km²)	Fração da Área (%)
Extremamente baixa	> 10.000	203,48	28,08
Baixa	1.000 – 10.000	457,39	63,12
Moderada	100 – 1.000	63,77	8,8
Total		724,64	100

Fonte: O Autor (2016).

A Figura 40 mostra a relação de ocorrência de todas as classes de vulnerabilidade dentro da área estudada. A classe extremamente baixa ocupa uma área de 203,48 Km² ou 28,08%, com ocorrências em duas zonas distintas, uma a leste e outra a oeste, com respectivamente 12,97% e 15,11%. Esta classe está concentrada nas regiões com maiores profundidades de nível estático, ou seja, acima de 30 m de profundidade, proporcionadas em virtude das maiores altitudes em associação com as maiores inclinações topográficas, como discutido no item 8.1.1.

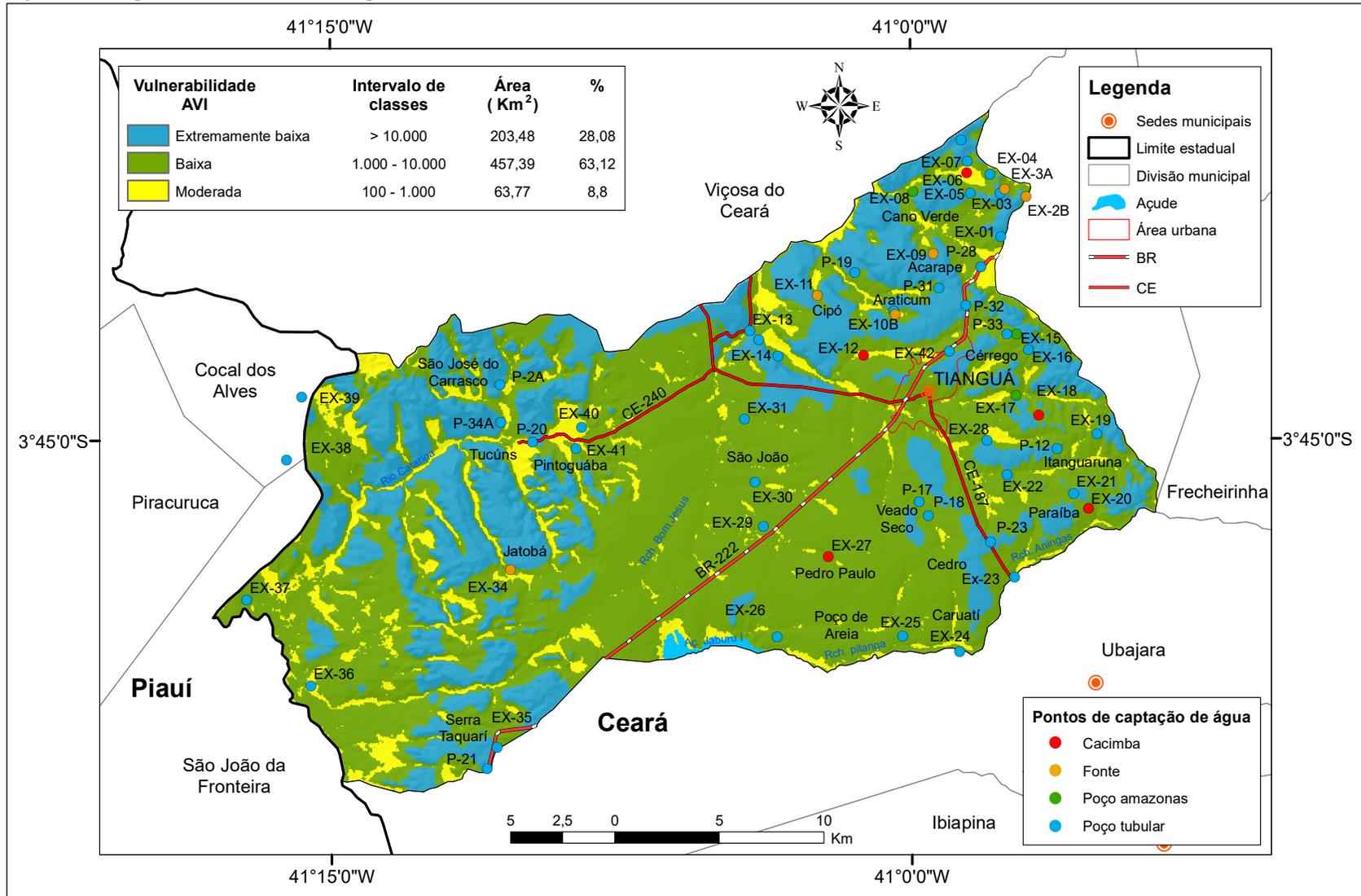
A classe de vulnerabilidade baixa representa 457,39 Km² ou 63,12 % do total da área estudada, ou seja, é a que possui maior abrangência dentre as demais classes. Ocorre, principalmente, nas áreas com as menores declividades do terreno, sendo, esta, representada por regiões aplainadas ou suavemente onduladas, em associação com níveis estáticos inferiores a 30 m de profundidade e superiores a 4,5 m, como pode ser visualizada na Figura 30 do item citado anteriormente.

A classe de vulnerabilidade moderada abrange uma área total de 63,77 Km² ou 8,8%. Esta classe é a que possui a menor representatividade da área estudada. Sua ocorrência se dá, de maneira restrita, entre margens e calhas de rios e riachos onde as profundidades da superfície freática, para estes locais, não sejam superiores a 4,5 m, como pode ser visualizada na Figura 30 do capítulo citado anteriormente.

Assim como o modelo DRASTIC, o modelo AVI também visa o auxílio na gestão da ocupação territorial e na utilização da água subterrânea. De acordo os resultados encontrados para o modelo AVI, observados na Figura 40, as regiões com melhores disponibilidades para a ocupação são aquelas classificadas com vulnerabilidade baixa. Estas regiões, em relação ao DRASTIC, representam um valor ainda maior de sua proporção dentro da área pesquisada 63,12% (ou 457,39 km²), pois, além de estarem associados aos relevos suavemente ondulados, englobam também os relevos planos e ondulados. As áreas classificadas como de vulnerabilidade extremamente baixa são de difícil acesso, principalmente no setor oeste, pois estão associadas a relevos fortemente ondulados a montanhosos. As regiões classificadas como

moderadas não possuem representatividade muito significativa em relação à área pesquisada, mas no setor leste estão inseridas nas áreas de maior ocupação.

Figura 40 - Mapa de vulnerabilidade AVI para a área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

8.3. Avaliação da vulnerabilidade pelo modelo GOD

O resultado obtido para o mapa de avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação, pela metodologia GOD, levou em consideração o confinamento hidráulico da água subterrânea, litologia e espessura da zona vadosa, relacionados logo abaixo.

8.3.1. Grau de confinamento da água subterrânea

De acordo com os resultados encontrados por Aguiar (no prelo) para os poços apresentados no Quadro 17, item 4.6.1, a grande maioria dos testes de vasão se ajustaram de forma melhor às curvas de Hantush, indicando um aquífero do tipo confinado com drenança, onde suas transmissividades apresentaram valores mínimos e máximos respectivos de $7,86 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ a $9,07 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{h}$ e condutividades mínimas e máximas respectivas de $7,01 \times 10^{-4} \text{ m/d}$ a $1,53 \times 10^{-2} \text{ m/d}$. Com base na associação dos resultados de Aguiar (op cit.) juntamente com a classificação da vulnerabilidade pela metodologia GOD, observada na Figura 2 do item 3.4.3, o Grupo Serra Grande foi definido como sendo um aquífero do tipo semi-confinado, onde o mesmo recebeu uma nota de classificação de valor 0,4.

8.3.2. Ocorrência de estratos de cobertura

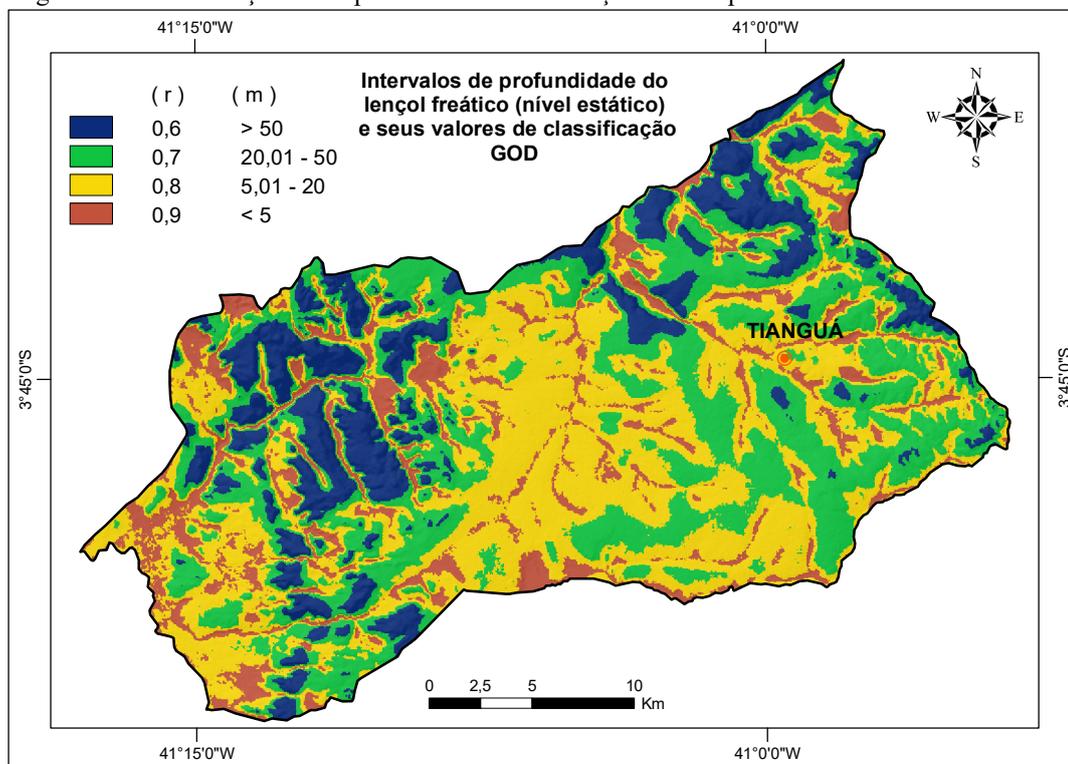
Assim como o parâmetro impacto sobre a zona vadosa, discutido no item 8.1.6 da metodologia de vulnerabilidade de aquífero à contaminação DRASTIC, o parâmetro, ocorrência de estratos de cobertura, também levou em conta o tipo de litologia do aquífero. Desta maneira, estes estratos foram caracterizados litologicamente pelos arenitos pertencentes à Formação Jaicós, com suas espessuras variaram de 0 a 150 m de profundidade, de acordo com as variações dos níveis estáticos observados na Figura 25 do item 8.1.1. Portanto, o resultado encontrado para este parâmetro foi aplicado conforme a metodologia GOD, visualizada na Figura 2 do item 3.4.3, onde os arenitos receberam o valor de classificação 0,75.

8.3.3. Distância até o lençol freático (nível estático)

Os resultados encontrados para a distância até o lençol freático ou nível estático, seguiram os mesmos princípios empregados nos resultados dos itens 8.1.1 e 8.2.1, referentes aos respectivos parâmetros profundidade do nível estático (DRASTIC) e espessura da zona não saturada (AVI). Como mencionado no Capítulo 4.6.3, este parâmetro se diferenciou da profundidade do nível estático (DRASTIC) por não apresentar os mesmos intervalos de

classificação e, desta forma, apresentaram resultados divergentes, como podem ser observados nas quatro classes de profundidade na Figura 41.

Figura 41 - Classificação GOD para distância até o lençol freático para a área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

As maiores profundidades, acima de 50 m, são representadas pela classe 0,6, abrangendo 114,28 km² ou 15,77% da área estuda. Ocorre, de forma dispersa, em duas pequenas poções, uma a nordeste e outra a oeste. São áreas dominadas pelas maiores altitudes do terreno, associadas às feições geomorfológicas de relevos ondulados, fortemente ondulados, montanhosos e escarpados.

A classe 0,7 representa as profundidades entre os intervalos 20,01 a 50 m até o nível estático, ocupando 233,69 km² ou 32,25% da área estudada. São representadas pelos relevos ondulados e fortemente ondulados que se distribuem por toda área, excetuando-se na porção central.

A classe 0,8 representa as profundidades entre o intervalo 5,01 a 20. Dentre todas as classes, está é a que possui maior abrangência, 281,74 km² ou 38,88%, da área estudada. São regiões dominadas por relevos aplainados ou suavemente ondulados, localizadas, principalmente, na porção centrada e, em menores proporções, situadas nas margens de rios e riachos.

