

Avaliação dos Aquíferos das Bacias  
Sedimentares da Província Hidrogeológica  
Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e  
Cidades Pilotos (escala 1:50.000)

Volume V - Cidade Piloto: Macopó - AP

Tomo I - Texto

Dezembro/2015

## **República Federativa do Brasil**

Dilma Vana Roussef

Presidenta

## **Ministério do Meio Ambiente**

Izabella Mônica Vieira Teixeira

Ministra

## **Agência Nacional de Águas**

### **Diretoria Colegiada**

Vicente Andreu Guillo - Diretor-Presidente

Gisela Forattini

João Gilberto Lotufo Conejo

Ney Maranhão

Paulo Lopes Varella Neto

## **Superintendência de Implementação e Programas e Projetos**

Ricardo Medeiros de Andrade

Tibério Magalhães Pinheiro

## **Coordenação de Águas Subterrâneas**

Fernando Roberto de Oliveira

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso (Gestor)

Leonardo de Almeida

Letícia Lemos de Moraes

Márcia Tereza Pantoja Gaspar

## **Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização**

Aline Maria Meiguins de Lima (SEMAS/PA)

Audrey Nery Oliveira Ferreira (FEMARH/RR)

Cléa Maria de Almeida Dore (FEMARH/RR)

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso (ANA)

Fernando Roberto de Oliveira (ANA)

Flávio Soares do Nascimento (ANA)

Glauco Lima Feitosa (IMAC/AC)

Jane Freitas de Góes Crespo (SEMGRH/AM)  
José Trajano dos Santos (SEDAM/RO)  
Luciani Aguiar Pinto (SEMGRH/AM)  
Luciene Mota de Leão Chaves (SEMAS/PA)  
Marco Vinicius Castro Gonçalves (ANA)  
Maria Antônia Zabala de Almeida Nobre (SEMA/AC)  
Miguel Martins de Souza (SEMGRH/AM)  
Miguel Penha (SEDAM/RO)  
Nilza Yuiko Nakahara (FEMARH/RR)  
Olavo Bilac Quaresma de Oliveira Filho (SEMAS/PA)  
Vera Lucia Reis (SEMA/AC)  
Verônica Jussara Costa Santos (SEMAS/PA)

#### **Consórcio PROJETEC/TECHNE (Coordenação Geral)**

João Guimarães Recena  
Luiz Alberto Teixeira  
Antonio Carlos de Almeida Vidon  
Fábio Chaffin

#### **Gerência do Contrato**

Marcelo Casiuch  
Roberta Alcoforado

#### **Membros da Equipe Técnica Executora**

João Manoel Filho (Coordenador)  
Alerson Falieri Suarez  
Ana Nery Cadete  
Antonio Carlos Tancredi  
Carla Maria Salgado Vidal  
Carlos Danilo Câmara de Oliveira  
Cristiana Coutinho Duarte  
Edilton Carneiro Feitosa  
Fabianny Joanny Bezerra C. da Silva  
Maria de Fátima França de Moura  
Fernando Correia  
Joanderson James Oliveira Moraes

Ludmilla Calado  
Marcondes Assis  
Maria Marlúcia Freitas Santiago  
Mário Vicente Caputo  
Nelson da Franca Ribeiro dos Anjos  
Patrícia Celeste Lopes Jesuíno  
Paulo de Melo da Cunha Pedrosa  
Rilson Magalhães Cabral  
Roseli da Rocha Paixão de Almeida  
Rudson Fonseca  
Thiago Franklin de Almeida  
Wagner Vitor Araújo Ferreira  
Waldir Duarte Costa  
Walter Lucena  
Wilton José Silva da Rocha

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA

Avaliação dos Aquíferos das Bacias  
Sedimentares da Província Hidrogeológica  
Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e  
Cidades Pilotos (escala 1:50.000)

Volume V - Cidade Piloto: Macapá - AP

Tomo I - Texto

Dezembro/2015

Agência Nacional de Águas - ANA  
Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Bloco B, L e M  
CEP: 70610-200, Brasília - DF  
PABX: 2109-5400 / 2109-5252  
Endereço eletrônico: <http://www.ana.gov.br>

Equipe:  
Agência Nacional de Águas - ANA  
Superintendência de Implementação de Programas e Projetos - SIP

Elaboração e execução:  
Consórcio TECHNE-PROJETEC

Todos os direitos reservados  
É permitida a reprodução de dados e de informações, desde que citada a fonte.

Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000).

Volume V – Cidade Piloto: Macapá - AP.

Tomo I - Texto

Brasília: ANA, SIP, 2015.

1. Recursos Hídricos
2. Província Hidrogeológica Amazonas
  - I. Agência Nacional de Águas
  - II. Consórcio TECHNE-PROJETEC.

## APRESENTAÇÃO

O relatório final de Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas (PHA) no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000) é constituído dos seguintes volumes:

- Volume I – Balanço Hídrico da Província Hidrogeológica Amazonas
- Volume II – Geologia da Província Hidrogeológica Amazonas
- Volume III – Hidrogeologia e Modelo Numérico de Fluxo da Província Hidrogeológica Amazonas
  - ✓ Tomo I - Texto
  - ✓ Tomo II - Mapas
- Volume IV – Hidrogeoquímica da Província Hidrogeológica Amazonas
  - ✓ Tomo I - Aquíferos: Aluvial, Rio Branco, Içá e Tucunaré
  - ✓ Tomo II - Aquífero Alter do Chão, Coberturas Cenozoicas de Porto Velho, Barreiras, Pirabas, Monte Alegre, Itaituba e Inominado (Cruzeiro do Sul)
- Volume V – Cidade Piloto: Macapá – AP
  - ✓ Tomo I - Texto
  - ✓ Tomo II - Mapas
- Volume VI – Cidade Piloto: Porto Velho – RO
  - ✓ Tomo I - Texto
  - ✓ Tomo II - Mapas
- Volume VII – Cidade Piloto: Rio Branco – AC
  - ✓ Tomo I - Texto
  - ✓ Tomo II - Mapas
- Volume VIII – Cidade Piloto: Santarém – PA
  - ✓ Tomo I - Texto
  - ✓ Tomo II - Mapas
- Volume IX – Cidade Piloto: Tabatinga – AM
  - ✓ Tomo I - Texto
  - ✓ Tomo II - Mapas
- Volume X – Proposta de Projeto para Proteção Ambiental e Gestão Sustentável das Águas Subterrâneas na Região Amazônica a ser Desenvolvido pelo Brasil e Países Vizinhos
- Volume XI – Banco de Dados
- Volume XII – Resumo Executivo

## SUMÁRIO

<b>1 – Introdução</b> .....	<b>28</b>
<b>1.1 - Objetivo do Estudo</b> .....	<b>29</b>
<b>1.2 - Metodologia</b> .....	<b>29</b>
<b>1.3 – Localização e Dimensões da Área de Estudo</b> .....	<b>29</b>
<b>2 - Fisiografia</b> .....	<b>32</b>
<b>2.1 – Elementos e Fatores do Clima</b> .....	<b>33</b>
2.1.1 - Clima.....	33
2.1.2 - Temperatura .....	34
2.1.3 - Ventos.....	34
2.1.4 - Umidade Relativa .....	37
2.1.5 - Insolação .....	37
2.1.6 - Precipitação .....	37
2.1.7 - Número de dias de chuva .....	37
2.1.8 - Evapotranspiração .....	37
<b>2.2 - Relevo</b> .....	<b>39</b>
<b>2.3 - Hidrografia</b> .....	<b>41</b>
<b>2.4 - Solos</b> .....	<b>43</b>
<b>2.5 - Vegetação</b> .....	<b>45</b>
<b>2.6 – O Fenômeno das Ressacas em Macapá</b> .....	<b>47</b>
<b>2.7 – Influência do Intemperismo Químico Regional na Qualidade das Águas Subterrâneas da PHA</b> .....	<b>47</b>
<b>3 – Geologia</b> .....	<b>50</b>
<b>3.1 – Estrutura e Tectônica</b> .....	<b>51</b>
3.1.1 - A Plataforma do Amapá.....	51
<b>3.2 - Litoestratigrafia</b> .....	<b>53</b>
3.2.1 – Formação Tucunaré.....	54
3.2.2 - Depósitos Aluviais e Flúvio-Marinhos .....	56
<b>4 – Hidrogeologia e Hidrodinâmica</b> .....	<b>60</b>
<b>4.1 – Aquífero Tucunaré</b> .....	<b>61</b>
4.1.1 – Litologia, Dimensões e Limites .....	61
4.1.2 – Propriedades Hidráulicas .....	64
4.1.2.1 - Execução de Testes de Bombeamento .....	64
4.1.2.2 – Interpretação dos Testes de Bombeamento .....	67

4.1.2.3 – Parâmetros Hidráulicos Obtidos .....	73
4.1.2.4 - Conclusões sobre os Resultados Obtidos .....	75
4.1.3 – Recarga e Descarga de Água Subterrânea .....	77
4.1.3.1 – Variações de Nível Estático .....	77
4.1.3.2 – Variações de Cotas Potenciométricas .....	80
4.1.4 – Escoamento e Exutórios .....	81
4.1.5 – Reservas.....	85
4.1.5.1 – Reserva Reguladora ou Recarga Potencial Direta .....	85
4.1.5.2 – Reserva Potencial Explotável Estimada .....	85
4.1.5.3 – Reserva Permanente.....	85
4.1.6 – Situação da Exploração em 2012 .....	86
4.1.6.1 – Levantamento e Sistematização de Dados.....	86
4.1.6.2 - Poços Catalogados e Cadastrados .....	86
4.1.6.3 – Tratamento Estatístico dos Dados Catalogados e Cadastrados .....	88
4.1.7 – Regime de Funcionamento dos Poços .....	94
4.1.8 – Produção Global dos Poços.....	96
<b>5 - Hidrogeoquímica.....</b>	<b>99</b>
<b>5.1 – Introdução.....</b>	<b>100</b>
5.1.1 - Critérios de seleção para as amostragens.....	101
5.1.2 - Procedimentos de Coleta.....	105
5.1.3 - Métodos de Análise .....	106
5.1.4 - Balanço Iônico .....	107
5.1.5 - Índice de Troca de Bases (ITB) .....	110
5.1.6 - Razões Iônicas .....	113
5.1.7 - Índice de Langelier .....	115
5.1.8 - Correlação entre Variáveis Hidrogeoquímicas.....	117
5.1.9 - Modelagem Geoestatística .....	125
<b>5.2 – Interpretação dos Resultados Analíticos das Águas Subterrâneas do Aquífero Tucunaré.....</b>	<b>130</b>
5.2.1 - Cor.....	130
5.2.2 - Turbidez.....	133
5.2.3 – Condutividade Elétrica (CE).....	138
5.2.4 – Temperatura .....	143
5.2.5 – Sólidos Totais Dissolvidos (STD).....	147
5.2.6 – Potencial Hidrogeniônico (pH) .....	153

5.2.7 – Potencial Redox (Eh) .....	158
5.2.8 – Cátions.....	164
5.2.8.1 - Sódio .....	164
5.2.8.2 - Potássio.....	168
5.2.8.3 - Cálcio .....	172
5.2.8.4 - Magnésio .....	177
5.2.9 - Ânions.....	181
5.2.9.1 - Cloreto.....	181
5.2.9.2 - Sulfato .....	186
5.2.9.3 - Bicarbonato .....	190
5.2.10 - Dureza .....	194
5.2.11 – Compostos Nitrogenados.....	200
5.2.11.1 - Nitrato .....	201
5.2.11.2 - Nitrito .....	206
5.2.11.3 - Amônia .....	210
5.2.12 – Ferro e Manganês.....	215
5.2.12.1 - Ferro .....	216
5.2.12.2 - Manganês.....	224
5.2.13 – Metais Pesados .....	228
5.2.14 – BTEX e Fenóis.....	234
5.2.14.1 - BTEX.....	234
5.2.14.2 – Fenóis .....	235
5.2.15 – Isótopos Ambientais.....	236
5.2.15.1 - Oxigênio-18 e Deutério.....	236
5.2.15.2 - Trício .....	238
5.2.15.3 - Carbono-14.....	240
5.2.15.4 - Conclusão.....	242
5.2.16 – Parâmetros Biológicos .....	242
5.2.17 – Classificação das Águas Subterrâneas do Aquífero Tucunaré Segundo a Composição Química.....	250
5.2.17.1 – Diagrama Triangular de Piper.....	250
5.2.17.2 – Diagramas de Stiff .....	256
5.2.18 – Classificação das Águas Subterrâneas Segundo o Uso.....	266
5.2.18.1 – Diagramas de Schoeller-Berkaloff para Consumo Humano .....	266
5.2.18.2 – Diagramas de Risco de Sódio e Salinidade para Irrigação.....	268

5.2.18.3 - Pecuária .....	271
<b>5.3 – Conclusões Gerais sobre a Qualidade das Águas Subterrâneas do Aquífero Tucunaré em Macapá.....</b>	<b>271</b>
<b>5.4 - Vulnerabilidade Natural do Aquífero Tucunaré .....</b>	<b>273</b>
5.4.1 – Método DRASTIC .....	273
5.4.2 – Método GOD.....	281
5.4.3 - Conclusão sobre a vulnerabilidade natural .....	287
<b>6. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>288</b>
<b>7 – Anexos .....</b>	<b>297</b>
<b>7.1 – Testes de Bombeamento – Planilhas, Gráficos e Valores Obtidos de T, K, S .....</b>	<b>298</b>
7.1.1 – Planilha do Poço ID299 – Macapá- AP .....	299
7.1.2 – Gráficos e Valores Obtidos de T, K, S do Poço ID299 – Macapá. ....	300
7.1.2.1 - Curva de Rebaixamento do poço ID299 durante o bombeamento. ....	300
7.1.2.2 - Recuperação do poço ID299 após o bombeamento. ....	300
7.1.2.3 – Evolução do nível dinâmico nas fases de rebaixamento e de recuperação no poço ID299. ....	301
7.1.2.4 - Valores encontrados para T, K, S no poço ID299 - Macapá - AP.....	301
7.1.2.5 – Curva de rebaixamento do poço CAESA 1 superposta à curva padrão Tipo B de Neuman para tempo longo.....	302
7.1.2.6 - Resultados encontrados no poço CAESA 1 supondo o aquífero do tipo livre, anisotrópico com poços totalmente penetrantes e com drenagem retardada. ....	303
7.1.3 – Planilha do Poço ID300 – Macapá- AP .....	304
7.1.4 – Gráficos e Valores Obtidos de T, K, S do Poço ID300 – Macapá - AP.....	305
7.1.4.1 - Rebaixamento do poço ID300 Congós pelo bombeamento. ....	305
7.1.4.2 - Recuperação do poço ID300, após o bombeamento. ....	305
7.1.4.3 – Evolução do nível dinâmico durante as fases de rebaixamento e de recuperação no poço ID300. ....	306
7.1.4.4 - Valores encontrados para T, K, S no poço ID300 – Macapá – AP.....	306
7.1.4.5 – Curva de rebaixamento do poço CAESA 2 superposta à curva padrão Tipo B de Neuman para tempo longo.....	307
7.1.4.6 - Resultados encontrados no poço CAESA 2 supondo o aquífero do tipo livre, anisotrópico com poços totalmente penetrantes e com drenagem retardada. ....	308

<b>7.2 – Dados dos Poços Cadastrados pela ANA-PHA e Catalogados do SIAGAS/CPRM 2010 em Macapá .....</b>	<b>309</b>
7.2.1 – Identificação, localização e parâmetros selecionados para a estatística dos 136 poços constantes do SIG-ANA-PHA em Macapá.....	310
7.2.2 – Resumo das Características Técnicas dos 11 Poços Catalogados da CPRM/SIAGAS 2010 em Macapá, com Perfis Litológicos, Perfis Construtivos e Produtividade .....	316
<b>7.3 – Resultados Hidrogeoquímicos das coletas de abril e outubro de 2012.....</b>	<b>321</b>
7.3.1 – Análises físico-químicas e bacteriológicas realizadas em Macapá durante a primeira campanha de amostragem de água de 30 poços no período chuvoso em abril de 2012. ....	322
7.3.2 - Análises físico-químicas e bacteriológicas realizadas em Macapá durante a segunda campanha de amostragem de água de 30 poços no período de estiagem em outubro de 2012. ....	323
7.3.3 - Análises de metais pesados, BTEX, fenóis e de isótopos ambientais realizadas em Macapá durante a segunda campanha de amostragem de água de 30 poços no período de estiagem em outubro de 2012. ....	324
<b>7.4 – Protocolo de Guia de Coleta de Amostras Bioagri Ambiental ....</b>	<b>325</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – Variáveis meteorológicas da Estação 82098 de Macapá, segundo as Normais Climatológicas de 1961-1990 (INMET, 2009)*.....	33
<b>Tabela 2.2</b> – Estação 82098 – Macapá: Médias mensais das variáveis meteorológicas no período de 1981-2010. Fonte: Dados da base do INMET*.....	34
<b>Tabela 2.3</b> – Variação da insolação mensal na Estação 82098 Macapá no período de 1981 a 2010.....	38
<b>Tabela 3.1</b> – Litoestratigrafia do Cenozoico estabelecida na vizinha Ilha de Marajó (Rossetti & Valeriano, 2007).....	54
<b>Tabela 3.2</b> - Litologia dos poços tubulares com profundidades de 150 m a 160 m perfurados na Formação Tucunaré na cidade de Macapá – AP.....	56
<b>Tabela 4.1</b> – Faixa de valores de condutividade hidráulica em depósitos inconsolidados de natureza análoga à do Aquífero Tucunaré em m/s e m/dia (Adaptado de Fetter, 1994).....	64
<b>Tabela 4.2</b> – Características dos poços da CAESA utilizados nos testes de bombeamento realizados na cidade de Macapá – AP.....	67
<b>Tabela 4.3</b> – Parâmetros hidráulicos avaliados para o aquífero Tucunaré na cidade de Macapá – AP, pelo método de Cooper & Jacob (1946).....	73
<b>Tabela 4.4</b> – Parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Tucunaré segundo Tancredi & Tagliarini (2002), Tancredi & Oliveira (2004) e Tancredi (2006) em Macapá - AP.....	74
<b>Tabela 4.5</b> – Parâmetros hidráulicos do Aquífero Tucunaré em Macapá - AP obtidos pelo modelo de Neuman (1975).....	74
<b>Tabela 4.6</b> – Parâmetros hidráulicos avaliados pelo método de Neuman (1975) para o aquífero Tucunaré na cidade de Macapá – AP.....	75
<b>Tabela 4.7</b> – Parâmetros hidráulicos e capacidade de produção dos poços testados em Macapá – AP, indicando aquífero heterogêneo, embora interpretado como homogêneo.....	76
<b>Tabela 4.8</b> – Parâmetros hidráulicos e capacidade de produção dos poços para o aquífero Tucunaré, em Macapá - AP, interpretado como livre, homogêneo e anisotrópico.....	76
<b>Tabela 4.9</b> – Parâmetros hidráulicos médios avaliados para o aquífero Tucunaré, em Macapá - AP, interpretado como livre, homogêneo e anisotrópico.....	77
<b>Tabela 4.10</b> - Variação de níveis estáticos e de cotas potenciométricas nos poços de Macapá no aquífero Tucunaré, no período chuvoso (abril de 2012) e no período de estiagem (outubro de 2012).....	80
<b>Tabela 4.11</b> - Frente de escoamento natural do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá em abril de 2012, em direção ao rio Amazonas, parcialmente capturada por poços existentes em exploração.....	84

<b>Tabela 4.12</b> - Frente de escoamento natural do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá em outubro de 2012, em direção ao rio Amazonas, parcialmente capturada por poços existentes em exploração. ....	84
<b>Tabela 4.13</b> - Reservas do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá na área de 109 km <sup>2</sup> do balanço hidrogeológico.....	86
<b>Tabela 4.14</b> - Parâmetros estatísticos dos dados de poços de Macapá.....	88
<b>Tabela 4.15</b> – Frequência da profundidade dos poços tubulares levantados do SIAGAS e dos novos cadastrados pela ANA na cidade de Macapá – AP. ....	88
<b>Tabela 4.16</b> – Frequência dos diâmetros de revestimento dos poços tubulares levantados do SIAGAS e dos novos cadastrados pela ANA na cidade de Macapá – AP.....	89
<b>Tabela 4.17</b> – Distribuição de frequência da profundidade dos níveis estáticos dos poços levantados do SIAGAS e cadastrados pela ANA na cidade de Macapá - AP. ...	90
<b>Tabela 4.18</b> – Distribuição de frequência dos níveis dinâmicos dos poços na cidade de Macapá- AP.....	91
<b>Tabela 4.19</b> – Frequência da vazão dos poços cadastrados pela ANA na cidade de Macapá – AP. ....	92
<b>Tabela 4.20</b> – Poços do SIG ANA-PHA 2013 com vazão informada em Macapá. ....	94
<b>Tabela 4.21</b> – Cálculo do regime médio de funcionamento usando 103 dos 126 poços em operação, com regime informado na cidade de Macapá, no aquífero Tucunaré. ...	95
<b>Tabela 4.22</b> - Produção global estimada para Macapá em 2012, explorada do aquífero Tucunaré.....	96
<b>Tabela 4.23</b> - Distribuição dos poços e da produção global com a situação operacional informada.....	97
<b>Tabela 4.24</b> – Tipos de reservatório de água de poços em Macapá - AP. ....	97
<b>Tabela 5.1</b> – Resultado do balanço iônico realizado no Qualigraf para as amostras coletadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – abril de 2012.....	108
<b>Tabela 5.2</b> – Resultado do balanço iônico realizado no Qualigraf, para as amostras coletadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – outubro de 2012. ....	109
<b>Tabela 5.3</b> – Resultado do Índice de Troca de Bases para as amostras coletadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá nas duas campanhas.....	111
<b>Tabela 5.4</b> – Parâmetros estatísticos dos resultados do Índice de Troca de Bases para as amostras coletadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá nas duas campanhas. ....	113
<b>Tabela 5.5</b> – Principais razões iônicas e seus significados segundo Hem (1985).....	114
<b>Tabela 5.6</b> – Resultado das razões iônicas para as amostras coletadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá nas duas campanhas. ....	115