A classe 0,9 representa as profundidades inferiores a 5 m até o lençol freático, ocorre por toda a área estudada, mas, de forma restrita, aos vales e calhas de rios e riachos. Como pode ser observada na Figura 41, dentre as demais classes, esta é a que ocupa as menores proporções, 94,93 km² ou 13,10%.

8.3.4. Mapa da avaliação da vulnerabilidade pelo modelo GOD

Como a área estudada comporta-se como um aquífero semi-confinado, discutido nos resultados do item 8.3.1, e não possuindo variações para o parâmetro grau de confinamento da água subterrânea (G), a mesma apresentou valor médio de 0,4, como pode ser observado no Quadro 24. Pela metodologia GOD, este índice é um valor intermediário à contaminação para este parâmetro, ou seja, tende a puxar o índice final de classificação para valores médios de vulnerabilidade.

Assim como o parâmetro grau de confinamento da água subterrânea (G), a ocorrência de estratos de cobertura (O) não apresentou variação dentro da área estudada, sendo desta forma, classificada com o índice 0,75, conforme discutido no item 8.3.2. Estes dois índices multiplicados, possuem peso muito forte e, independentemente dos índices mínimo e máximo que foram encontrados, respectivamente 0,6 e 0,9 para a distância até o lençol freático (D), como pode ser observado no Quadro 24, a vulnerabilidade do aquífero à contaminação foi classificada como baixa.

Quadro 24 - Nível de importância dos parâmetros G, O, D.

	G	O	D
Mínimo	-	-	0,6
Máximo	-	-	0,9
Média	0,4	0,75	0,75
DP	-	-	0,1
CV (%)	-	-	13,33

Fonte: O Autor (2016). Legenda: G = grau de confinamento da água subterrânea; O = ocorrência de estratos de cobertura; D = distância até o lençol freático; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; - = dados inexistentes.

A integração dos parâmetros pela metodologia GOD gerou índices variando de 0,18 a 0,27 que podem ser observados no Quadro 25. Estes índices estão dentro do intervalo de baixa vulnerabilidade, representados pela classe 0,1 a 0,3, conforme Figura 2 do Capítulo 3.4.3. Seguindo a metodologia GOD, a área estudada seria representada por uma única classe de vulnerabilidade, contudo, o presente trabalho optou pela criação e utilização de uma classe transitória entre as vulnerabilidades baixa e média. Desta maneira, os índices encontrados foram

alocados em duas classes, onde, a classe de vulnerabilidade baixa, englobou os índices de 0,15 a 0,25 e, a classe baixa a média, os índices de 0,25 a 0,35.

Quadro 25 - Índice de vulnerabilidade GOD para a área de estudo.

Classes	Intervalo de classe	Área (Km²)	Fração da Área (%)
Baixa	0,18 - 0,25	629,28	86,84
Baixa a média	0,25 - 0,27	95,36	13,16
Total		724,64	100

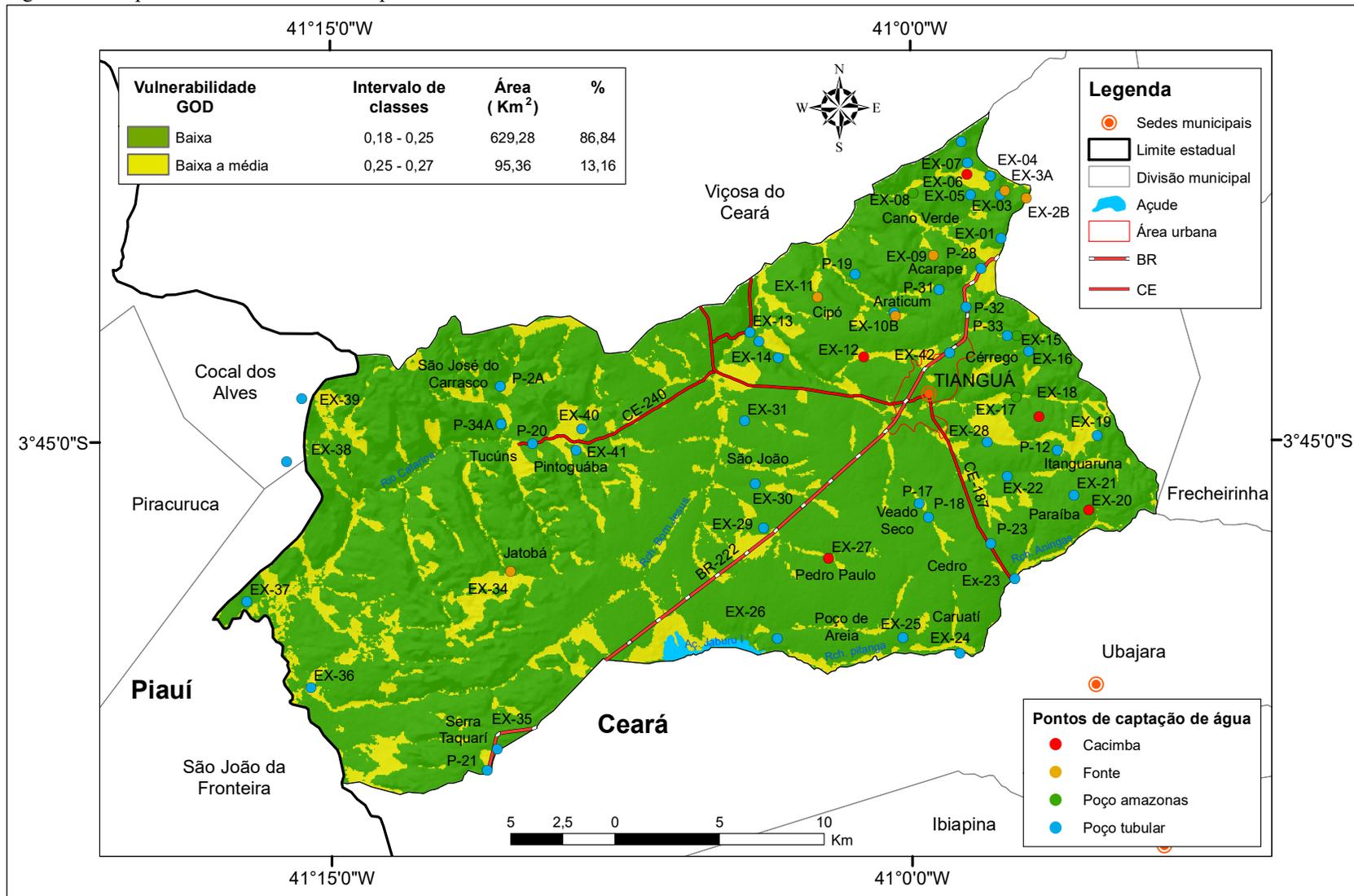
Fonte: O Autor (2016).

Os índices de vulnerabilidade foram divididos em duas classes, conforme mostrado no Quadro 26. A classe de vulnerabilidade baixa apresentou índices dentro do intervalo 0,18 a 0,25. Esta classe possui grande representatividade na área de estudo, ocupando 629,28 Km² ou 86,84% da mesma.

Como pode ser observado na Figura 42 e, em virtude da criação da classe transitória foi possível destacar, do restante do mapa, a classe de vulnerabilidade baixa a média. Esta classe possui uma área de 95,36 Km² ou 13,16% da área estudada, ocorrendo, de forma restrita, às regiões com profundidades dos níveis estáticos inferiores a 5 m, principalmente ao longo das calhas de rios e riachos.

Por ser um modelo mais generalista em relação ao DRASTIC e por utilizar faixas classificatórias de valores para a profundidade diferentemente do modelo AVI, o modelo GOD apresentou para a área de pesquisa um resultado total de baixa vulnerabilidade. Esse resultado mostra que toda a área está passiva a ocupação territorial, indo de contramão a realidade, pois a mesma, como um todo, não possui comportamento homogêneo. De forma simplificada e com a criação da faixa transitória de vulnerabilidade baixa a média, foi possível quebrar essa homogeneidade, destacando as regiões de margens e calhas de rios como as únicas áreas que deve ser evitada pela ocupação.

Figura 42 - Mapa de vulnerabilidade GOD para a área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

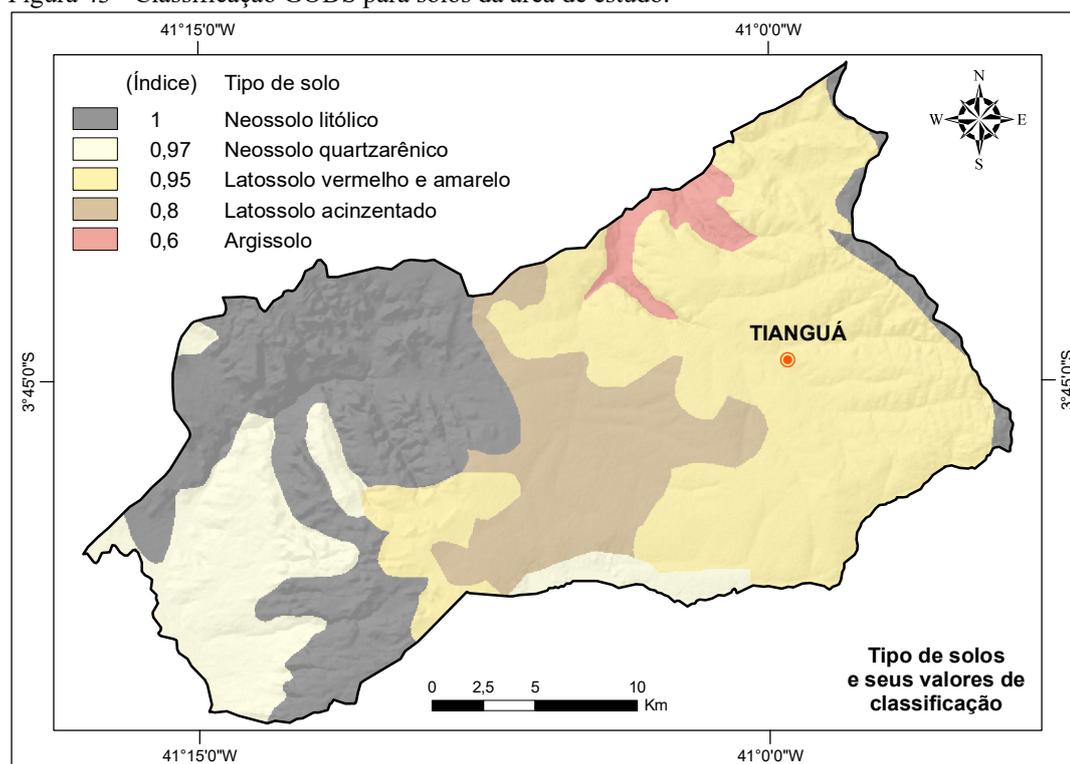
8.4. Avaliação da vulnerabilidade pelo modelo GODS

O modelo GODS para a avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação se diferenciou do modelo GOD pela adição de um componente S, ou seja, um parâmetro para classificar o tipo de solo. Desta maneira, além de utilizar uma nova componente, este modelo utilizou os mesmos resultados encontrados para os parâmetros, grau de confinamento da água subterrânea, ocorrência de estratos de cobertura e distância até o lençol freático, empregados no modelo GOD e, desta maneira, não sendo necessário, novas discussões sobre estes três últimos.

8.4.1. Tipo de cobertura do solo

O tipo de cobertura do solo, para o modelo GODS (Figura 43), seguiu os mesmos princípios adotados para a classificação do parâmetro solos, referente ao modelo DRASTIC, diferenciando-se, do mesmo, por apresentar índices com valores distintos. Desta maneira, a área estudada, também, conta com a presença dos cinco tipos de solos descritos no item 8.1.4: neossolos litólicos (1), neossolos quartzarênicos (0,97), latossolos vermelho e amarelo (0,95), latossolos acinzentados (0,8) e argissolos (0,6), sendo estes, listados com seus respectivos índices de classificação GODS. Como a utilização do mapa de solos foi comum aos dois modelos, as proporções e áreas de ocorrências foram mantidas, conforme o item citado anteriormente.

Figura 43 - Classificação GODS para solos da área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

8.4.2. Mapa da avaliação da vulnerabilidade pelo modelo GODS

Como discutido no item 8.3.4, referente ao mapa da avaliação da vulnerabilidade pelo modelo GOD, os parâmetros grau de confinamento da água subterrânea (G) e ocorrência de estratos de cobertura (O), não variaram para a área estudada, recebendo, respectivamente, índices com valores de classificação 0,4 e 0,75. Por sua vez, o produto entre estes dois índices possui peso muito forte e, independentemente dos valores dos índices que foram encontrados para o parâmetro da distância até o lençol freático (D), induzirá uma classificação final da vulnerabilidade com índices baixos, entre o intervalo 0,1 e 0,3.