<b>Tabela 5.7</b> – Faixas do IS segundo Snoeyink & Jenkins (1980).....	116
<b>Tabela 5.8</b> – Resultado do Índice de Saturação (IS) para as amostras coletadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá nas duas campanhas.....	117
<b>Tabela 5.9</b> – Resultado das correlações entre parâmetros químicos das águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – abril de 2012. ....	118
<b>Tabela 5.10</b> – Resultado das correlações entre parâmetros químicos das águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – outubro de 2012.....	122
<b>Tabela 5.11</b> – Parâmetros analisados, limites de detecção (LD) e valores mínimos adotados para estatística descritiva dos resultados das coletas no Aquífero Tucunaré nas duas campanhas.....	128
<b>Tabela 5.12</b> – Estatística descritiva de valores abaixo do limite de detecção da cor, substituídos por um valor numérico.....	130
<b>Tabela 5.13</b> – Distribuição de probabilidade para valores abaixo do limite de detecção da cor, substituídos por um valor numérico.....	130
<b>Tabela 5.14</b> – Estatística descritiva da Cor do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Cor-1) - abril de 2012 e no período seco (Cor-2) - outubro de 2012.....	130
<b>Tabela 5.15</b> – Distribuição de probabilidade da Cor do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Cor-1) - abril de 2012 e no período seco (Cor-2) – outubro de 2012.....	131
<b>Tabela 5.16</b> – Estatística descritiva da Turbidez do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Tu-1) - abril de 2012 e no período seco (Tu-2) - outubro de 2012.....	133
<b>Tabela 5.17</b> – Distribuição de probabilidade da Turbidez do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Tu-1) - abril de 2012 e no período seco (Tu-2) - outubro de 2012.	134
<b>Tabela 5.18</b> – Estatística descritiva da Condutividade Elétrica do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (CE-1) - abril de 2012 e no período seco (CE-2) - outubro de 2012. ....	138
<b>Tabela 5.19</b> – Distribuição de probabilidade da Condutividade Elétrica do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (CE-1) - abril de 2012 e no período seco (CE-2) - outubro de 2012.....	139
<b>Tabela 5.20</b> – Estatística descritiva da Temperatura (°C) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (T-1) - abril de 2012 e no período seco (T-2) - outubro de 2012. ...	143
<b>Tabela 5.21</b> – Distribuição de probabilidade da temperatura T(°C) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (T-1) - abril de 2012 e no período seco (T-2) - outubro de 2012.....	144
<b>Tabela 5.22</b> – Valores de condutividade elétrica CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e sólidos totais dissolvidos STD ( $\text{mg}/\text{L}$ ) no aquífero Tucunaré em Macapá – AP na primeira e na segunda campanha de amostragem. ....	147
<b>Tabela 5.23</b> – Estatística descritiva dos teores de STD ( $\text{mg}/\text{L}$ ) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (STD-1) - abril de 2012 e no período seco (STD-2) - outubro de 2012.....	148

<b>Tabela 5.24</b> – Distribuição de probabilidade dos Sólidos Dissolvidos Totais do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (STD-1) - abril de 2012 e no período seco (STD-2) - outubro de 2012.....	149
<b>Tabela 5.25</b> – Estatística descritiva do pH <i>in situ</i> no período chuvoso – abril de 2012 (pH-1) e no período seco – outubro de 2012 (pH-2). .....	153
<b>Tabela 5.26</b> – Distribuição de probabilidade do pH <i>in situ</i> no período chuvoso – abril de 2012 (pH-1) e no período seco – outubro de 2012 (pH-2). .....	154
<b>Tabela 5.27</b> – Estatística descritiva do Eh no período chuvoso – abril de 2012 (Eh-1) e no período seco – outubro de 2012 (Eh-2).....	160
<b>Tabela 5.28</b> – Distribuição de probabilidade do Eh no período chuvoso – abril de 2012 (Eh-1) e no período seco – outubro de 2012 (Eh-2).....	161
<b>Tabela 5.29</b> – Estatística descritiva do Sódio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Na-1) - abril de 2012 e no período seco (Na-2) - outubro de 2012.....	164
<b>Tabela 5.30</b> – Distribuição de probabilidade do Sódio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Na-1) - abril de 2012 e no período seco (Na-2) - outubro de 2012.....	165
<b>Tabela 5.31</b> – Estatística descritiva do Potássio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (K-1) - abril de 2012 e no período seco (K-2) - outubro de 2012. ....	168
<b>Tabela 5.32</b> – Distribuição de probabilidade do Potássio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (K-1) - abril de 2012 e no período seco (K-2) - outubro de 2012....	169
<b>Tabela 5.33</b> – Estatística descritiva do Cálcio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Ca-1) - abril de 2012 e no período seco (Ca-2) - outubro de 2012 (valores inconsistentes para o período chuvoso).....	172
<b>Tabela 5.33b</b> – Estatística descritiva do Cálcio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Ca-1) - abril de 2012 e no período seco (Ca-2) - outubro de 2012 (valores consistentes para o período chuvoso).....	173
<b>Tabela 5.34</b> – Distribuição de probabilidade do Cálcio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Ca-1) - abril de 2012 e no período seco (Ca-2) - outubro de 2012, com dados inconsistentes. ....	173
<b>Tabela 5.34b</b> – Distribuição de probabilidade do Cálcio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Ca-1) - abril de 2012 e no período seco (Ca-2) - outubro de 2012, com dados consistentes. ....	174
<b>Tabela 5.35</b> – Estatística descritiva do Magnésio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Mg-1) - abril de 2012 e no período seco (Mg-2) - outubro de 2012. ....	177
<b>Tabela 5.36</b> – Distribuição de probabilidade dos teores de Magnésio (mg/L) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Mg-1) - abril de 2012 e no período seco (Mg-2) - outubro de 2012. ....	178
<b>Tabela 5.37</b> – Estatística descritiva do Cloreto do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Cl-1) - abril de 2012 e no período seco (Cl-2) - outubro de 2012. ....	181
<b>Tabela 5.38</b> – Distribuição de probabilidade do Cloreto do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Cl-1) - abril de 2012 e no período seco (Cl-2) - outubro de 2012..	182

<b>Tabela 5.39</b> – Estatística descritiva do Sulfato do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (S-1) - abril de 2012 e no período seco (S-2) - outubro de 2012. ....	186
<b>Tabela 5.40</b> – Distribuição de probabilidade do Sulfato do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (S-1) - abril de 2012 e no período seco (S-2) - outubro de 2012. ....	187
<b>Tabela 5.41</b> – Estatística descritiva do Bicarbonato do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (B-1) - abril de 2012 e no período seco (B-2) - outubro de 2012. ....	190
<b>Tabela 5.42</b> – Distribuição de probabilidade do Bicarbonato do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (B-1) - abril de 2012 e no período seco (B-2) – outubro de 2012. ...	191
<b>Tabela 5.43</b> – Classificação das águas segundo a sua faixa de valor de dureza (Von Sperling, 2005). ....	194
<b>Tabela 5.44a</b> – Estatística descritiva da Dureza do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (D-1) - abril de 2012 e no período seco (D-2) - outubro de 2012, com valores inconsistentes de cálcio.....	194
<b>Tabela 5.44b</b> – Estatística descritiva da Dureza do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (D-1) - abril de 2012 e no período seco (D-2) - outubro de 2012, com valores consistentes de cálcio.....	195
<b>Tabela 5.45a</b> – Distribuição de probabilidade da Dureza do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (D-1) abril de 2012 e no período seco (D-2) outubro de 2012, com dados consistentes de cálcio.....	196
<b>Tabela 5.45b</b> – Distribuição de probabilidade da Dureza do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (D-1) abril de 2012 e no período seco (D-2) outubro de 2012, com dados consistentes de cálcio.....	196
<b>Tabela 5.46</b> - Valores Máximos Permitidos (VMP) de nitrato e nitrito para os usos preponderantes (Resolução CONAMA 396/2008). ....	201
<b>Tabela 5.47</b> – Estatística descritiva do Nitrato do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (N-1) - abril de 2012 e no período seco (N-2) - outubro de 2012.....	202
<b>Tabela 5.48</b> – Distribuição de probabilidade do Nitrato do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (N-1) - abril de 2012 e no período seco (N-2) - outubro de 2012....	203
<b>Tabela 5.49</b> – Estatística descritiva do Nitrito do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (N-1) - abril de 2012 e no período seco (N-2) - outubro de 2012.....	206
<b>Tabela 5.50</b> – Distribuição de probabilidade do Nitrito do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (N-1) - abril de 2012 e no período seco (N-2) - outubro de 2012....	207
<b>Tabela 5.51</b> - Estatística descritiva da Amônia do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (A-1) - abril de 2012 e no período seco (A-2) - outubro de 2012. ....	210
<b>Tabela 5.52</b> – Distribuição de probabilidade da Amônia no Aquífero Tucunaré no período chuvoso (A-1) - abril de 2012 e no período seco (A-2) - outubro de 2012. ....	211
<b>Tabela 5.53</b> – Valores Máximos Permitidos (VMP) de ferro e manganês para os usos preponderantes (Resolução CONAMA 396/2008). ....	215

<b>Tabela 5.54</b> – Estatística descritiva do Ferro (mg/L) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Fe-1) - abril de 2012 e no período seco (Fe-2) - outubro de 2012.....	216
<b>Tabela 5.55</b> – Distribuição de probabilidade do Ferro (mg/L) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Fe-1) - abril de 2012 e no período seco (Fe-2) - outubro de 2012.	217
<b>Tabela 5.56</b> – Estatística descritiva do Manganês (mg/L) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Mn-1) - abril de 2012 e no período seco (Mn-2) - outubro de 2012. ....	224
<b>Tabela 5.57</b> – Distribuição de probabilidade do Manganês (mg/L) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Mn-1) - abril de 2012 e no período seco (Mn-2) - outubro de 2012.....	225
<b>Tabela 5.58</b> - Valores Máximos Permitidos (VMP) de Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Mercúrio, Níquel e Zinco, segundo a Portaria MS 2914/2011. ....	228
<b>Tabela 5.59</b> - Valores Máximos Permitidos (VMP) de Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Mercúrio, Níquel e Zinco, para os usos preponderantes (Resolução CONAMA 396/2008).....	228
<b>Tabela 5.60</b> - Valores Máximos Permitidos (VMP) de Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos (BTEX) segundo a Portaria MS 2914/2011. ....	234
<b>Tabela 5.61</b> - Valores Máximos Permitidos (VMP) de Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos (BTEX), para os usos preponderantes (Resolução CONAMA 396/2008). ....	235
<b>Tabela 5.62</b> - Valores Máximos Permitidos (VMP) de Fenóis, para os usos preponderantes (Resolução CONAMA 396/2008). ....	236
<b>Tabela 5.63</b> – Valores de deutério e oxigênio-18 dosados nas amostras coletadas em Macapá no período seco (outubro de 2012).....	237
<b>Tabela 5.64</b> – Relação entre unidades de trício (U.T.) e idade das águas subterrâneas. ....	239
<b>Tabela 5.65</b> – Idades aparentes ou convencionais do radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) em anos BP ( <i>before present</i> – 1950) e, quando inferior a 200 anos, dita “Moderna” por convenção e expressa em %M ou pMC ( <i>percent modern carbon</i> ).....	241
<b>Tabela 5.66</b> - Valores Máximos Permitidos (VMP) de microorganismos para os usos preponderantes (Resolução CONAMA 396/2008). ....	246
<b>Tabela 5.67</b> - Classificação das Águas do Aquífero Tucunaré segundo a composição química em Macapá - Período Chuvoso (abril de 2012). ....	251
<b>Tabela 5.68</b> - Classificação das Águas do Aquífero Tucunaré, de acordo com a composição química em Macapá - Período seco (outubro de 2012). ....	254
<b>Tabela 5.69</b> - Classificação das Águas do Aquífero Tucunaré, em Macapá de acordo com a predominância de íons - Período chuvoso (abril de 2012). ....	256
<b>Tabela 5.70</b> - Classificação das Águas do Aquífero Tucunaré, em Macapá de acordo com a predominância de íons - Período seco (outubro de 2012).....	261

<b>Tabela 5.71</b> - Classificação das águas coletadas nas duas campanhas de amostragem de acordo com o risco de salinidade e de sódio, segundo USSL. ....	270
<b>Tabela 5.72</b> – Padrões de STD para uso animal, segundo McKee & Wolf (1963). ...	271
<b>Tabela 5.73</b> – Ponderação dos parâmetros do método DRASTIC (Aller <i>et al.</i> , 1987). .....	274
<b>Tabela 5.74</b> – Parâmetros classificados por faixa de variação numérica (D, R, T, C). .....	274
<b>Tabela 5.75</b> – Parâmetros classificados por tipo de solo ou tipo de rocha (A, S, I)...	275
<b>Tabela 5.76</b> – Índice DRASTIC indicativo de vulnerabilidade DRASTIC do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012) e de estiagem (outubro de 2012) na cidade de Macapá – AP.....	278
<b>Tabela 5.77</b> – Valores para o parâmetro G do índice GOD (Foster, 1987). ....	282
<b>Tabela 5.78</b> – Valores para o parâmetro O do índice GOD (Foster, 1987). ....	282
<b>Tabela 5.79</b> – Valores para o parâmetro D do índice GOD (Foster, 1987).....	282
<b>Tabela 5.80</b> – Índices GOD e classes de vulnerabilidade.....	283
<b>Tabela 5.81</b> - Parâmetros para avaliação do Índice de Vulnerabilidade GOD do aquífero Tucunaré em Macapá.....	284

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> – Localização do município de Macapá e da área de estudo.....	31
<b>Figura 2.1</b> – Variáveis meteorológicas condicionantes do clima em Macapá (Estação 82098) segundo as Normais Climatológicas 1961-1990 (INMET, 2009). .....	35
<b>Figura 2.2</b> – Variáveis meteorológicas condicionantes do clima em Macapá, no período de 1981-2010 segundo dados da Estação 82098 – Macapá. Fonte: Dados da base do INMET.....	36
<b>Figura 2.3</b> – Ilustração da tendência de aumento decenal da insolação mensal na estação 82098 Macapá. ....	38
<b>Figura 2.4</b> – Caracterização do relevo mostrando a influência do Rio Amazonas sobre as terras baixas na folha de 15 minutos da região de Macapá – AP. ....	40
<b>Figura 2.5</b> – Hidrografia da folha de 15 minutos da região de Macapá - AP.....	42
<b>Figura 2.6</b> – Classes de solos da região de Macapá - AP.....	44
<b>Figura 2.7</b> – Classes de vegetação da região de Macapá - AP.....	46
<b>Figura 3.1</b> - Localização e principais feições tectônicas da Bacia do Marajó. Modificado de Costa <i>et al.</i> (2002).....	52
<b>Figura 3.2</b> – Mapa geológico da região de Macapá. Extraído da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo CPRM Folhas NA.22 Macapá e SA.22 Belém.....	55
<b>Figura 3.3</b> – Perfis litológicos e construtivos de 3 (três) poços tubulares com profundidades de 150 m e 160 m, respectivamente, perfurados na área de estudo na Formação Tucunaré. ....	57
<b>Figura 3.4</b> – Mapa geológico da folha de 15 minutos e da área de estudo na cidade de Macapá – AP. ....	59
<b>Figura 4.1</b> – Diagrama de cerca do aquífero Tucunaré na área de estudo na cidade de Macapá – AP. ....	62
<b>Figura 4.2</b> – Bloco 3D do modelo litoestratigráfico do aquífero Tucunaré parcialmente penetrado até 160 m de profundidade na área de estudo na cidade de Macapá – AP. ....	63
<b>Figura 4.3</b> – Localização dos poços Caesa 1 e Caesa 2 utilizados nos testes de bombeamento realizados no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá – AP.....	66
<b>Figura 4.4</b> – Ilustração gráfica da aproximação logarítmica da função $W(u)$ (Cooper & Jacob, 1946). ....	68
<b>Figura 4.5a</b> – Curva de rebaixamento x tempo do poço CAESA-1, evoluindo desde o primeiro minuto sobre a curva padrão Tipo B de Neuman (1975).....	72
<b>Figura 4.5b</b> – Curva de rebaixamento x tempo do poço CAESA-2, evoluindo a partir de apenas 3 minutos sobre a curva padrão Tipo B de Neuman (1975). ....	73

<b>Figura 4.6a</b> - Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em abril de 2012 na cidade de Macapá - AP. ....	78
<b>Figura 4.6b</b> - Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em outubro de 2012 na cidade de Macapá - AP. ....	79
<b>Figura 4.7a</b> - Hidrogeologia e superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em abril de 2012 na cidade de Macapá - AP. ....	82
<b>Figura 4.7b</b> - Hidrogeologia e superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em outubro de 2012 na cidade de Macapá - AP. ....	83
<b>Figura 4.8</b> – Distribuição espacial dos poços cadastrados pela ANA no projeto PHA e catalogados da CPRM-SIAGAS/CPRM na folha de 15 minutos e na área de estudo na cidade de Macapá – AP. ....	87
<b>Figura 4.9</b> – Frequência das classes de profundidade dos poços na cidade de Macapá - AP. ....	89
<b>Figura 4.10</b> – Frequências das classes de diâmetro de revestimento dos poços na cidade de Macapá - AP. ....	90
<b>Figura 4.11</b> – Frequências da profundidade do nível estático dos poços na cidade de Macapá - AP. ....	91
<b>Figura 4.12</b> – Frequência dos níveis dinâmicos de poços na cidade de Macapá- AP. ....	92
<b>Figura 4.13</b> – Frequências de vazão de poços cadastrados pela ANA na cidade de Macapá – AP. ....	93
<b>Figura 4.14</b> – Distribuição espacial da vazão dos poços cadastrados e catalogados na região de Macapá – AP. ....	98
<b>Figura 5.1</b> – Localização dos pontos de amostragem das análises físico-químicas e bacteriológicas no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá - AP. ....	102
<b>Figura 5.2</b> – Localização dos pontos de amostragem das análises de metais pesados e BTEX fenóis no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá - AP. ....	103
<b>Figura 5.3</b> – Localização dos pontos de amostragem das análises de isótopos ambientais no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá - AP. ....	104
<b>Figura 5.4</b> – Equações utilizadas no <i>software</i> Qualigraf para estimativa do erro prático no balanço iônico, segundo as metodologias de Custódio & Llamas (1983) e Logan (1965). ....	107
<b>Figura 5.5</b> – Ilustração dos resultados de ITB calculados para as amostras coletadas no Aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, no período chuvoso, com o predomínio de cátions. ....	112
<b>Figura 5.6</b> – Ilustração dos resultados de ITB calculados para as amostras coletadas no Aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, no período de estiagem, com o predomínio de cátions. ....	112

<b>Figura 5.7</b> – Histograma de frequência e curva normal de distribuição de probabilidade da Cor do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	131
<b>Figura 5.8</b> – Histograma de frequência e curva normal de distribuição de probabilidade da Turbidez do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	134
<b>Figura 5.9a</b> – Distribuição pontual dos valores de turbidez (uT) da água dos poços monitorados no Aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP. ....	136
<b>Figura 5.9b</b> – Distribuição pontual dos valores de turbidez (uT) da água dos poços monitorados no Aquífero Tucunaré no período seco (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP. ....	137
<b>Figura 5.10</b> – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade da Condutividade Elétrica (CE) do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	139
<b>Figura 5.11a</b> – Zoneamento da Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP. ....	141
<b>Figura 5.11b</b> – Zoneamento da Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período seco (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP. ....	142
<b>Figura 5.12</b> – Histogramas de frequência e curvas normais de distribuição de probabilidade da Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) das águas do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	143
<b>Figura 5.13a</b> – Zoneamento da Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP. ....	145
<b>Figura 5.13b</b> – Zoneamento da Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP... ..	146
<b>Figura 5.14</b> – Relações entre a condutividade elétrica e os sólidos totais dissolvidos no aquífero Tucunaré em Macapá - AP, no período chuvoso (abril de 2012) e no período seco (outubro de 2012). ....	148
<b>Figura 5.15</b> – Histograma de frequência e curva normal de distribuição de probabilidade dos Sólidos Totais Dissolvidos do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	149
<b>Figura 5.16a</b> – Zoneamento de STD (mg/L) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	151
<b>Figura 5.16b</b> – Zoneamento de STD (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP... ..	152
<b>Figura 5.17</b> – Histograma de frequência e curvas normais ajustadas de distribuição de probabilidade do pH <i>in situ</i> do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	154

<b>Figura 5.18a</b> – Zoneamento do pH <i>in situ</i> das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	156
<b>Figura 5.18b</b> – Zoneamento do pH <i>in situ</i> das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP...	157
<b>Figura 5.19</b> – Diagrama <i>pH versus Eh</i> (mV), de amostras de águas subterrâneas dos poços monitorados no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá ( <i>T in situ</i> variou de 25 a 32°C) nas duas campanhas de amostragem. ....	159
<b>Figura 5.20</b> – Histograma de frequência e curva normal de distribuição de probabilidade do Eh do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	160
<b>Figura 5.21a</b> – Zoneamento do Eh (mV) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	162
<b>Figura 5.21b</b> – Zoneamento do Eh (mV) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP...	163
<b>Figura 5.22</b> – Histogramas de frequência e curvas aproximadas de distribuição de probabilidade lognormal do Sódio do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	165
<b>Figura 5.23a</b> – Zoneamento de Sódio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	166
<b>Figura 5.23b</b> – Zoneamento de Sódio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP...	167
<b>Figura 5.24</b> – Histogramas de frequência e curvas lognormal de distribuição de probabilidade do Potássio do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	168
<b>Figura 5.25a</b> – Zoneamento de Potássio (mg/L) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	170
<b>Figura 5.25b</b> – Zoneamento de Potássio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP...	171
<b>Figura 5.26</b> – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade do Cálcio do Aquífero Tucunaré em Macapá no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	173
<b>Figura 5.27a</b> – Zoneamento de Cálcio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	175
<b>Figura 5.27b</b> – Zoneamento de Cálcio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP...	176
<b>Figura 5.28</b> – Histogramas de frequência e curvas ajustadas de distribuição lognormal de probabilidade de ocorrência de Magnésio no Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	178
<b>Figura 5.29a</b> – Zoneamento de Magnésio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	179

<b>Figura 5.29b</b> – Zoneamento de Magnésio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP...	180
<b>Figura 5.30</b> – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade do Cloreto do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	182
<b>Figura 5.31a</b> – Zoneamento de Cloreto (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	184
<b>Figura 5.31b</b> – Zoneamento de Cloreto (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP...	185
<b>Figura 5.32</b> – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade do Sulfato Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	187
<b>Figura 5.33a</b> – Zoneamento de Sulfato (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	188
<b>Figura 5.33b</b> – Zoneamento de Sulfato (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP...	189
<b>Figura 5.34</b> – Histograma de frequência e curva lognormal de distribuição de probabilidade do Bicarbonato do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	191
<b>Figura 5.35a</b> – Zoneamento de Bicarbonato (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.	192
<b>Figura 5.35b</b> – Zoneamento de Bicarbonato (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	193
<b>Figura 5.36</b> – Histogramas de frequência e curvas normais ajustadas de distribuição de probabilidade da Dureza do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	195
<b>Figura 5.37a</b> – Zoneamento da Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> ) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.	198
<b>Figura 5.37b</b> – Zoneamento da Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> ) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	199
<b>Figura 5.38</b> – Histogramas de frequência e curvas normais ajustadas de distribuição de probabilidade do Nitrato do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	202
<b>Figura 5.39a</b> – Zoneamento de Nitrato (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	204
<b>Figura 5.39b</b> – Zoneamento de Nitrato (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP...	205