De acordo com o Quadro 26, a componente S, adicionada ao modelo de vulnerabilidade GOD, como medida atenuadora a possíveis fontes poluidoras, apresentou índice médio de 0,94 e um coeficiente de variação baixo. Este elevado índice é favorecido pela grande presença de neossolos e latossolos na área estudada, facilitando a drenagem da água superficial ao aquífero. Desta maneira, o produto final, a partir da multiplicação do parâmetro S aos demais G, O e D, tenderá a diminuir os valores, contudo, próximos aos índices encontrados pelo modelo GOD.

Quadro 26 - Nível de importância dos parâmetros G, O, D, S.

	G	O	D	S
Mínimo	-	-	0,6	0,6
Máximo	-	-	0,9	1
Média	0,4	0,75	0,75	0,94
DP	-	-	0,1	0,08
CV (%)	-	-	13,33	8,51

Fonte: O Autor (2016). Legenda: G = grau de confinamento da água subterrânea; O = ocorrência de estratos de cobertura; D = distância até o lençol freático; S = Tipo de cobertura do solo; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; - = dados inexistentes.

Como podem ser observados no Quadro 27, mesmo com a adição da componente S como um atenuador a possíveis fontes de poluição, os índices gerados ficaram dentro da faixa de vulnerabilidade baixa, apresentando valores mínimo e máximo respectivos de 0,11 e 0,27. Seguindo o modelo GODS, assim como o GOD, a área estudada seria representada por uma única classe de vulnerabilidade, contudo, o presente trabalho optou pela criação e utilização de duas classes transitórias entre as vulnerabilidades insignificante, baixa e média. Desta forma, os índices encontrados foram agrupados em três classes: insignificante a baixa (0,11 a 0,15), baixa (0,15 a 0,25) e baixa a moderada (0,25 a 0,27).

Quadro 27 - Índice de vulnerabilidade GODS para a área de estudo.

Classes	Intervalo de classe	Área (Km²)	Fração da Área (%)
Insignificante a baixa	0,11 - 0,15	13,62	1,88
Baixa	0,15 - 0,25	630,15	86,96
Baixa a média	0,25 - 0,27	80,70	11,16
Total		724,64	100

Fonte: O Autor (2016).

De acordo com o Quadro 27 e a Figura 44, a classe transitória para a vulnerabilidade insignificante a baixa ocupa uma pequena faixa de 13,62 Km² (ou 1,88%) na porção nordeste da área estudada. Os índices menores para esta classe se deram em função da presença de argissolos neste setor, que dificultam a drenagem da água superficial para o aquífero.

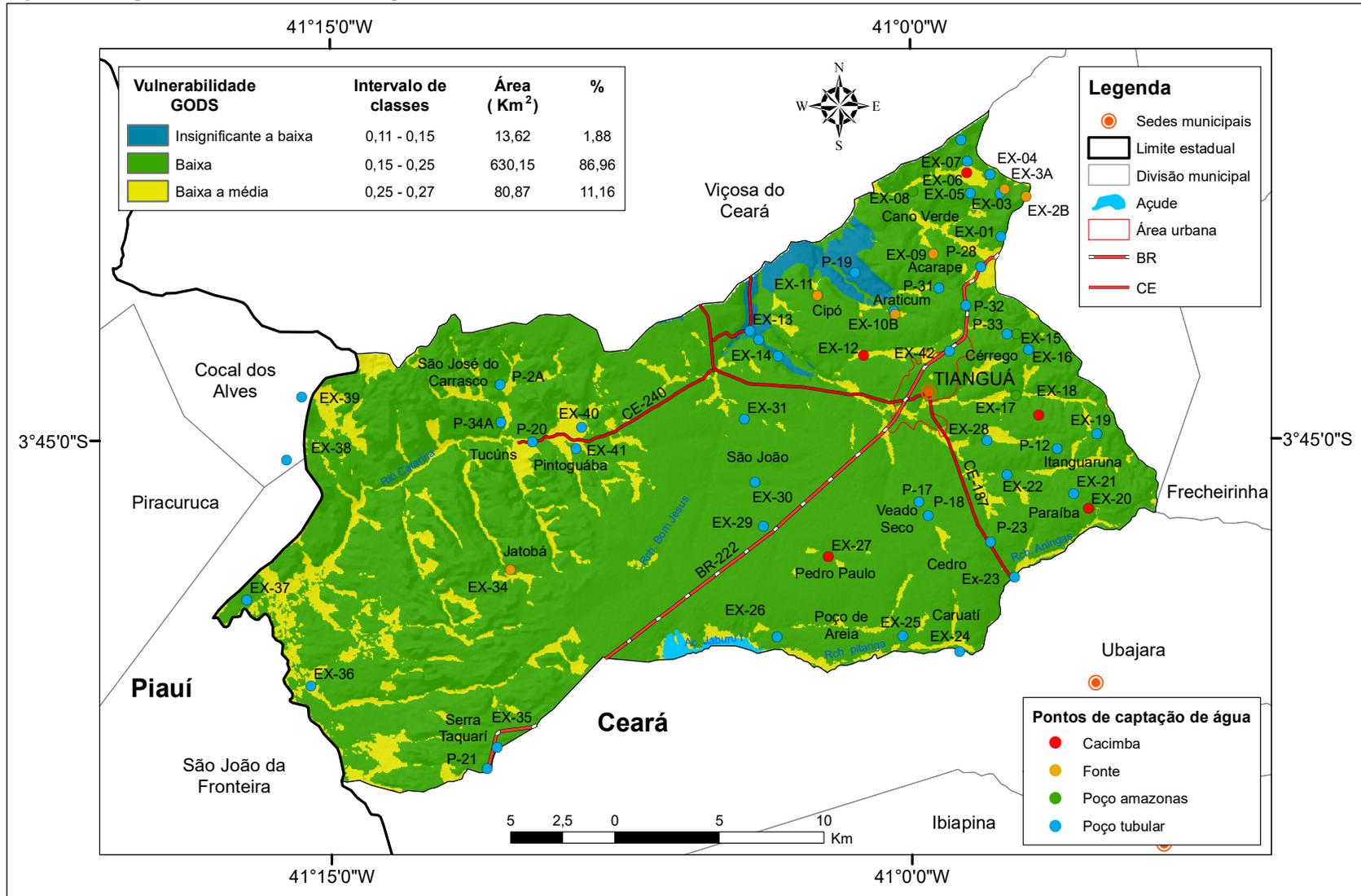
A classe de vulnerabilidade baixa representa os índices entre os valores 0,15 a 0,25. Possui grande abrangência dentro da área estudada, 629,28 Km² (ou 86,84%). Esta classe se assemelha a sua análoga pelo modelo GOD, pois as grandes proporções de neossolos (41,62%) e latossolos (55,85%) presentes na área tenderam a diminuir os valores, contudo, próximos aos índices encontrados pelo referido modelo, como mencionado no início do capítulo.

A segunda classe transitória, referente a vulnerabilidade baixa a média, abrange 80,87 Km² ou 11,16% da área estudada. Ocorre de forma restrita, nas regiões dominadas por

profundidades inferiores a 5 m para a superfície freática, principalmente ao longo das calhas de rios e riachos.

Mesmo com a adição do parâmetro solo com o intuito de melhorar os resultados alcançados pelo modelo GOD, o modelo GODS também mostrou resultados generalistas em relação ao DRASTIC e AVI. Dessa forma o presente modelo também apresentou para a área de pesquisa um resultado total de baixa vulnerabilidade. Assim como os resultados do GOD, o modelo GODS mostrou que toda a área está passiva a ocupação territorial, indo de contramão a realidade, pois a mesma, como um todo, não possui comportamento homogêneo. Com a criação das classes transitórias baixa a média e insignificante a baixa foi possível quebrar essa homogeneidade, onde a primeira destaca-se com as regiões de margens e calhas de rios como as únicas áreas que deve ser evitada pela ocupação, por outro lado, a zona classificada como insignificante a baixa está localizada em uma área extremamente íngreme.

Figura 44 - Mapa de vulnerabilidade GODS para a área de estudo.

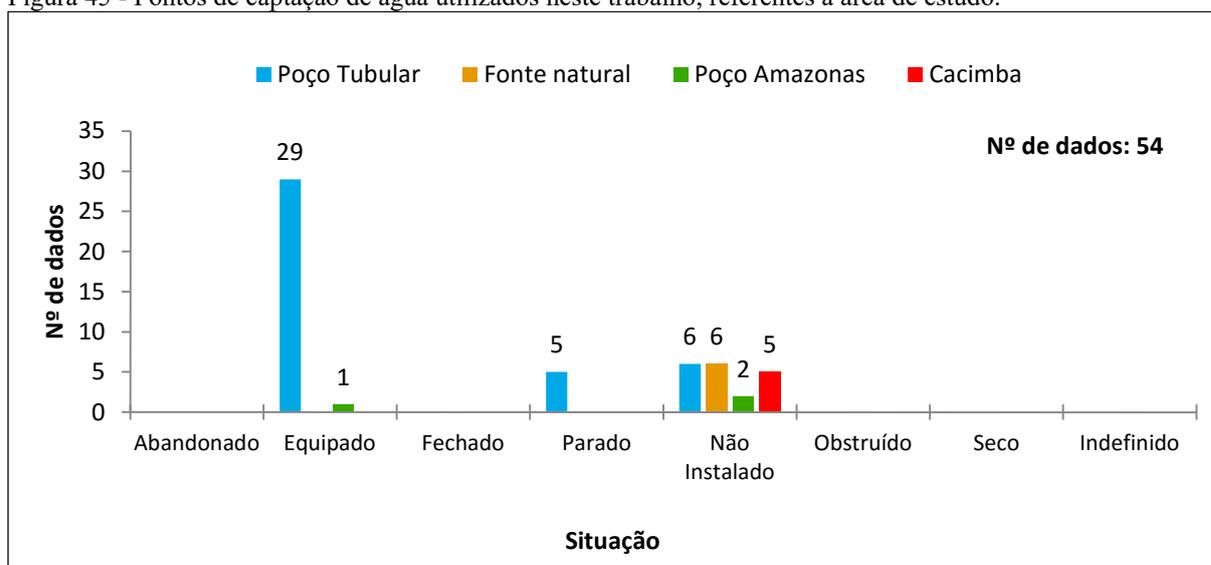


Fonte: O autor (2016).

8.5. Nitrato

As determinações para nitrato (NO_3^-), expressas em nitrogênio (N-NO_3^-), foram realizadas durante o mês de novembro/2014 e, dos 57 poços selecionados para este trabalho, somente 54 pontos de captação de água foram analisados, sendo 40 poços tubulares, 6 fontes naturais, 5 cacimbas e 3 poços amazonas, mostrados na Figura 45 e Quadro 28.

Figura 45 - Pontos de captação de água utilizados neste trabalho, referentes à área de estudo.



Fonte: O autor (2016).