<b>Figura 5.40</b> – Histograma de frequência e curva normal de distribuição de probabilidade do Nitrito do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	207
<b>Figura 5.41a</b> – Zoneamento de Nitrito (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	208
<b>Figura 5.41b</b> – Zoneamento de Nitrito (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP...	209
<b>Figura 5.42</b> – Histograma de frequência e curva normal de distribuição de probabilidade da Amônia no Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	211
<b>Figura 5.43a</b> – Zoneamento da Amônia (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	213
<b>Figura 5.43b</b> – Zoneamento da Amônia (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP...	214
<b>Figura 5.44</b> – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade do Ferro do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	217
<b>Figura 5.45</b> – Diagrama pH-Eh ilustrando a solubilidade do ferro em relação a pH, em 3 (três) zonas, para $C_{T,S} = 10^4 M$ ; $C_{T,CO_3} = 10^{-3} M$ , segundo Hem (1960). Adaptado de Snoeyink & Jenkins (1980). .....	219
<b>Figura 5.46a</b> – Zoneamento de Ferro (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	222
<b>Figura 5.46b</b> – Zoneamento de Ferro (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP. ....	223
<b>Figura 5.47</b> – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade do Manganês do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.....	225
<b>Figura 5.48a</b> – Zoneamento de Manganês (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.....	226
<b>Figura 5.48b</b> – Zoneamento de Manganês (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro/12), na cidade de Macapá – AP. ....	227
<b>Figura 5.49</b> – Diagrama mostrando que a água subterrânea do aquífero Tucunaré em Macapá tem origem nas precipitações e apresenta, em relação às mesmas, uma redução de 30% no conteúdo de $\delta^{18}O$ devido a perdas por evaporação da água meteórica durante o processo de recarga por infiltração direta das águas de chuva.	238
<b>Figura 5.50</b> – Idade qualitativa da recarga do aquífero Tucunaré em Macapá, segundo os dados de trício de 7 (sete) amostras coletadas. ....	240
<b>Figura 5.51</b> – Idades medidas com carbono 14 de amostras de água do aquífero Tucunaré em Macapá – AP.....	241

<b>Figura 5.52a</b> – Distribuição dos poços com presença /ausência de coliformes totais no aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012) na cidade de Macapá – AP.	244
<b>Figura 5.52b</b> – Distribuição dos poços com presença /ausência de coliformes totais no aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012) na cidade de Macapá - AP.....	245
<b>Figura 5.53a</b> – Distribuição dos poços com presença /ausência de <i>E. coli</i> no aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012) na cidade de Macapá – AP.....	248
<b>Figura 5.53b</b> – Distribuição dos poços com presença /ausência de <i>E. coli</i> no aquífero Tucunaré no período seco (outubro de 2012) na cidade de Macapá – AP. ....	249
<b>Figura 5.54</b> – Classificação das águas do aquífero Tucunaré em Macapá, coletadas no período chuvoso (abril de 2012) segundo o diagrama Triangular de Piper.....	250
<b>Figura 5.55</b> - Classificação das águas do Aquífero Tucunaré em Macapá segundo a composição química - Período chuvoso (abril de 2012).....	252
<b>Figura 5.56</b> – Classificação das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá, através do Diagrama de Piper, com base em amostras de água coletadas em outubro de 2012.....	253
<b>Figura 5.57</b> - Classificação das águas do Aquífero Tucunaré em Macapá segundo a composição química - Período seco (outubro de 2012). ....	255
<b>Figura 5.58a</b> – Águas cloretadas sódicas classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas em abril de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP. ....	256
<b>Figura 5.58b</b> – Água bicarbonatada sódica classificada segundo o Diagrama de Stiff, com base em amostra de água coletada em abril de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP. ....	260
<b>Figura 5.59a</b> – Águas cloretadas sódicas classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas no período de estiagem em outubro de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP. ....	261
<b>Figura 5.59b</b> – Águas bicarbonatadas sódicas, classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas no período de estiagem em outubro de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP. ....	265
<b>Figura 5.59c</b> – Águas bicarbonatadas cálcicas, classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas no período de estiagem em outubro de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP. ....	265
<b>Figura 5.59d</b> – Água cloretada cálcica, classificada segundo o Diagrama de Stiff, com base em amostra de água coletada no período de estiagem em outubro de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP.....	265
<b>Figura 5.60</b> – Classificação da potabilidade das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá no período chuvoso segundo o Diagrama de Schoeller-Berkaloff.....	266
<b>Figura 5.61</b> – Classificação das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá, no período de estiagem, segundo o Diagrama de Schoeller-Berkaloff. ....	267

<b>Figura 5.62</b> – Classificação das águas do Aquífero Tucunaré em Macapá para fins de irrigação – Abril de 2012.....	268
<b>Figura 5.63</b> – Classificação das águas do Aquífero Tucunaré em Macapá para fins de irrigação – Outubro de 2012.....	269
<b>Figura 5.64a</b> – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá na coleta de abril de 2012 – Método DRASTIC.....	279
<b>Figura 5.64b</b> – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá coleta de outubro de 2012 – Método DRASTIC. ....	280
<b>Figura 5.65</b> - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster & Hirata, 1988).....	281
<b>Figura 5.66a</b> – Distribuição espacial da <i>vulnerabilidade média</i> do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012) na cidade de Macapá – AP pelo método GOD..	285
<b>Figura 5.66b</b> – Distribuição espacial da <i>vulnerabilidade média</i> do Aquífero Tucunaré no período seco (outubro de 2012) na cidade de Macapá – AP pelo método GOD..	286

## ÍNDICE DE FOTOS

- Foto 5.1** – Kit's de coletas usados em campo para as amostragens de água do aquífero Tucunaré, nas duas campanhas, na cidade de Macapá - AP..... 105
- Foto 5.2** – Lançamento de esgoto in natura, em frente à residência situada a cerca de 85 m de distância do poço MPA29, na cidade de Macapá - AP..... 132
- Foto 5.3** – Descarte de resíduos sólidos em frente à propriedade, onde está localizado o poço MPA14, na cidade de Macapá - AP..... 233
- Foto 5.4** – Galpão de oficina mecânica, onde está localizado o poço MPA28, na cidade de Macapá - AP. .... 233

# **1 – Introdução**

## 1.1 - Objetivo do Estudo

Em atendimento aos **itens 6.4.3.7 e 6.4.3.8** dos TDRs, o objetivo do estudo é a caracterização dos aspectos fisiográficos, geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e a vulnerabilidade natural do aquífero Tucunaré da cidade piloto de Macapá, visando, sobretudo, à avaliação dos recursos hídricos subterrâneos e da qualidade das suas águas, com proposições finais orientadas para a elaboração de planos de gestão para a região amazônica.

## 1.2 - Metodologia

O estudo realizado envolveu três etapas distintas, a saber:

- Levantamento e análise da bibliografia existente;
- Serviços de campo, com inventário de 30 (trinta) poços, nos quais foi realizado um monitoramento quali-quantitativo constando de coleta de água para análises e medições de níveis d'água. Esse levantamento foi levado a efeito em duas campanhas. Na primeira, em abril de 2012, correspondente ao período chuvoso, foram feitas medições de nível de água e coletas de amostras de água para análises físico-químicas e microbiológicas (**anexo 7.2.1**). Na segunda, em outubro de 2012, durante o período de estiagem, além das coletas de água para análises físico-químicas e microbiológicas, nos 30 (trinta) poços (**anexo 7.2.2**), foram coletadas amostras de água para análises específicas (**anexo 7.2.3**) de metais pesados, BTEX e Fenóis em 9 (nove) poços; para análises isotópicas de trício, em 7 (sete) poços; para análises de oxigênio 18 e deutério, em 4 (quatro) poços e para análises de carbono 14 em 2 (dois) poços. Além disso, foram realizados ensaios de bombeamento em 2 (dois) poços existentes no aquífero Tucunaré, com profundidades de 158 m e 160 m, respectivamente, que apresentaram transmissividades muito superiores às dos demais poços existentes com profundidades inferiores a 60 m. Como se sabe, as transmissividades são diretamente proporcionais às espessuras e isto resulta numa maior capacidade de produção dos poços mais profundos, como será visto adiante.
- Interpretação dos resultados das análises de água, bem como dos dados existentes e levantados no campo, com avaliação quantitativa e qualitativa das águas do aquífero Tucunaré.

## 1.3 – Localização e Dimensões da Área de Estudo

O município de Macapá localiza-se na região Sudeste do estado do Amapá, entre as coordenadas geográficas de 49°46'15"W e 51°37'19"W e 0°35'16"S a 1°22'37"N, estendendo-se pela margem esquerda do Rio Amazonas desde o limite com Santana, a sudoeste, até o litoral atlântico. É cortado pela linha do Equador e sua altitude, na cidade sede, varia de 0 a 40 m.

Limita-se com os municípios de Ferreira Gomes, Cutias e Amapá (ao norte), Itauba e o Delta do Rio Amazonas a leste, Santana a sudoeste e Porto Grande a noroeste. A área do município de Macapá é de 6.408 km<sup>2</sup> e a população total segundo o Censo Demográfico do IBGE (2010), é de 398.204 habitantes, dos quais 381.214 (95,73%) na zona urbana e 16.990 (4,27%) na zona rural. A densidade demográfica é de 62,14 hab./km<sup>2</sup>.

A área da folha de 15 minutos da região de Macapá cobre uma superfície de 775 km<sup>2</sup>, dos quais apenas 144 km<sup>2</sup> correspondem à área de estudo (**figura 1.1**) propriamente dita, na qual foi realizado o monitoramento dos poços nas duas campanhas de medições de níveis e de coleta de água.

Nessa área, as precipitações pluviométricas das quais se originam a recarga por infiltração e o fluxo das águas superficiais, se distribuem por 4 (quatro) diferentes bacias hidrográficas:

- No setor norte, 19 km<sup>2</sup> estão na bacia hidrográfica do igarapé Curiaú, onde o escoamento superficial se realiza para Norte;
- No oeste, ocorrem 3 km<sup>2</sup> na bacia do rio Matapí, na qual as águas de chuva escoam para Sudoeste;
- Ao sul, 13 km<sup>2</sup> na porção meridional da bacia do igarapé da Fortaleza os deflúvios superficiais são drenados para o Sul;
- A área restante, de 109 km<sup>2</sup>, corresponde à porção setentrional da bacia do igarapé da Fortaleza, na qual o fluxo superficial escoam no sentido Sul e Leste. Nessa última área as zonas baixas, de relevo pertencente à Planície Amazônica, ocupam 23 km<sup>2</sup> e são inundadas por ressacas através do rio Amazonas (marés de amplitude anormal) e, por este motivo, chamadas localmente de áreas de ressacas ou simplesmente ressacas. As colinas dissecadas do tabuleiro costeiro ocupam os 86 km<sup>2</sup> restantes.