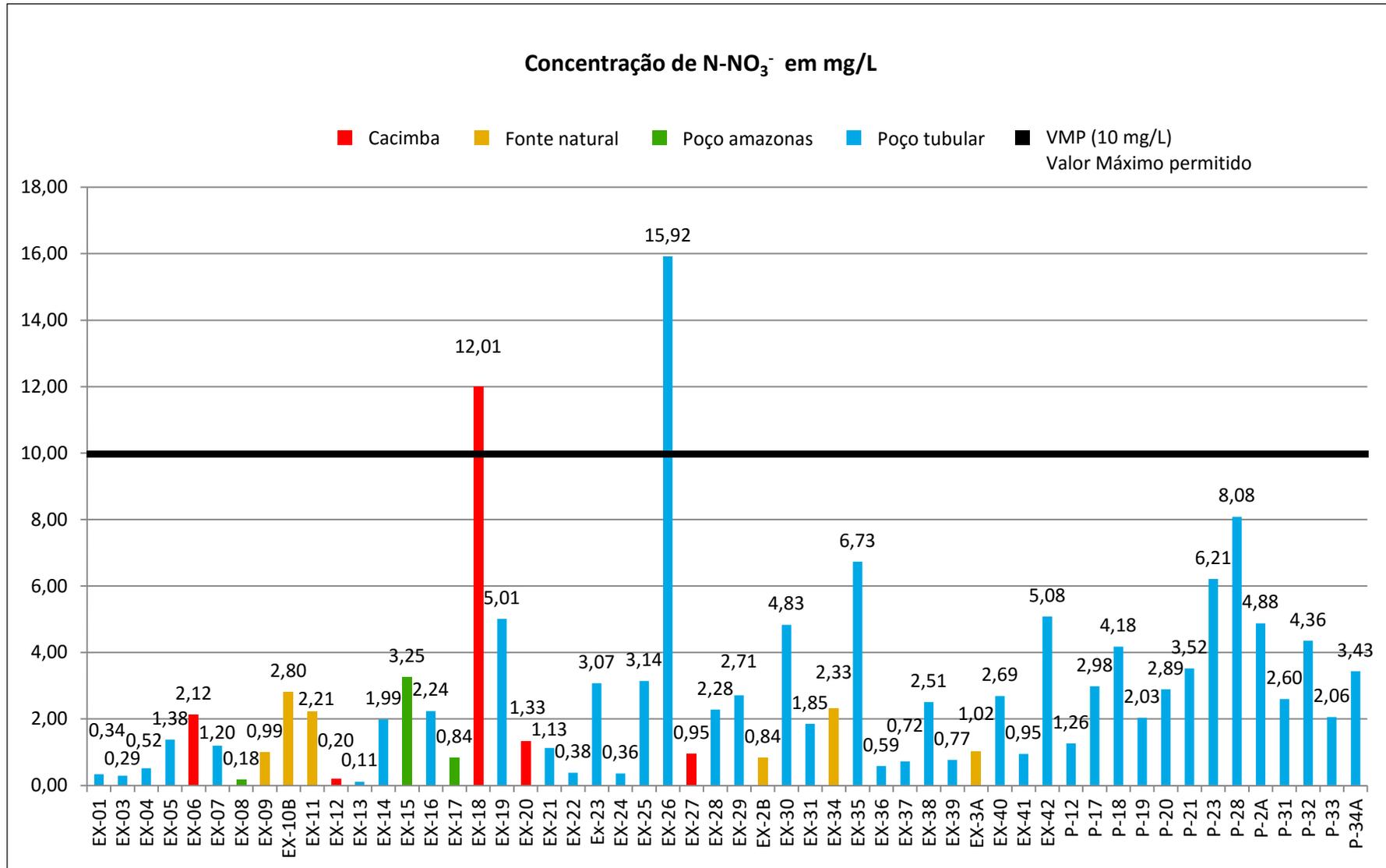
A área de estudo está associada a uma grande diversificação de culturas de alimentos e, ao mesmo tempo, a utilização de adubos nitrogenados no solo corrobora para o aumento das concentrações de nitrato nas águas subterrâneas. De acordo com o mapa de distribuição dos pontos de captação de água e suas respectivas concentrações de nitrato (Figura 46), é possível observar que 42 pontos (77,8%), estão associados às áreas desmatadas para práticas agrícolas. Na Figura 47 podem ser observadas as concentrações de N-NO_3^- e, apesar de a grande maioria (96,3%) estar abaixo do valor máximo permitido, não devem ser desconsideradas, pois estas concentrações podem aumentar, ainda mais, ao longo dos anos.

Quadro 28 - Pontos de captação de água selecionados para análise de nitrato.

Ponto	SIAGAS	UTMN	UTME	Local	Tipo
EX-01	Não cadastrado	9594886	282185	Vila Acarape	Poço
EX-03	Não cadastrado	9596937	282128	Sítio Burití	Poço
EX-04	Não cadastrado	9597839	281682	Sítio Burití	Poço
EX-05	Não cadastrado	9596948	280716	Sítio Burití	Poço
EX-06	Não cadastrado	9597896	280541	Sítio Burití	Cacimba
EX-07	Não cadastrado	9598477	280573	Sítio Burití	Poço
EX-08	Não cadastrado	9597012	277959	Cano Verde	Poço
EX-09	Não cadastrado	9594059	278944	Sítio Limão	Fonte
EX-10B	Não cadastrado	9591186	277111	Olho d'Água grande	Fonte
EX-11	Não cadastrado	9592069	273403	Cipó	Fonte
EX-12	Não cadastrado	9589252	275621	Riacho Palmeira / Campo de	Cacimba
EX-13	Não cadastrado	9590404	270150	Remissão	Poço
EX-14	Não cadastrado	9589215	271523	Sítio São Miguel	Poço
EX-15	Não cadastrado	9590234	282945	Córrego	Poço
EX-16	Não cadastrado	9589497	283516	Sítio São Francisco	Poço
EX-17	Não cadastrado	9587326	282929	Boa Esperança	Poço
EX-18	Não cadastrado	9586397	283994	Sítio Lajes	Cacimba
EX-19	Não cadastrado	9585491	286786	Itaguaruna	Poço
EX-20	Não cadastrado	9581967	286387	Aningas	Cacimba
EX-21	Não cadastrado	9582688	285679	Itapúca	Poço
EX-22	Não cadastrado	9583565	282473	Sítio Pitanguinha	Poço
EX-23	Não cadastrado	9578675	282863	Sítio Lajes / Tabocas	Poço
EX-24	Não cadastrado	9575150	280202	Nova Veneza	Poço
EX-25	Não cadastrado	9575878	277481	Fim do Córrego	Poço
EX-26	Não cadastrado	9575857	271476	Poço de Areia	Poço
EX-27	Não cadastrado	9579677	273936	Pedro Paulo	Cacimba
EX-28	2300020805	9585202	281518	Sítio São José	Poço
EX-29	Não cadastrado	9581110	270810	Sítio São João (BR 222 - km 326)	Poço
EX-2B	Não cadastrado	9596798	283396	Cascata	Fonte
EX-30	Não cadastrado	9583207	270418	São João	Poço
EX-31	Não cadastrado	9586201	269913	São João	Poço
EX-34	Não cadastrado	9579052	258701	Jatobá	Fonte
EX-35	Não cadastrado	9570593	258067	Queimadas	Poço
EX-36	Não cadastrado	9573528	249150	Aroeira	Poço
EX-37	Não cadastrado	9577613	246075	Assentamento Cercado Novo	Poço
EX-38	Não cadastrado	9584261	247987	Santo Hilário	Poço
EX-39	Não cadastrado	9587240	248706	Arataca	Poço
EX-3A	Não cadastrado	9597142	282378	Sítio Burití	Fonte
EX-40	Não cadastrado	9585809	262115	Montes Claros	Poço
EX-41	Não cadastrado	9584797	261844	Pintoguaba	Poço
EX-42	Não cadastrado	9589428	279723	Hotel Ibiapina	Poço
P-12	2300020423	9584802	284897	Sítio Cidade	Poço
P-17	2300020428	9582250	278272	Sítio Veados	Poço
P-18	2300020429	9581614	278708	Sítio Cacimbas	Poço
P-19	2300020430	9593154	275194	Sítio Pé do Morro	Poço
P-20	2300020431	9585116	259756	Tucuns	Poço
P-21	2300020776	9569604	257578	Ponta da Serra (Col. J. P. da Costa)	Poço
P-23	2300020800	9580350	281686	Taboca	Poço
P-28	2300021005	9593454	281222	Acarape	Poço
P-2A	2300018609	9587828	258198	São José dos Coelhos	Poço
P-31	2300021008	9592430	279210	Sítio Araticum	Poço
P-32	2300021306	9591586	280514	Sítio Jenipapo / PRF	Poço
P-33	2300021308	9590240	282479	Sítio Marinema	Poço
P-34A	2300021309	9586073	258253	Sítio Desterro	Poço

Fonte: SIAGAS (novembro, 2014) e etapa de campo (novembro, 2014). Número de poços: 54.

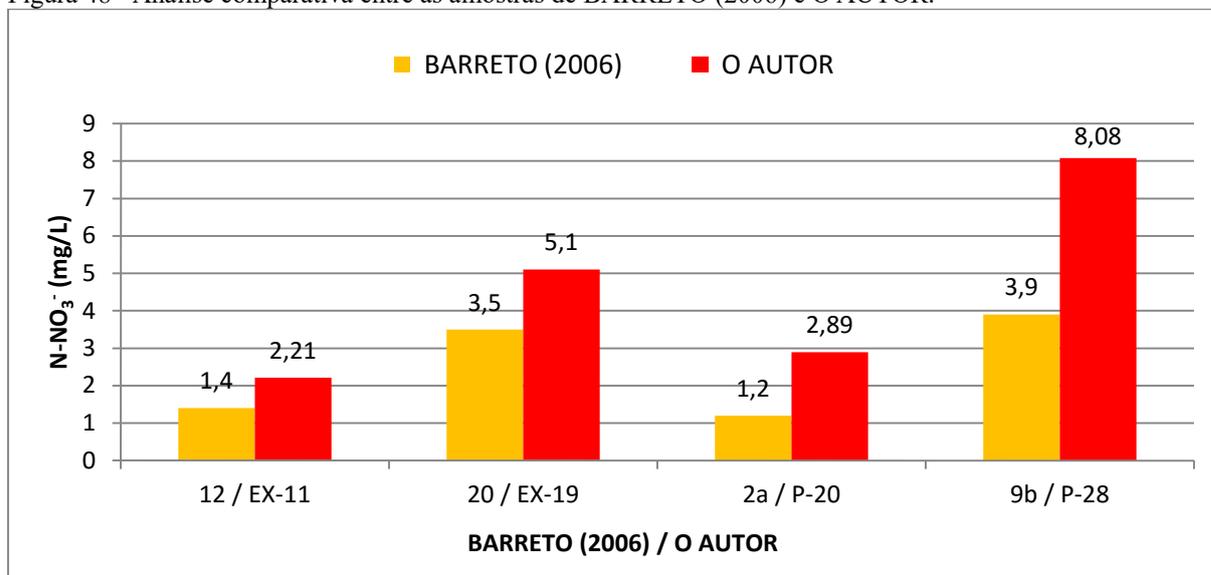
Figura 47 - Concentrações de N-NO₃⁻ na área de estudo para o mês de novembro de 2014.



Fonte: O autor (2016).

O presente trabalho, buscando uma maneira de acompanhar o aumento ou diminuição das concentrações de nitrato no aquífero, correlacionou os resultados encontrados de quatro amostras com as análises de nitrato, de poços próximos, feitas por Barreto (2006), como podem ser observadas na Figura 48.

Figura 48 - Análise comparativa entre as amostras de BARRETO (2006) e O AUTOR.

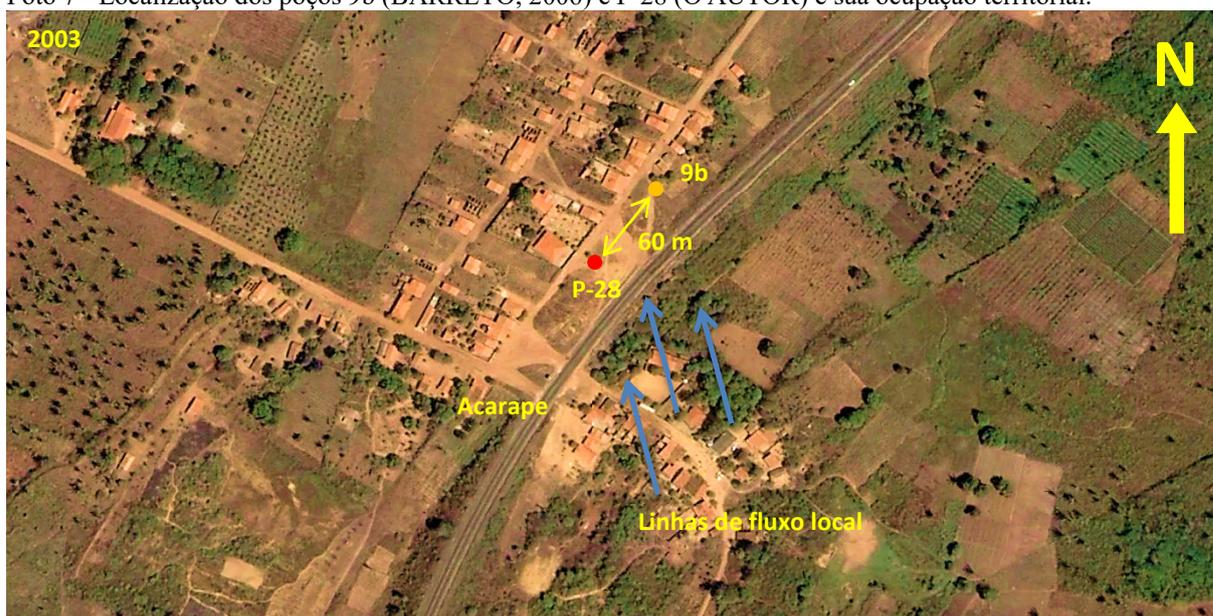


Fonte: Barreto (2006) e o autor (2016).

Com base na análise comparativa de nitrato como nitrogênio para as amostras EX-11; EX-19; P-20 e; P-28 deste trabalho e, respectivamente, entre as amostras 12; 20; 2a e; 9b pertinentes ao trabalho de Barreto (2006), referentes ao período de dezembro de 2004 a janeiro de 2006, nota-se um aumento na concentração de nitrato. No entanto, estas maiores concentrações têm forte indício da presença de fossas sépticas em decorrência do aumento ocupacional do território.