Assim sendo, o balanço hidrogeológico foi feito apenas para a área de 109 km<sup>2</sup>, na qual ocorrem as precipitações que originam a recarga e o respectivo fluxo subterrâneo do aquífero Tucunará (**item 4.1.4**).

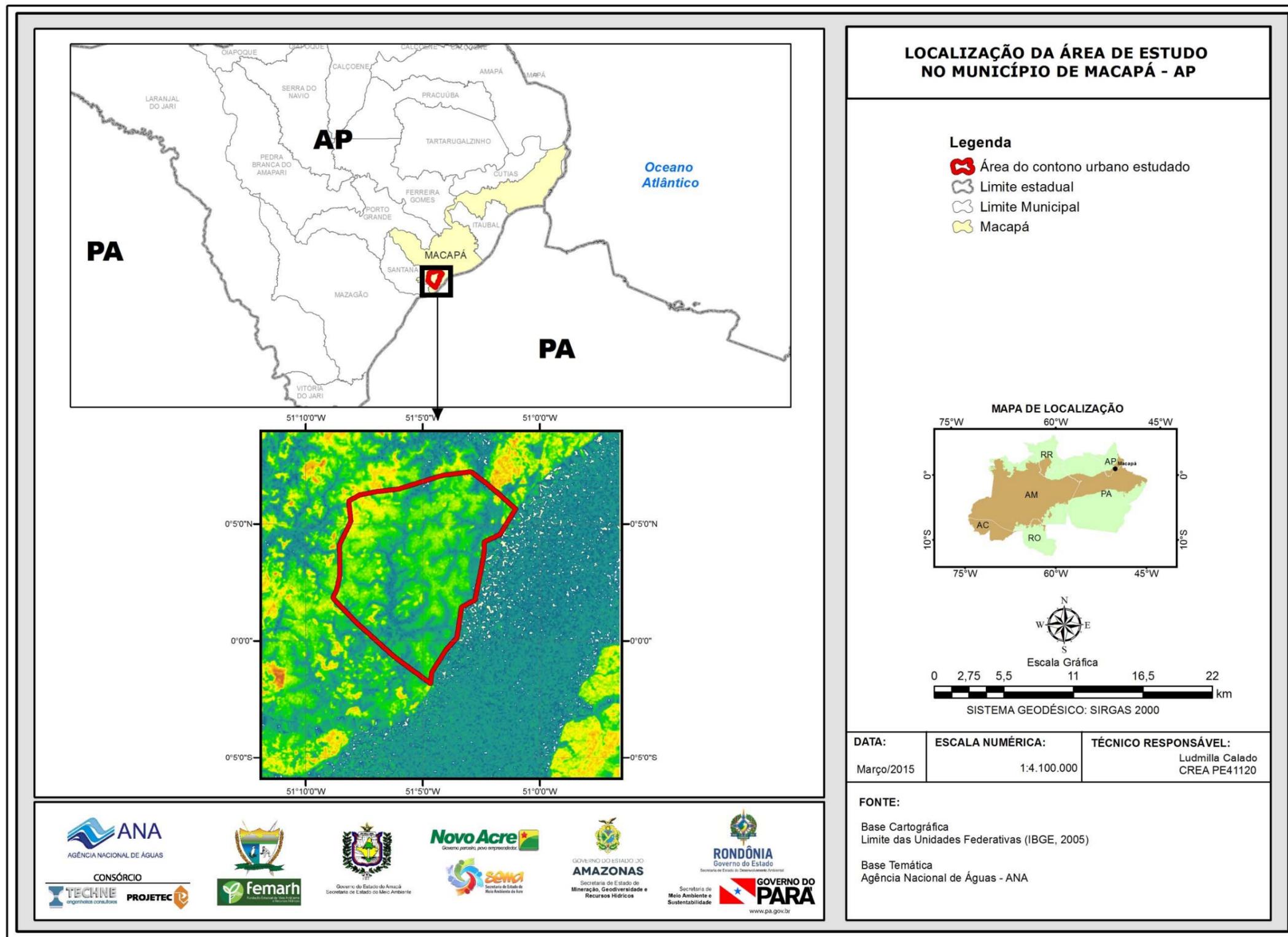


Figura 1.1 – Localização do município de Macapá e da área de estudo.

## **2 - Fisiografia**

## 2.1 – Elementos e Fatores do Clima

Temperatura, ventos, umidade relativa e insolação, constituem, juntamente com as precipitações, os principais elementos e fatores condicionantes do clima de uma região. Por padrão da Organização Meteorológica Mundial (OMM) as caracterizações climáticas devem ser caracterizadas com base em “normais climatológicas” de 30 anos.

Para a cidade de Macapá, segundo as Normais Climatológicas 1961-1990 (INMET, 2009), os valores dessas variáveis meteorológicas principais são apresentados na **tabela 2.1**. Além disso, sobretudo para a inclusão de valores de evapotranspiração potencial e evapotranspiração real que não constam das normais de 1961-1990, são também apresentados (**tabela 2.2**), dados dos 30 anos mais recentes do período de 1981-2010 levantados da rede do INMET. A comparação dos resultados concernentes aos dois últimos períodos de 30 anos de dados revela diferenças importantes de comportamento entre algumas das variáveis meteorológicas estudadas, como se verá adiante, sendo este fato atribuído, em parte, a falhas de registros verificadas nos 30 anos mais recentes e em parte à superposição de 10 anos entre os dois períodos estudados. Essas discrepâncias certamente serão minimizadas pelo INMET quando da publicação das Normais Climatológicas de 1991-2020.

### 2.1.1 - Clima

O clima do município de Macapá é do tipo Af de Köppen, tropical úmido ou equatorial quente-úmido, com temperatura média do mês mais frio superior a 18°C (**tabela 2.1**).

**Tabela 2.1** – Variáveis meteorológicas da Estação 82098 de Macapá, segundo as Normais Climatológicas de 1961-1990 (INMET, 2009)\*.

Mês	Direção do Vento	Velocidade do Vento (m/s)	Insolação (horas)	Precipitação		Temperatura do Ar (°C)			Umidade Relativa (%)
				Número de dias	Lâmina (mm)	Média	Min	Max	
JAN	NE	2,4	147,3	20	305,5	25,9	23,0	29,7	86,0
FEV	NE	2,2	110,1	19	341,5	25,7	23,1	29,2	87,0
MAR	NE	2,0	109,2	22	407,7	25,7	23,2	29,3	88,0
ABR	NE	1,8	114,8	21	378,9	26,0	23,5	29,5	89,0
MAI	NE	1,7	152,0	22	361,7	26,2	23,5	30,0	88,0
JUN	NE	1,5	190,1	18	219,8	26,2	23,2	30,3	86,0
JUL	NE	1,6	227,1	16	182,3	26,1	22,9	30,6	85,0
AGO	NE	2,2	271,4	10	97,8	26,8	23,3	31,5	81,0
SET	NE	3,1	272,5	5	43,0	27,5	23,4	32,1	76,0
OUT	NE	3,5	282,4	3	31,9	28,0	23,5	32,6	75,0
NOV	NE	3,3	252,9	4	58,6	27,8	23,5	32,3	76,0
DEZ	NE	2,9	205,4	9	132,5	27,1	23,4	31,4	80,0
<b>ANO</b>	<b>NE</b>	<b>2,4</b>	<b>2.335,2</b>	<b>169</b>	<b>2.561,3</b>	<b>26,6</b>	<b>23,3</b>	<b>30,7</b>	<b>83,1</b>

\*Todos os valores nessa tabela, tanto mensais quanto anuais, são valores médios, ou seja, normais. Os totais anuais, ou médias anuais, de insolação, número de dias de chuva e de precipitação são iguais à soma das médias mensais.

**Tabela 2.2** – Estação 82098 – Macapá: Médias mensais das variáveis meteorológicas no período de 1981-2010. Fonte: Dados da base do INMET\*.

Mês	Direção do Vento (graus)	Velocidade do Vento (m/s)	Evapotranspiração BH		Insolação (horas)	Precipitação		Temperatura do Ar (°C)	Umidade Relativa (%)
			Potencial (mm)	Real (mm)		Número de dias	Lâmina (mm)		
JAN	9,6	2,0	149,5	132,3	158,1	22	294,7	26,3	86,0
FEV	8,7	1,9	124,4	124,4	117,1	22	343,3	26,0	87,9
MAR	8,4	1,7	139,0	139,0	120,0	25	394,2	26,2	88,0
ABR	5,5	1,5	138,1	138,1	124,2	25	384,0	26,5	88,2
MAI	2,5	1,4	148,8	148,8	164,5	25	319,5	26,7	87,5
JUN	1,2	1,2	141,4	141,4	198,9	22	244,7	26,8	85,4
JUL	0,9	1,3	151,6	150,1	234,3	20	179,8	26,7	83,5
AGO	4,6	2,0	165,6	139,4	265,3	12	90,2	27,5	79,7
SET	5,1	2,9	171,2	70,8	273,6	5	28,0	28,2	74,3
OUT	5,0	3,1	184,6	85,8	285,3	4	34,8	28,5	72,7
NOV	5,2	2,9	176,9	107,2	254,9	5	69,8	28,3	73,9
DEZ	4,4	2,5	158,8	153,2	215,0	13	153,5	27,5	79,5
<b>ANO</b>	<b>5,1</b>	<b>2,0</b>	<b>1.849,7</b>	<b>1.530,6</b>	<b>2.411,2</b>	<b>200</b>	<b>2.536,4</b>	<b>27,1</b>	<b>82,2</b>

\*Todos os valores nessa tabela, tanto mensais quanto anuais, são valores médios, ou seja, normais. Os totais anuais, ou médias anuais, de insolação, número de dias de chuva e de precipitação são iguais à soma das médias mensais.