Para reforçar esta hipótese, foram analisadas as amostras 9b e P-28 com imagens retiradas do Google Earth de 2003 e 2012 (Fotos 7 e 8). A partir desta associação, pode-se observar um aumento na ocupação do território com a construção de novas casas na comunidade de Acarape, localizada às margens da BR-222 e distando aproximadamente 7 km do centro comercial do município, sentido Ceará - Piauí. A partir das análises realizadas por Barreto (2006) e do autor (2016) é admissível considerar um aumento maior das concentrações de nitrato no aquífero vinculadas, principalmente, às fossas sépticas, visto que obras de saneamento básico não existem nas comunidades em torno da sede de Tianguá. Somados a isso, tem-se ainda o bombeamento constate do poço comunitário que pode interferir diretamente na dinâmica do fluxo hidrogeológico, fazendo com que o mesmo inverta o sentido e traga consigo contaminantes oriundos das fossas.

Foto 7 - Localização dos poços 9b (BARRETO, 2006) e P-28 (O AUTOR) e sua ocupação territorial.



Acarape, imagens retiradas do Google Earth de 2003, coordenadas UTM (WGS84) para os poços 9b (Y: 9593479 e X: 281271) e P-28 (Y: 9593454 e X: 2812221).

Foto 8 - Localização dos poços 9b (BARRETO, 2006) e P-28 (O AUTOR) e sua ocupação territorial.



Acarape, imagens retiradas do Google Earth de 2013, coordenadas UTM (WGS84) para os poços 9b (Y: 9593479 e X: 281271) e P-28 (Y: 9593454 e X: 2812221).

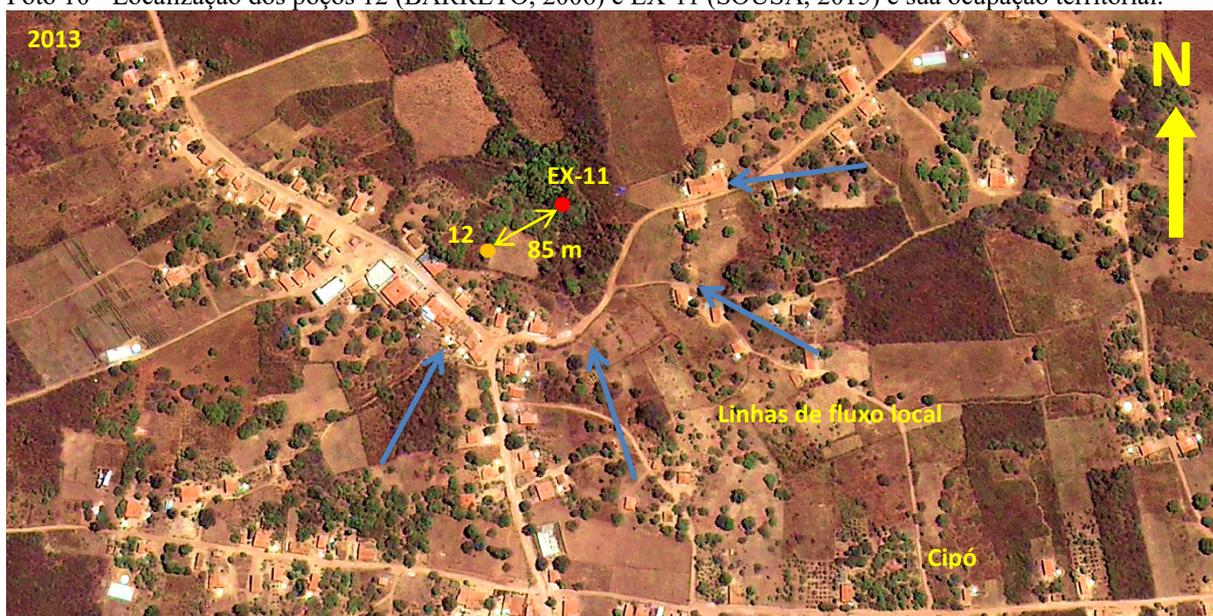
A localidade de Cipó em comparação a localidade de Acararape não sofreu uma ocupação tão intensa entre os anos de 2003 e 2013 como pode ser observada nas Fotos 9 e 10. Essa menor ocupação pode ter refletido diretamente em uma concentração não tão expressiva como a observada na amostra P-28. Embora não apresente aumento bastante expressivo na concentração de nitrato, esse aumento torna-se significativo em comparação a amostra 12 de Barreto (2006).

Foto 9 - Localização dos poços 12 (BARRETO, 2006) e EX-11 (SOUSA, 2015) e sua ocupação territorial.



Cipó, imagens retiradas do Google Earth de 2003, coordenadas UTM (WGS84) para os poços 12 (Y: 9592025 e X: 273332) e EX-11 (Y: 9592069 e X: 273403).

Foto 10 - Localização dos poços 12 (BARRETO, 2006) e EX-11 (SOUSA, 2015) e sua ocupação territorial.



Cipó, imagens retiradas do Google Earth de 2013, coordenadas UTM (WGS84) para os poços 12 (Y: 9592025 e X: 273332) e EX-11 (Y: 9592069 e X: 273403).

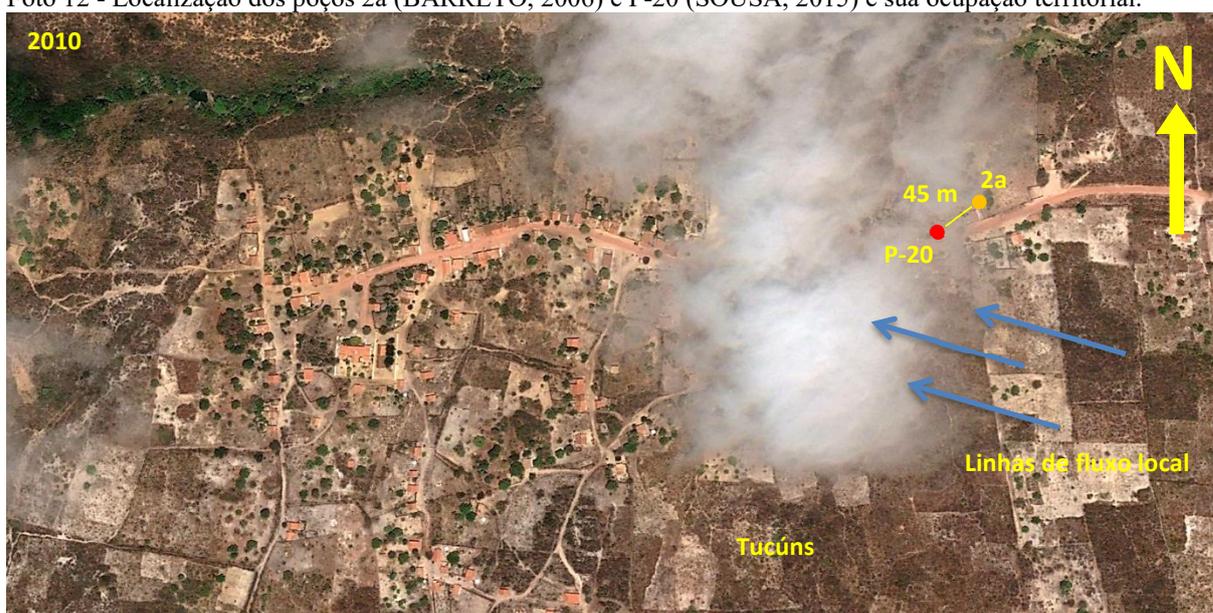
Como pode ser observado nas Fotos 11 e 12 referentes à localidade de Tucúns, respectivamente para os anos de 2003 e 2010 (fotos mais recentes apresentaram problema), houve um aumento ocupacional mais notável na porção centro oeste da foto. No entanto, o poço P-20 não apresentou aumento expressivo nos níveis de concentração de nitrato como os encontrados nos poços P-28 (Acarape) e EX-19 (Itaguaruna), provavelmente relacionado ao o fluxo local que vai de SE-NW, afastando a maior contaminação do poço.

Foto 11 - Localização dos poços 2a (BARRETO, 2006) e P-20 (SOUSA, 2015) e sua ocupação territorial.



Tucúns, imagens retiradas do Google Earth de 2003, coordenadas UTM (WGS84) para os poços 2a (Y: 9585156 e X: 259786) e P-20 (Y: 9585116 e X: 259759).

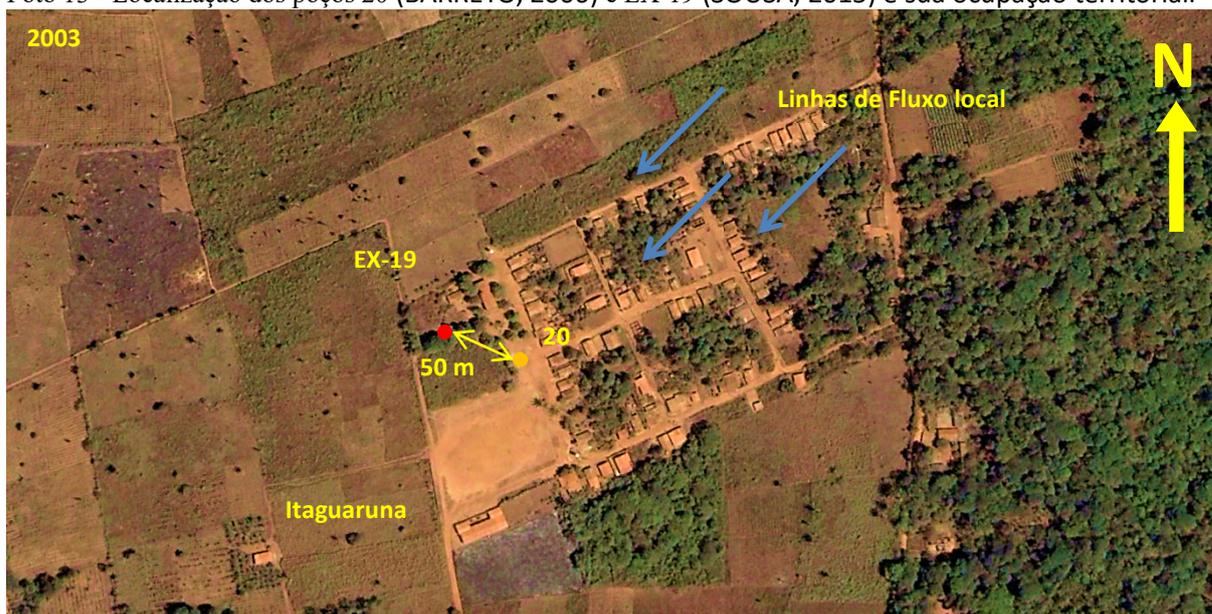
Foto 12 - Localização dos poços 2a (BARRETO, 2006) e P-20 (SOUSA, 2015) e sua ocupação territorial.



Tucúns, imagens retiradas do Google Earth de 2010, coordenadas UTM (WGS84) para os poços 2a (Y: 9585156 e X: 259786) e P-20 (Y: 9585116 e X: 259759).

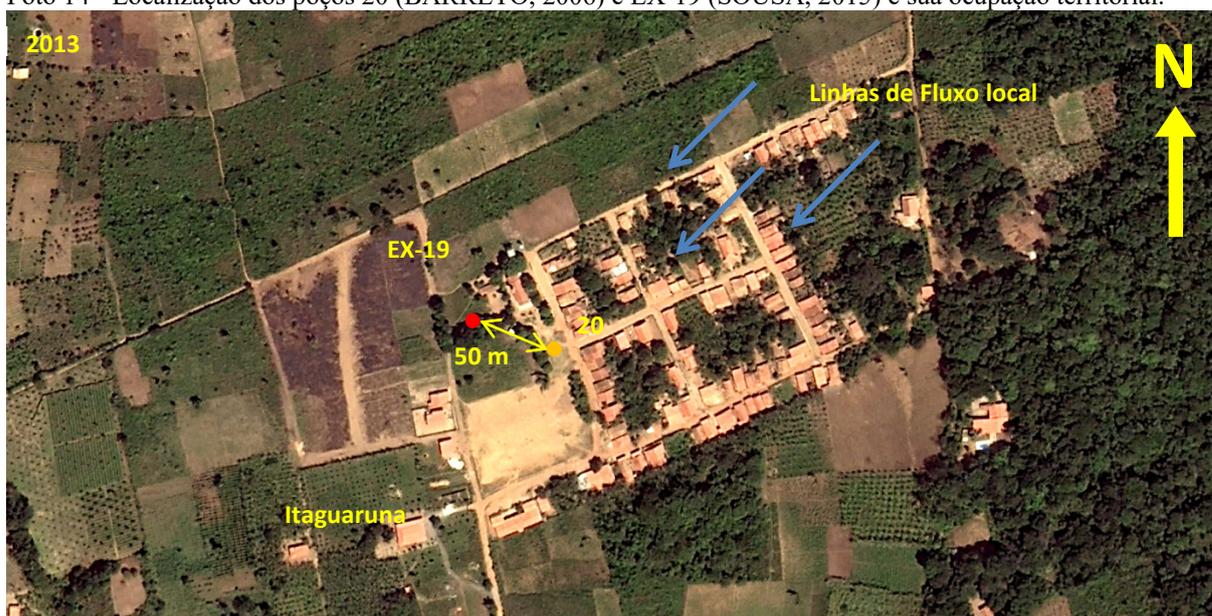
O aumento ocupacional para a localidade de Itaguaruna como pode ser observado nas Fotos 13 e 14, respectivamente para os anos de 2003 e 2013, ocorreu de forma pouco visível, no entanto as concentrações de nitrato são bem mais significativas em relação às localidades de Cipó (amostra EX-11) e Tucúns (Amostra P-20). Além da contribuição da aplicação de adubos nitrogenados no solo, esse valor mais expressivo pode estar relacionado, principalmente, ao maior agrupamento de casas, assim como na localidade de Acarape.

Foto 13 - Localização dos poços 20 (BARRETO, 2006) e EX-19 (SOUSA, 2015) e sua ocupação territorial.



Itaguaruna, imagens retiradas do Google Earth de 2003, coordenadas UTM (WGS84) para os poços 20 (Y: 9585451 e X: 286851) e EX-19 (Y: 9585491 e X: 286786).

Foto 14 - Localização dos poços 20 (BARRETO, 2006) e EX-19 (SOUSA, 2015) e sua ocupação territorial.



Itaguaruna, imagens retiradas do Google Earth de 2013, coordenadas UTM (WGS84) para os poços 20 (Y: 9585451 e X: 286851) e EX-19 (Y: 9585491 e X: 286786).

A comunidade de Poço de Areia não apresentou um desenvolvimento em sua ocupação territorial significativo ao longo dos anos, mas, sim, uma atividade agrícola intensa que pode favorecer o aumento da concentração de N-NO_3^- no aquífero. No entanto, a análise feita para o poço EX-26 (Foto 15) apresentou resultado de 15,92 mg/L para N-NO_3^- , ou seja, 59,2 % acima do valor máximo permitido.

Comparando o resultado obtido da análise de N-NO_3^- da amostra EX-26 e, seguindo o mesmo contexto agrícola, com as demais amostras EX-25, EX-24 e EX-23 e seus respectivos valores 3,14, 0,36 e 3,07 em mg/L, pode-se verificar uma discrepância entre estes valores e uma provável não apenas por contaminantes oriundos de adubos nitrogenados.

Foto 15 - Localização do poço EX-26.



Poço de Areia, imagens retiradas do Google Earth de 2013, coordenadas UTM (WGS84) Y: 9575857 e X: 271476.

Uma possível contaminação poderia estar atrelada ao contínuo bombeamento para tanques de irrigação, o que estaria gerando um cone de rebaixamento e invertendo o fluxo subterrâneo e, desta maneira, trazendo os dejetos de uma fossa séptica, localizada a uma distância de 33 metros, para dentro do poço.

Na comunidade Sítio Lajes, a concentração de N-NO_3^- para a amostra EX-18 (Foto 14), mesmo sendo uma cacimba, ficou muito acima das demais análises para o mesmo tipo de ponto de captação de água deste trabalho. Esta concentração mais elevada de N-NO_3^- pode estar associada principalmente ao posicionamento da cacimba pois, o ponto amostrado, está localizado logo abaixo do nível da maioria das fossas sépticas da localidade, onde o fluxo local apresenta direção NE - SW que favorecem a entrada do contaminante ao poço.

A análise de nitrato realizada para a amostra EX-18 apresentou concentração de 12,01 mg/L, ou seja, 20% acima do valor máximo permitido. Assim como no poço EX-26 na comunidade de Poço de Areia, citado anteriormente, fica evidente a contaminação por fossas sépticas.

Outra forma que facilita a contaminação, não devendo ser descartada, é a percolação de fluidos oriundos de fossas sépticas através das inúmeras fraturas que ocorrem por toda região. Assim, como mencionado no capítulo 3.4.1, referente a composição litológica do aquífero, esta zona não saturada, fator que deveria ser atenuador à contaminação, pode ter sido diminuído ou anulado em virtude da presença das fraturas, acelerando o fluxo do contaminante em direção ao aquífero, neste caso, à cacimba.

Foto 16 - Localização do poço EX-18, comunidade Sítio Lajes.



Sítio Lajes, imagens retiradas do Google Earth de 2013, coordenadas UTM (WGS84) Y: 9586397 e X: 283994.

De acordo com as análises observadas ao longo deste capítulo, referente à área de estudo, foi possível estabelecer que as concentrações mais elevadas para nitrato estejam associadas, principalmente, a contaminação a partir de fossas sépticas devido ao aumento ocupacional do terreno. Por outro lado, a contaminação através da utilização de adubos nitrogenados no solo atua de forma bastante significativa por toda a área estudada, contribuindo assim com o aumento das concentrações de nitrato na água subterrânea.

8.6. Relação entre o modelo de vulnerabilidade DRASTIC e o uso e ocupação do solo

Comparando os modelos de avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação DRASTIC, AVI, GOD e GODS para um mesmo tipo de aquífero, foi possível observar que a diferença existente em cada resultado está atrelada a resolução e escala de trabalho, ou seja, a primeira está diretamente ligada à quantidade de parâmetros analisados e, a segunda, ao tamanho da área a ser estudada. Desta maneira, a aplicação do modelo DRASTIC para áreas com dimensões menores e, neste caso de estudo, com apenas um tipo de litologia, apresentou um nível de detalhamento maior que os demais modelos. Por outro lado, sua utilização pode se tornar inconveniente para áreas muito grandes, escalas regionais, onde detalhes podem desaparecer.

A partir da escolha do modelo de vulnerabilidade, neste caso, o modelo DRASTIC, foram aplicados, ao mesmo, as informações pertinentes às análises pontuais de nitrato, potenciometria, uso e ocupação do solo, além dos levantamentos pontuais que possam causar contaminação ao aquífero, tais como: aterros sanitários, lixões e cemitérios. O resultado desta integração gerou um mapa final com as relações entre as classes de vulnerabilidade de aquífero DRASTIC e a ocupação da área estudada.

Como discutido no item 8.5, referente ao nitrato, 96,3% das análises ficaram abaixo do valor máximo permitido, não devendo as mesmas serem desconsideradas, pois estas concentrações estão associadas, em geral, a fossas sépticas e ao intenso uso de fertilizantes nitrogenados, além do mais, 42 ou 77,8% dos poços analisados se encontram nas áreas desmatadas para práticas agrícolas.

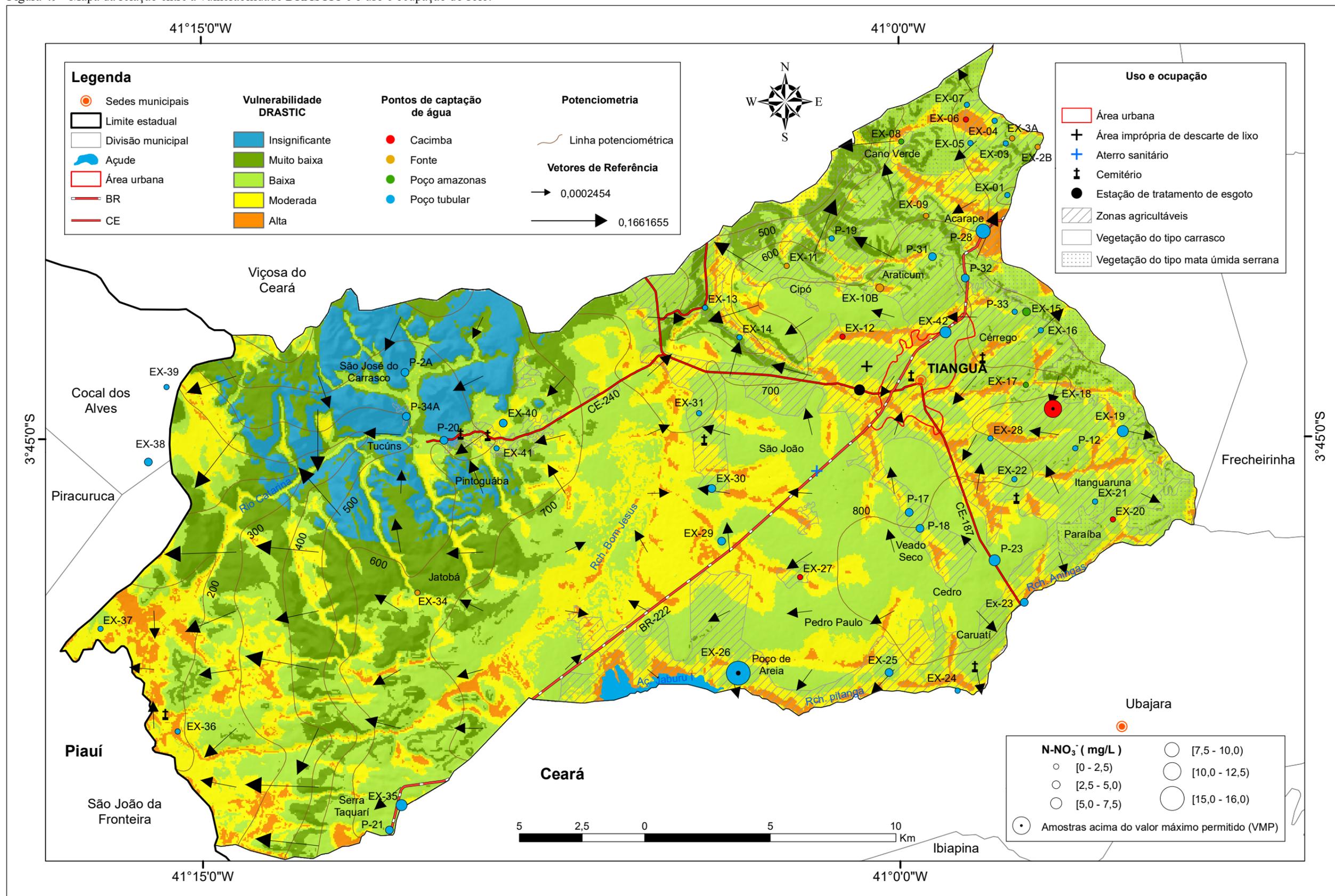
A partir do Quadro 29, podem ser observados os pontos analisados com suas concentrações para nitrato e suas respectivas classificações DRASTIC, além de suas localizações, visualizadas no mapa da relação da vulnerabilidade DRASTIC com o uso e ocupação da área estudada (Figura 49). A grande parte dos poços analisados, 38 ou 70,37%, estão localizados em áreas de baixa vulnerabilidade, onde 31 destes estão presentes em áreas agricultáveis e os demais em áreas com vegetação nativa. As áreas com vulnerabilidade insignificante possuem apenas 2 poços, sendo um localizado em zona agricultável e outro em área com vegetação. As áreas de vulnerabilidade muito baixa apresentam 4 poços em zonas agricultáveis, e apenas 1 na zona com vegetação. As áreas de vulnerabilidade moderada apresentam 3 poços em áreas desmatadas e 2 em zonas com vegetação nativa. As áreas classificadas como sendo de alta vulnerabilidade apresentaram 3 poços em zonas agricultáveis e 1 para zona com vegetação.

Quadro 29 - Análises pontuais de nitrato e suas respectivas áreas de vulnerabilidade DRASTIC.