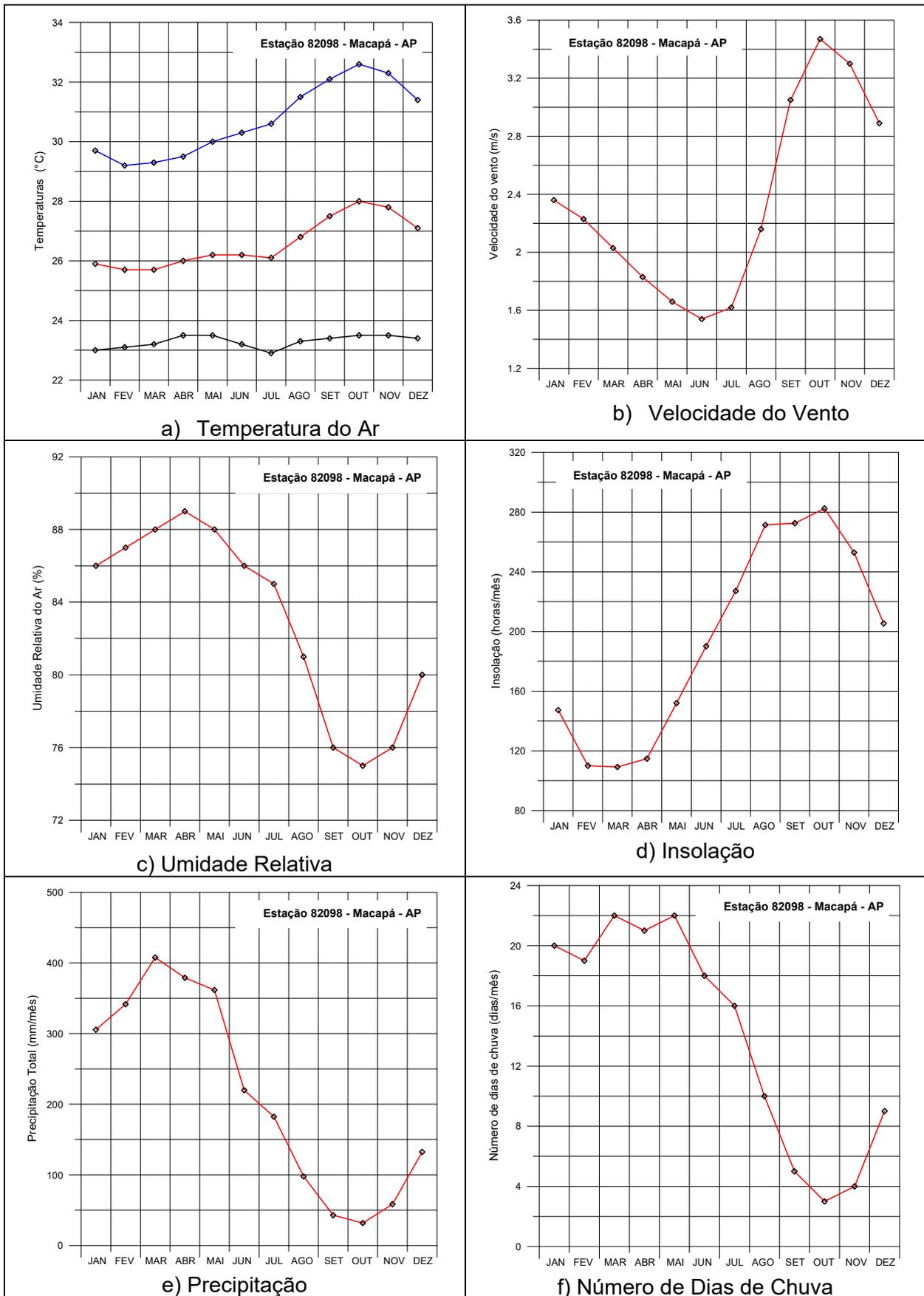
### 2.1.2 - Temperatura

Segundo as Normais Climatológicas de 1961-1990, as temperaturas médias mensais em Macapá ficaram compreendidas entre 25,7°C e 28°C com uma média anual de 26,6°C (**tabela 2.1**). Nos 30 anos mais recentes (**tabela 2.2**) as médias mensais variaram de 26°C a 28,5°C e a média anual foi de 27,1°C, indicando um aumento local de 0,5°C, consistente com a hipótese de *aquecimento global*, ainda questionada por boa parte da comunidade científica.

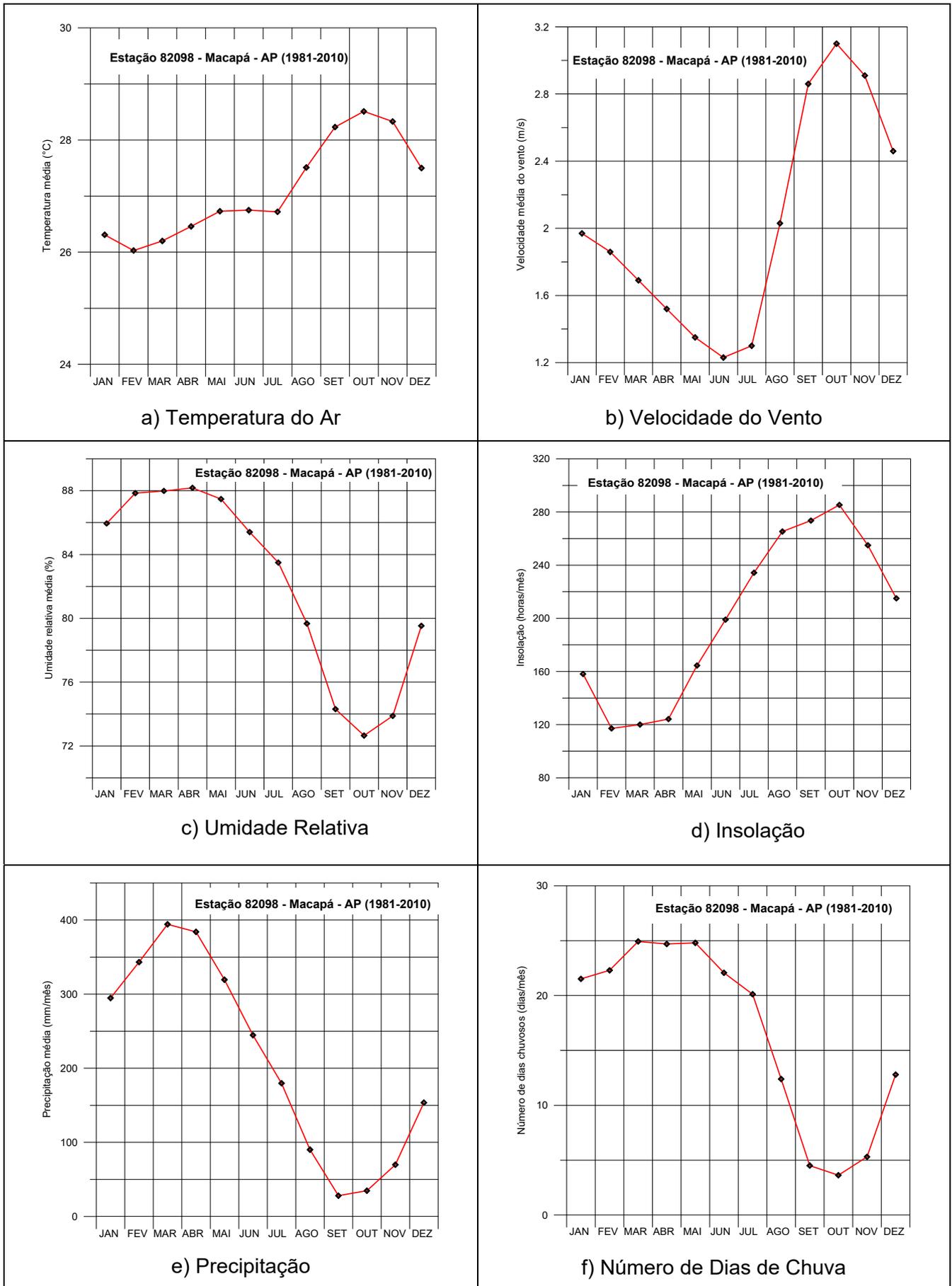
A variação das normais de 1961-1990 das temperaturas mínima, média e máxima em Macapá é ilustrada na **figura 2.1a**. Para o período de 1981-2010 dispõe-se apenas das temperaturas médias (**figura 2.2a**) cuja variação mensal apresenta o mesmo padrão das normais das temperaturas médias, tendo fevereiro como o mês mais frio e outubro como o mês mais quente do ano.

### 2.1.3 - Ventos

A direção normal predominante dos ventos em Macapá no período de 1961-1990 (**tabela 2.1**) é NE, com intensidade média variável de 1,5 m/s em junho, a 3,5 m/s em outubro, registrando uma média anual de 2,4 m/s. No período de 1981 a 2010 (**tabela 2.2**) o comportamento dos ventos foi praticamente o mesmo dos 30 anos anteriores, variando em intensidade de 1,2 m/s (junho) a 3,1 m/s (outubro) e apresentando média anual de 2,4 m/s. Registra-se apenas, em relação às normais, ligeira variação na direção, que nos 30 anos mais recentes parece ter se aproximado um pouco mais da Norte, como sugere a média de 5,1 graus, melhor classificada como NNE do que como NE. Em ambos os períodos a distribuição mensal da intensidade dos ventos segue o mesmo padrão, com mínima em junho e máxima em outubro (**figuras 2.1b e 2.2b**).



**Figura 2.1** – Variáveis meteorológicas condicionantes do clima em Macapá (Estação 82098) segundo as Normais Climatológicas 1961-1990 (INMET, 2009).



**Figura 2.2** – Variáveis meteorológicas condicionantes do clima em Macapá, no período de 1981-2010 segundo dados da Estação 82098 – Macapá. Fonte: Dados da base do INMET.

#### **2.1.4 - Umidade Relativa**

As normais 1961-1990 de umidade relativa do ar em Macapá (**tabela 2.1**) variam de 75% no mês mais seco (outubro) a 89% no segundo mês mais chuvoso do ano (abril). Conforme **tabela 2.2**, nos 30 anos mais recentes (1981-2010) essa variação foi de 72,7% em (outubro) e de 88,2% em (abril). Mantém-se, portanto, o mesmo padrão de distribuição mensal da umidade relativa do ar nos dois períodos de 30 anos considerados (**figuras 2.1c e 2.2c**), a menos de uma redução (-1,1%) na média anual.

#### **2.1.5 - Insolação**

A insolação média mensal, de acordo com as normais de 1961-1990 em Macapá, oscilou entre 109,2 horas (em março) e 282,4 horas (em outubro), com média anual de 2335,2 horas (**tabela 2.1**). Nos 30 anos mais recentes (1981-2010) essa variação oscilou de 117,1 horas (em fevereiro) a 285,3 horas (em outubro), sendo a média anual igual a 2411,2 horas (**tabela 2.2**). O padrão de distribuição mensal (**figuras 2.1d e 2.2d**) é o mesmo em ambos os períodos de 30 anos considerados, com mínimos no trimestre chuvoso (fevereiro a abril) e máximos no período seco (setembro a novembro). Registra-se apenas, em relação às normais, um aumento (+3,3%) na magnitude da média anual de insolação no período de 1981-1990, consistente com o aumento de 0,5°C na temperatura, como já anteriormente descrito.

#### **2.1.6 - Precipitação**

Os totais mensais das precipitações normais do período de 1961-1990 em Macapá (**tabela 2.1**) oscilam entre 31,9 mm (outubro) e 407,7 mm (março), com uma média anual de 2561,3 mm, dos quais 79% (2015,1 mm) precipitam no primeiro semestre e 21% (546,1 mm) no segundo semestre. No período de 1981-2010 (**tabela 2.2**) as médias mensais variam de 28 mm (setembro) a 394,2 mm (março), com total anual de 2536,4 mm. Desse total, 78% (1980,4 mm) no primeiro semestre e 22% (556,1 mm) no segundo semestre. Esses números revelam que, em relação às normais de 1961-1990, o regime pluvial de Macapá nos 30 anos de dados mais recentes continua praticamente o mesmo, embora registrando pequena redução (-1%) nas precipitações médias anuais.