Ponto	UTMN	UTME	Local	N-NO ₃ ⁻	Vulnerabilidade DRASTIC
EX-01	9594886	282185	Vila Acarape	0,34	Baixa
EX-03	9596937	282128	Sítio Burití	0,29	Baixa
EX-04	9597839	281682	Sítio Burití	0,52	Moderada
EX-05	9596948	280716	Sítio Burití	1,38	Baixa
EX-06	9597896	280541	Sítio Burití	2,12	Alta
EX-07	9598477	280573	Sítio Burití	1,20	Baixa
EX-08	9597012	277959	Cano Verde	0,18	Baixa
EX-09	9594059	278944	Sítio Limão	1,00	Muito baixa
EX-10B	9591186	277111	Olho d'Água grande	2,80	Alta
EX-11	9592069	273403	Cipó	2,21	Baixa
EX-12	9589252	275621	Riacho Palmeira / Campo de pouso	0,20	Alta
EX-13	9590404	270150	Remissão	0,11	Muito baixa
EX-14	9589215	271523	Sítio São Miguel	1,99	Muito baixa
EX-15	9590234	282945	Córrego	3,25	Baixa
EX-16	9589497	283516	Sítio São Francisco	2,24	Baixa
EX-17	9587326	282929	Boa Esperança	0,84	Moderada
EX-18	9586397	283994	Sítio Lajes	12,01	Baixa
EX-19	9585491	286786	Itaguaruna	5,01	Moderada
EX-20	9581967	286387	Aningas	1,33	Baixa
EX-21	9582688	285679	Itapúca	1,13	Baixa
EX-22	9583565	282473	Sítio Pitanguinha	0,38	Baixa
EX-23	9578675	282863	Sítio Lajes / Tabocas	3,07	Baixa
EX-24	9575150	280202	Nova Veneza	0,36	Baixa
EX-25	9575878	277481	Fim do Córrego	3,14	Baixa
EX-26	9575857	271476	Poço de Areia	15,92	Baixa
EX-27	9579677	273936	Pedro Paulo	0,95	Baixa
EX-28	9585202	281518	Sítio São José	2,28	Baixa
EX-29	9581110	270810	Sítio São João (BR 222 - km 326)	2,71	Baixa
EX-2B	9596798	283396	Cascata	0,84	Baixa
EX-30	9583207	270418	São João	4,83	Baixa
EX-31	9586201	269913	São João	1,85	Baixa
EX-34	9579052	258701	Jatobá	2,33	Muito baixa
EX-35	9570593	258067	Queimadas	6,73	Baixa
EX-36	9573528	249150	Aroeira	0,59	Alta
EX-37	9577613	246075	Assentamento Cercado Novo	0,72	Moderada
EX-38	9584261	247987	Santo Hilário	2,51	Baixa
EX-39	9587240	248706	Arataca	0,77	Baixa
EX-3A	9597142	282378	Sítio Burití	1,02	Baixa
EX-40	9585809	262115	Montes Claros	2,69	Moderada
EX-41	9584797	261844	Pintoguaba	0,95	Baixa
EX-42	9589428	279723	Hotel Ibiapina	5,08	Baixa
P-12	9584802	284897	Sítio Cidade	1,26	Baixa
P-17	9582250	278272	Sítio Veados	2,98	Baixa
P-18	9581614	278708	Sítio Cacimbas	4,18	Baixa
P-19	9593154	275194	Sítio Pé do Morro	2,03	Baixa
P-20	9585116	259756	Tucuns	2,89	Muito baixa
P-21	9569604	257578	Ponta da Serra (Col. J. P. da Costa)	3,52	Baixa
P-23	9580350	281686	Taboca	6,21	Baixa
P-28	9593454	281222	Acarape	8,08	Baixa
P-2A	9587828	258198	São José dos Coelhos	4,88	Insignificante
P-31	9592430	279210	Sítio Araticum	2,60	Baixa
P-32	9591586	280514	Sítio Jenipapo / PRF	4,36	Baixa
P-33	9590240	282479	Sítio Marinema	2,05	Baixa
P-34A	9586073	258253	Sítio Desterro	3,43	Insignificante

Fonte: O autor (2016).

Figura 49 - Mapa da relação entre a vulnerabilidade DRASTIC e o uso e ocupação do solo.



Fonte: O autor (2016).

Como mencionado no início deste trabalho, a área estudada possui 724,64 km², portanto, deste total, 1,23% está ocupada pela zona urbana, 27,30% áreas agricultáveis, 4,91% vegetação do tipo mata úmida serrana e 66,56% por vegetação do tipo carrasco, de acordo com a Figura 49 e elucidado no Quadro 30.

As áreas com os dois tipos de vegetação somam 517,93 Km² ou 71,47% de ocupação territorial e seus índices de vulnerabilidade variando de alta a insignificante, no entanto, como representam áreas ainda preservadas, o aquífero tende a um menor risco de contaminação.

A zona urbana ocupa 8,88 Km² da área de estudo e seus índices de vulnerabilidade são representados pela vulnerabilidade alta, moderada e baixa, ocupando respectivamente 8,45%; 35,13% e 56,42% do território urbano.

As áreas agricultáveis, por utilizarem adubos nitrogenados para o desenvolvimento das culturas e, por empregar agrotóxicos para o controle de pragas, representam os maiores riscos para a contaminação do aquífero. São responsáveis por ocupar 197,83 km² da área de estudo e com índices de vulnerabilidade DRASTIC variando de insignificante a alta. 54,37% das regiões agricultáveis estão enquadradas como sendo de baixa vulnerabilidade, 28,60% nas áreas de vulnerabilidade moderada, 10,99% para alta, 5,92% para muito baixa e, em menor proporção, as áreas de vulnerabilidade insignificante com 0,12%.

É importante ressaltar que, dos oito cemitérios observados durante a etapa de campo, sete estão instalados nas áreas agricultáveis ou desmatadas. A mesma quantidade também pode ser observada em associação com vulnerabilidades moderadas. De acordo com as Fotos 17 a 22 dos cemitérios, a grande maioria não possui as devidas proteções à contaminação, oriundas do processo de decomposição dos corpos.

Comparando a potenciometria e o sistema de drenagem da área, pode-se observar que há uma relação entre o fluxo subterrâneo e superficial, onde dependendo do período do ano o aquífero está influenciando diretamente os canais de drenagem. De acordo com o mapa da relação da vulnerabilidade DRASTIC com o uso e ocupação do solo, foi possível observar que o desenvolvimento da área estudada, principalmente no setor de agricultura, ocorre ao longo das margens dos rios e riacho, onde o uso de fertilizantes e agrotóxicos no solo tendem a ser carregados pelo fluxo subterrâneo e superficial, tendo os mesmos, a possibilidade de serem despejados nas drenagens e acumulados em barragens ou lagos.

A confecção do mapa da relação entre o modelo de vulnerabilidade DRASTIC e o uso e ocupação do solo teve como principal objetivo auxiliar os gestores e a sociedade em uma

melhor forma de gerenciar a ocupação territorial e garantir, desta forma, maior proteção ao aquífero. De acordo com a Figura 49 e como mencionado no item 8.1.8, os resultados encontrados para o modelo DRASTIC mostram que as melhores regiões com disponibilidades para a ocupação são aquelas classificadas com vulnerabilidade baixa. Estas regiões representam a maior proporção dentro da área pesquisada 45,17% (ou 327,32 km²), apresentam certa distância às margens dos rios e estão associadas a relevos suavemente ondulados. Por sua vez, as áreas com vulnerabilidade insignificante a muito baixa estão associadas a relevos ondulados a montanhosos, o que dificultaria a ocupação do território. Seguindo a contramão ao que foi exposto anteriormente, as zonas de vulnerabilidade moderada e alta deveriam ser aquelas com menor índice de ocupação, mas por estarem associadas a feições geomorfológicas mais aplainadas apresentam alto índice de ocupação, seja ela por urbanização ou zonas agricultáveis.

Quadro 30 - Uso e ocupação do solo com seus respectivos índices de vulnerabilidade DRASTIC para a área de estudo.

Tipo de ocupação	Área ocupada (Km ²)	Área ocupada (%)	Índice de vulnerabilidade DRASTIC	Índice por área ocupada (Km ²)	Índice por área ocupada (%)
Zona urbana	8,88	1,23	Alta	0,75	8,45
			Moderada	3,12	35,13
			Baixa	5,01	56,42
			Total	8,88	100
Áreas agricultáveis	197,83	27,30	Alta	21,74	10,99
			Moderada	56,56	28,60
			Baixa	107,57	54,37
			Muito baixa	11,72	5,92
			Insignificante	0,24	0,12
			Total	197,83	100
Vegetação carrasco	482,36	66,56	Alta	19,75	4,10
			Moderada	128,85	26,71
			Baixa	191,31	39,66
			Muito baixa	94,22	19,53
			Insignificante	48,23	10,00
			Total	482,36	100
Vegetação matas úmidas serranas	35,57	4,91	Alta	1,57	4,41
			Moderada	3,76	10,57
			Baixa	23,48	66,01
			Muito baixa	6,76	19,01
			Total	35,57	100
Valor Total	724,64	100			

Fonte: O autor (2016).

Foto 17 - Cemitério (Próximo ao Sítio Pitanguinha).



Fonte: O autor (2014). X: 282868; Y: 9582464.

Foto 20 - Cemitério (Aroeira).



Fonte: O autor (2014). X: 248497; Y: 9573769.

Foto 18 - Cemitério (Curuati).



Fonte: O autor (2014). X: 281248; Y: 9575747.

Foto 21 - Cemitério (Tucúns).



Fonte: O autor (2014). X: 261191; Y: 9584884.

Foto 19 - Cemitério (São João).



Fonte: O autor (2014). X: 270526; Y: 9584637.

Foto 22 - Cemitério (Córrego).



Fonte: O autor (2014). X: 280877; Y: 9588061.

9. CONCLUSÕES

As análises comparativas entre os modelos de avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação mostraram que o modelo DRASTIC foi o mais eficiente para um mesmo tipo de aquífero e para uma área de escala não regional, onde a mesma teve uma maior representatividade de pontos amostrados, além do mais a quantidade superior de parâmetros analisados, em relação aos demais modelos, aumentou a resolução de resposta da área estudada à contaminação. Todavia, a aplicação deste modelo para áreas de dimensões regionais pode tornar-se inconveniente, pois, detalhes podem ficar ocultos em virtude do grande espaçamento de amostragem. Por outro lado, a aplicação dos modelos AVI, GOD e GODS para regiões maiores e com diferentes tipos litológicos podem apresentar resultados mais satisfatórios.

Os valores encontrados para o modelo DRASTIC variaram de 90 a 176 que, por sua vez foram divididos nas classes: insignificante (90 - 100), muito baixa (100 - 120), baixa (120 - 140), moderada (140 - 160) e alta (160 - 176) com respectivas porcentagens na área estudada de 6,69%, 15,55%, 45,17%, 26,54% e 6,05%.

A soma entre as classes moderada e alta abrange aproximadamente um terço da área estudada (32,59% ou 236,16 Km²), destacando-se das demais por serem as mais susceptíveis a contaminação em decorrência da associação com as menores profundidades para o nível estático. Por serem áreas situadas em margens e córregos de rios e riachos, associadas as formas de relevos aplainadas a suavemente onduladas, favorecem a ocupação territorial, sendo que, na porção leste da área, onde os índices de precipitações são maiores, a ocupação ocorre de forma mais intensa. Desta maneira as zonas agricultáveis e urbana representam a ocupação territorial dentro da área de estudo, sendo estas as responsáveis pelos lançamentos das cargas contaminantes ao aquífero. A soma das classes moderada e alta para as zonas agricultáveis e urbana perfazem 82,17 Km² (ou 11,34%) da área estudada, sendo que na porção leste, estão praticamente 100% dentro destas zonas.

De acordo com as análises realizadas para nitrato e da comparação entre as amostras de Barreto (2006) e do autor, referente à área de estudo, foi possível estabelecer que as concentrações mais elevadas estejam associadas, principalmente, a contaminação a partir de fossas sépticas devido ao aumento ocupacional do terreno. Por outro lado, a contaminação através da utilização de adubos nitrogenados no solo atua de forma bastante significativa por toda a área estudada, contribuindo assim com o aumento das concentrações de nitrato na água subterrânea. As análises mostraram que 96,3% das amostras ficaram abaixo do valor máximo permitido, sendo que, 77,8% das mesmas foram realizadas em áreas desmatadas para práticas

agrícolas. Por outro lado, estas amostras não devem ser descartadas para futuras análises, pois, por mais que suas concentrações sejam baixas, evidenciam a provável utilização de adubos nitrogenados no solo.

Como forma de tentar auxiliar os gestores e a sociedade em uma melhor forma de gerenciar a ocupação territorial e garantir maior proteção ao aquífero e, de acordo com os resultados obtidos com a utilização do modelo DRASTIC, foi possível estabelecer que as melhores regiões com disponibilidades para a ocupação são aquelas classificadas com vulnerabilidade baixa. Estas regiões representam a maior proporção dentro da área pesquisada 45,17% (ou 327,32 km²), apresentam certa distância às margens dos rios e estão associadas a relevos suavemente ondulados. Por sua vez, as áreas com vulnerabilidade insignificante a muito baixa estão associados a relevos ondulados a montanhosos, o que dificultaria a ocupação do território. Seguindo a contramão ao que foi exposto anteriormente, as zonas de vulnerabilidade moderada e alta deveriam ser aquelas com menor índice de ocupação, mas por estarem associadas a feições geomorfológicas mais aplainadas apresentam alto índice de ocupação, seja ela por urbanização ou zonas agricultáveis.

10. RECOMENDAÇÕES

Devido à dificuldade na obtenção dos níveis d'água de poços particulares ou comunitários, relacionados ao bombeamento contínuo ou bastante prolongado, principalmente, em épocas de estiagem, delongam bastante os trabalhos em campo para a leitura destes níveis, pois é necessário a recuperação do mesmo. Desta maneira, é de suma importância, principalmente para áreas que utilizam a água subterrânea para irrigação, principalmente nas áreas classificadas com vulnerabilidades moderada e alta à instalação de poços de monitoramento (Ex: Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas - RIMAS, pertencentes a CPRM) para o acompanhamento sistemático das variações dos níveis estáticos e de possíveis plumas contaminantes oriundas das atividades agrícolas.

A utilização de agrotóxicos e adubos químicos nas áreas classificadas com vulnerabilidades moderada e alta estão mais susceptíveis a lixiviação para o aquífero e rios e, neste quesito, torna-se necessário um melhor estudo sobre os tipos mais adequados de agrotóxicos para estas áreas e o acompanhamento de suas concentrações na água.

Como uma forma de melhorar a resposta das interpolações para os parâmetro de profundidade do nível estático ou espessura da zona saturada, visando aumentar a resolução dos modelos de avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero, o presente trabalho recomenda o seguintes passos: Utilizar as cotas das drenagens e que, as mesmas, sejam subtraídas de um valor médio, valor este referente as profundidades dos níveis estáticos de poços tubulares, poços amazonas, cacimbas ou fontes existentes nestas drenagens e, desta forma, obter o valor dos níveis estáticos para as drenagens. Com a junção dos níveis estáticos oriundos dos poços que estão sendo ou serão estudados e das drenagens é possível gerar uma interpolação que acompanhem a superfície do terreno e, assim, contornar o problema da extrapolação dos níveis estáticos onde existem vales.

Criar um novo método de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação ou adaptar, aos já existentes, um parâmetro que contemple os fraturamentos da região, visto que estes são caminhos facilitadores ou preferenciais para as fontes poluidoras chegarem mais rápido ao aquífero.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHER, J. H.; PETTY, R. J. (1987). **DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. US EPA Report 600/2 – 85/018 Ada, Oklahoma.
- AGUIAR, R. B. de; VERÍSSIMO, L. S.; OLIVEIRA, L. T.; GALVÃO, M. J. da T. G.; e FEITOSA, F. A. C. Pesquisa Hidrogeológica em Bacias Sedimentares no Nordeste Brasileiro. In: **XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**, 2010.
- AGUIAR, R. B. de; SOUSA, R. R. de.; Recursos Hídricos Subterrâneos. In: BRANDÃO, R. de L; Freitas, L. C. B. (Org). **Geodiversidade do estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2014. P. 75-88. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade.
- AQUATER. **Estudo dos recursos hídricos subterrâneos do vale do Gurgueia, no estado do Piauí. Relatório Geral**. V. 3. 40p. [S. I.]. 1993.
- AUGE, M. Primeiro Curso de Pós-graduação de Hidrogeologia Ambiental. UBA: 1-65. Buenos Aires. 1995. Vulnerabilidade de aquíferos. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, Curitiba, n. 4, p. 85-103, 2004.
- AUGE, M. Vulnerabilidad de acuíferos: conceptos y metodos. Buenos Aires: Universidade de Buenos Aires, 2003. Disponível em < <http://www.tierra.redires.es/hidrored/ebvulnerabilidad.html> >.
- AUGUSTO, J. P. da S.; LOPES, R. da C. L.; VASCONCELOS, A. M.; BAHIA, R. B. C. **Bacias Sedimentares Peleozóicas e Meso-Cenozócas Interiores**. In: BIZZI, Luiz Augusto (Ed.) *et al.* Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. [Geology, tectonic and mineral resources of Brazil: text, maps and GIS]. Brasília: CPRM, 2003. 692 p.
- BARRETO, F. M. S. **Contaminação da água subterrânea por pesticidas e nitrato no município de Tianguá, Ceará**, 2006. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará. - UFC, Fortaleza, 2006.
- BRASIL. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS)**, 2014. Disponível em <[http://siagasweb.cprm.gov.br /layout/pesquisa_complexa](http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa)> Acessado em Novembro de 2014.
- BRASIL, Agencia Nacional de Águas (ANA). Sistemas de informações Hidrogeológicas (**HidroWeb**), 2015. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>.
- BRUNETTI, S.; PELLEGRINI, M. **Estudo dos Recursos Hídricos do Vale do Gurgueia, no Estado do Piauí**. Carta Cepro. V 16, Teresina, 16, Janeiro-Junho. 1999.
- CAMPBELL, D. F.; ALMEIDA, L. A. de, e SILVA, S. de O. 1949. **Relatório preliminar sobre a geologia da Bacia do Maranhão**. Cons. Nac. Petrol. Rio de Janeiro. Bol 1: 72-74.

CARBONELL, A. **Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty**. Washington: National Research Council, 1993.

CAPUTO, V. M.; LIMA, E. C. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande – Bacia do Parnaíba. In: **XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia**. Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: 1984. p. 740.

CASTANY, G. **Prospección y Explotación de Las Águas Subterráneas**. Barcelona: Ed. Omega S. A., 1975.

CEARÁ, Assembléia Legislativa do Estado do. **Cenário Atual dos Recursos Hídricos do Ceará** / Concelho de altos estudos e assuntos estratégicos, Assembléia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador). - Fortaleza: INESP, 2008. 174p.: il. - (Coleção Pactos das Águas).

COGERH. **Plano de Gestão Participativa dos Aquíferos da Bacia Potiguar, Estado do Ceará** – Relatório Final. Fortaleza, 2009. Disponível em <<http://portal.cogerh.com.br/>>.

CUSTÓDIO, E. Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la polución. In: **Seminário Hispano – Argentino sobre temas actuales de hidrologia subterránea**, 2., 1995, San Miguel de Tucumán. Anais... San Miguel de Tucumán: [s. n.], 1995. p. 99-122.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; Centro Nacional de Pesquisa de Agroindústria Tropical. **Dados climatológicos: Estação de Tianguá, 1997**. Fortaleza: Embrapa CNPAT/FUNCEME, 1998. 12p. (Embrapa-CNPAT. Boletim Agrometeorológico, 12).

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Solos do Nordeste**. Recife: Embrapa, 2014. il. 1 folder.

EPA. **A review of methods for assessing the sensitivity of aquifers to pesticide contamination**. Preliminary document: 1-21. Washington DC. 1991.

FEITOSA, F.A.C. et al. 2008. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3a ed. rev. e ampl. - Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812p.

FERREIRA, E. O. 1972. **Carta técnica do Brasil**. Notícia explicativa. DNPM. Bol. 1. 19 p.

FOSTER, S. S. D. Vulnerabilidade à poluição de águas subterráneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal. In: **IV Congresso da Água**. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Lisboa, 1987.

FOSTER, S.; HIRATA, R.C. & ROCHA, G.A. Riscos de poluição de águas subterráneas: uma proposta metodológica de avaliação regional. **V Congresso Brasileiro de Águas Subterráneas**, São Paulo, p. 175-185, 1988.

FOSTER, S.; **Determinação do risco de contaminação das águas subterráneas: um método baseado em dados existentes** / Stephen Foster, Ricardo Hirata; tradução de Ricardo Hirata, Sueli Yoshinaga, Seiju Hassuda, Mara Iritani. São Paulo: Instituto Geológico, 1993.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. São Paulo: Servemar, 2006.

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PLANEJAMENTO DO CEARÁ. Atlas do Ceará. Fortaleza: IPLANCE, 1997. 65 p. il.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Ceará em Mapas**. Fortaleza: IPACE, 2007. Disponível em <<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/136x.htm>>.

GOÉS, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. **Bacia do Parnaíba**. Boletim Geolciências. PETROBRÁS. Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 57 – 67, 1994.

GUIGUER, M., KOHNKE, W. M. - Métodos para determinação da Vulnerabilidade de Aquíferos, In: **XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Florianópolis – SC, 10 a 13 de setembro, 13 p.;2002.

HIRATA, R. C. A.; REBOUÇAS, A. C. **La protección de los Recursos Hídricos Subterráneos: una visión integrada, basada em perímetro de protección de pozos y vulnerabilidade de acuíferos**. Boletín Geológico y Minero. Madrid, vol. 110, 1999, pp. 79-92.

HIRATA, R. C. A.- Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a Vulnerabilidade à poluição de aquífero. In: **I SEMINARIO-TALLER. PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN**, Toluca, México. 20-22 de Junio de 2001. Disponível em: <<http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/Hirata.html>> Acesso em Janeiro de 2015.

KEGEL, W.; SCORZA, E.P.; COELHO, F.C.P. 1958. **Estudos geológicos do norte do Ceará**. DNPM/DGM. Rio de Janeiro. 46 p. (Boletim 184).

KOOGAN, A. **Enciclopédia e dicionário Ilustrado**. Rio de Janeiro: Delta, 1994.

LERNER, D.; ISSAI, I. **Groundwater Recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge**. International Association of Hydrogeologist. Hanover, vol. 8, 1990, 345 p.

LEITÃO, T. E.; FERREIRA, J. P. L.; OLIVEIRA, M. M.; MOINANTE, M. J. Poluição de águas subterrâneas: principais problemas, processos de prevenção e de reabilitação. In: **SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA**, 6., 2003, Cabo Verde. Proceedings...Cabo Verde. 2003. p. 78-81.

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Departamento de Hidráulica. Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas. **Relatório de cartografia da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas do Concelho de Montemor-O-Novo utilizando o método DRASTIC**. Lisboa, 2002. 53 p.

LONDRES, FLAVIA. **Agrotóxicos no Brasil: um guia para ação em defesa da vida**. – Rio de Janeiro: AS-PTA – Assessoria e Serviços a Projetos em Agricultura Alternativa, 2011. 190 p. : il. ; 23 cm.

- MABESSONE, J. M.; BEURLEN, K.; RAND, H.M. 1971. **Geologia da Bacia do Jaibaras, Ceará**. Recife, univ. Fed. Pernambuco, Inst. Geoc., 1971. (Série Boletim de Estudo e Pesquisas, 2).
- MAIA, P. H. P. **Um novo método para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos**. 2011. 132 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador, 2011.
- MEDEIROS, C. N. de (Org.). **Ceará em mapas 2010**. Fortaleza: IPECE, 2011. 94 p. il. ISBN 978859884163.
- METELO, C.M.S., 1999. **Caracterização estratigráfica do Grupo Serra Grande (Siluriano) na borda sudeste da Bacia do Parnaíba**. Dissertação de Mestrado, UFRJ – Rio de Janeiro 102p.
- GUIGUER, N; KOHNKE, M. W. Métodos para Determinação da Vulnerabilidade de Aquífero. In: **XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Florianópolis-SC, 2002.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PINTO, E. J. de A. (Coord.). **Atlas pluviométrico do Brasil**: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos. Brasília: CPRM, 2011. 1 DVD. Escala 1:5.000.000. Programa Geologia do Brasil; Levantamento da Geodiversidade; Sistema de Informação Geográfica - SIG.
- PLUMMER, F.B.; PRICE, L.I.; GOMES, F.A. 1948. **Estados do Maranhão e Piauí (Geologia)**: Rio de Janeiro, Conselho Nacional do Petróleo, p. 87-134 (relatório 1946).
- RIBEIRO, José Alberto; VERISSIMO, Liano Silva. **Vulnerabilidade natural da Região do Cariri das unidades aquíferas da Região do Cariri**. Fortaleza: CPRM, 1995. 30 p. Avaliação Ambiental da Região do Cariri Projeto AMCARI. Programa de Informações para a Gestão e Administração Territorial - GATE. (Recursos Hídricos, 1).
- REICHARDT, K., 1990. **A Água em Sistemas Agrícolas**. São Paulo: Manole. 188p.
- RESENDE, Á. V de. Agricultura e qualidade da água: Contaminação da água por nitrato / Álvaro Vilena de Resende. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2002. 29 p. (Documentos / EMBRAPA Cerrados, ISSN 1517-5111; n.57).
- RODRIGUES, R. 1967. **Estudos sedimentológicos e estratigráficos dos depósitos silurianos e devonianos da Bacia do Parnaíba**. Rel. Petrobrás. Renor Direx 273.
- ROLIM, G.S.; Sentelhas, P.C.; Barbieri, V., 1998. **Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.6, p.133-137.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R., 1955. **The water balance**. Publications in Climatology, New Jersey, Drexel, Institute of Technology, 104 p.

VAN STEMPOORT, D., EWERT, L., & WASSENAAR, L. (1993). **Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping**. Canadian Water Resources Journal, 18(1), 25-37.

VASCONCELOS, Mickaelon Belchior. **Análise integrada dos efeitos da expansão urbana nas águas subterrâneas como suporte a gestão dos recursos hídricos da zona norte de Natal – RN**. 2010. 150 f. Tese (Doutorado em Geociências)-Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

VILLANUEVA, T. C. B.; LEAL, L. R. B.; ZUCCHI, M. R. Z.; AZEVEDO, E. G.; VILLANUEVA, P.R. Diagnóstico da Qualidade das Águas Subterrâneas. In: **Águas Subterrâneas**, 2015. P 30-41.

VRBA, J.; ZAPOROZEC, A. **Guidebook on mapping groundwater vulnerability**. Hannover: International Association of Hydrogeologists, 1994.

ZUBLENA, J. P.; COOK, M. G.; ST CLAIR, M. B. **Pollutants in groundwater: health effects**. AG North Carolina Agricultural Extension Service. North Carolina State University: 90 (439-14).