#### **2.1.7 - Número de dias de chuva**

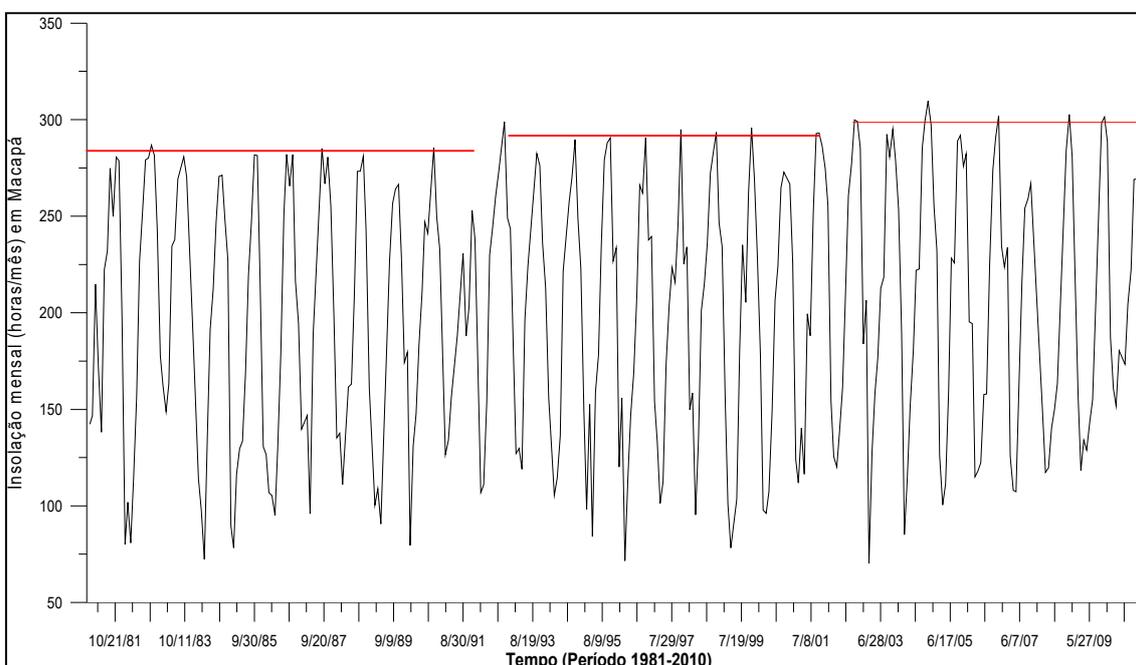
O número médio anual de dias de chuva em Macapá, segundo as Normais Climatológicas de 1961-1990 (**tabela 2.1**) é de 169 dias, dos quais 122 (72%) no semestre chuvoso e 47 (28%) no semestre de estiagem. Já no período de 1981-2010 (**tabela 2.2**), embora tenha chovido 1% menos do que no período de 1961-1990, o número médio de dias de chuva é 18% maior, chegando a 200 dias, sendo 141 dias (70%) no semestre chuvoso e 59 dias (30%) no semestre de estiagem.

#### **2.1.8 - Evapotranspiração**

Dados de evapotranspiração em Macapá, existentes apenas para o período de 1981-2010 (**tabela 2.2**), segundo balanço hídrico da rede do INMET, indicam evapotranspiração potencial média anual de 1849,7 mm (5,1 mm/dia) e média anual de 1530,6 mm (4,2 mm/dia) para a evapotranspiração real.

Esses dados de evapotranspiração da base de dados do INMET não contemplam toda a série de 30 anos do período de 1981-2010, mas apenas períodos de 5 a 6 anos cujas médias foram incluídas na **tabela 2.2** para dar uma ideia das médias mensais e da média anual de dados disponíveis nesse período. Por esse motivo esses dados não permitem fazer uma análise dos períodos de maior e de menor evapotranspiração. Não obstante isso pode ser feito indiretamente usando os dados disponíveis de insolação mensal, cujos valores influem na energia radiante à qual a evapotranspiração, segundo a fórmula de Penman é diretamente proporcional.

Os dados de insolação da base de dados do INMET em Macapá cobrem 93% do período 1981-2010 (336/360) meses. Esses dados analisados em escala decenal revelam uma tendência de aumento, como ilustra a **figura 2.3** chegando a 5% entre as décadas de 1981-1990 e 1991-2000, como mostrado na **tabela 2.3**. Pode-se, pois, admitir que essa é também a tendência da evapotranspiração em Macapá.



**Figura 2.3** – Ilustração da tendência de aumento decenal da insolação mensal na estação 82098 Macapá.

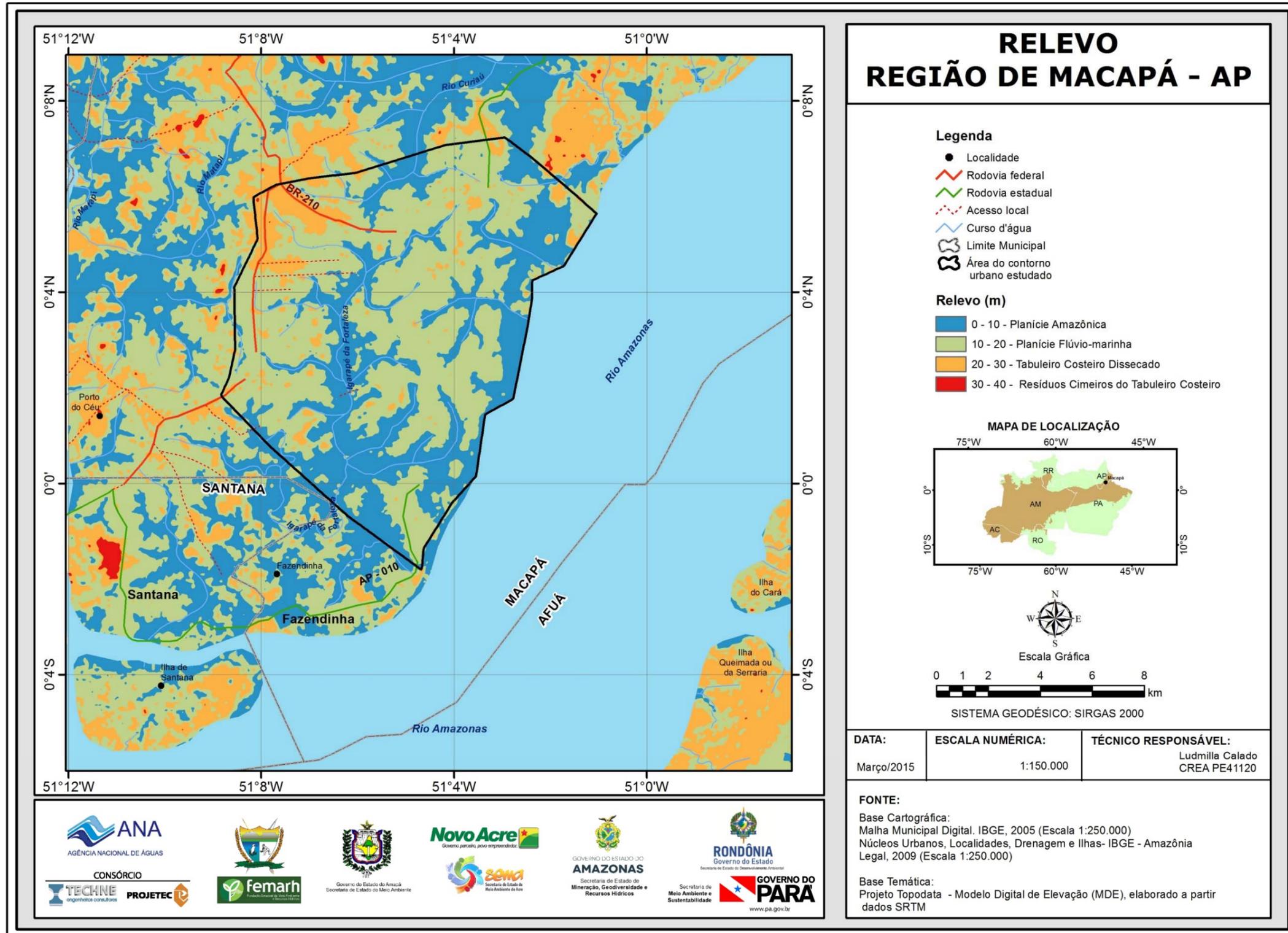
**Tabela 2.3** – Variação da insolação mensal na Estação 82098 Macapá no período de 1981 a 2010.

Decênio	Número de meses	Insolação (horas/mês)		
		Mínima	Máxima	Média
Jan81-Dez90	114	72	287	196
Jan91-Dez00	110	72	299	198
Jan01-Dez10	112	70	309	206

## 2.2 - Relevo

O relevo da folha de 15 minutos da região de Macapá (**figura 2.4**) é caracterizado por uma superfície de erosão dos depósitos Quaternários da Formação Tucunaré, fortemente dissecada em 4 (quatro) diferentes unidades morfológicas:

- 1) **Planície Amazônica:** assim se denomina a superfície correspondente à primeira faixa de altitudes, com cotas compreendidas entre 0 e 10 m, com relevo muito plano e que se caracteriza como um *glacis de acumulação* dos sedimentos erodidos pela ação pluvial e dos sedimentos trazidos pelas inundações do rio Amazonas. Trata-se das planícies que se desenvolvem no fundo dos vales e que, pelo fato de serem periodicamente invadidas pelas marés do rio Amazonas, recebem localmente a denominação de *áreas de ressaca*. Com área de 57 km<sup>2</sup> essa unidade cerca de 40% da área de estudo;
- 2) **Planície Flúvio-Marinha:** corresponde à segunda faixa de relevo e é representada por uma superfície pouco ondulada com altitudes compreendidas entre mais de 10 m até 20 m, ocupando a maior parte da área emersa da folha e também, dentro da área de estudo, com 80 km<sup>2</sup>, ocupa 55% do território;
- 3) **Tabuleiro Costeiro Dissecado:** no terceiro intervalo de cotas (acima de 20 m até 30 m), o relevo é marcado por uma superfície constituída de colinas isoladas que refletem a intensa dissecção do pretérito tabuleiro da Formação Tucunaré, ocupando apenas 5% da área de estudo;
- 4) **Resíduos Cimeiros do Tabuleiro Costeiro:** Com características análogas às da terceira superfície, tem-se finalmente como testemunhos em vias de completa obliteração, os resíduos da superfície cimeira (com mais de 30 m até 40 m de altitude). Não ocorre dentro da área de estudo.



**Figura 2.4** – Caracterização do relevo mostrando a influência do Rio Amazonas sobre as terras baixas na folha de 15 minutos da região de Macapá – AP.

### 2.3 - Hidrografia

A hidrografia na folha de 15 minutos de Macapá (**figura 2.5**) é totalmente governada pelo rio Amazonas, que apresenta um espelho líquido de 290 km<sup>2</sup>, equivalente a 38% da área da folha, e uma largura de 11 km na altura da cidade de Macapá.

A ação dos ventos sobre essa formidável massa líquida, associada aos efeitos das marés, produz oscilações de nível que são responsáveis pela dinâmica fluvial, com avanços e recuos das águas do rio Amazonas sobre as terras baixas constituintes das várzeas, consagradas na bibliografia (ex. Souza Filho *et al.*, 2013) como *áreas de ressaca*, e consideradas do ponto de vista morfológico (**item 2.2**) como um *glacis de acumulação*.

Como pode ser visto na **figura 2.5**, na folha Macapá essas áreas de ressaca ocupam parcialmente 4 (quatro) pequenas bacias, cujas denominações e áreas de drenagem são:

- Bacia do rio Matapí, no setor WNW, com área de drenagem de 114 km<sup>2</sup>, dos quais aproximadamente 3 km<sup>2</sup> estão na área de estudo;
- Bacia do rio Curiaú, ao norte, com área de drenagem de 95 km<sup>2</sup>, dos quais 19 km<sup>2</sup> se encontram na área de estudo;
- Bacia Setentrional do Igarapé da Fortaleza, onde se encontra a região Metropolitana de Macapá, com área de drenagem de 109 km<sup>2</sup>;
- A Bacia Meridional do Igarapé da Fortaleza, com área de drenagem de 103 km<sup>2</sup>, dos quais apenas 13 km<sup>2</sup> (12,6%) são encontrados no limite sul da área de estudo, ficando os 90 km<sup>2</sup> restantes (87,4%) fora da área de estudo.

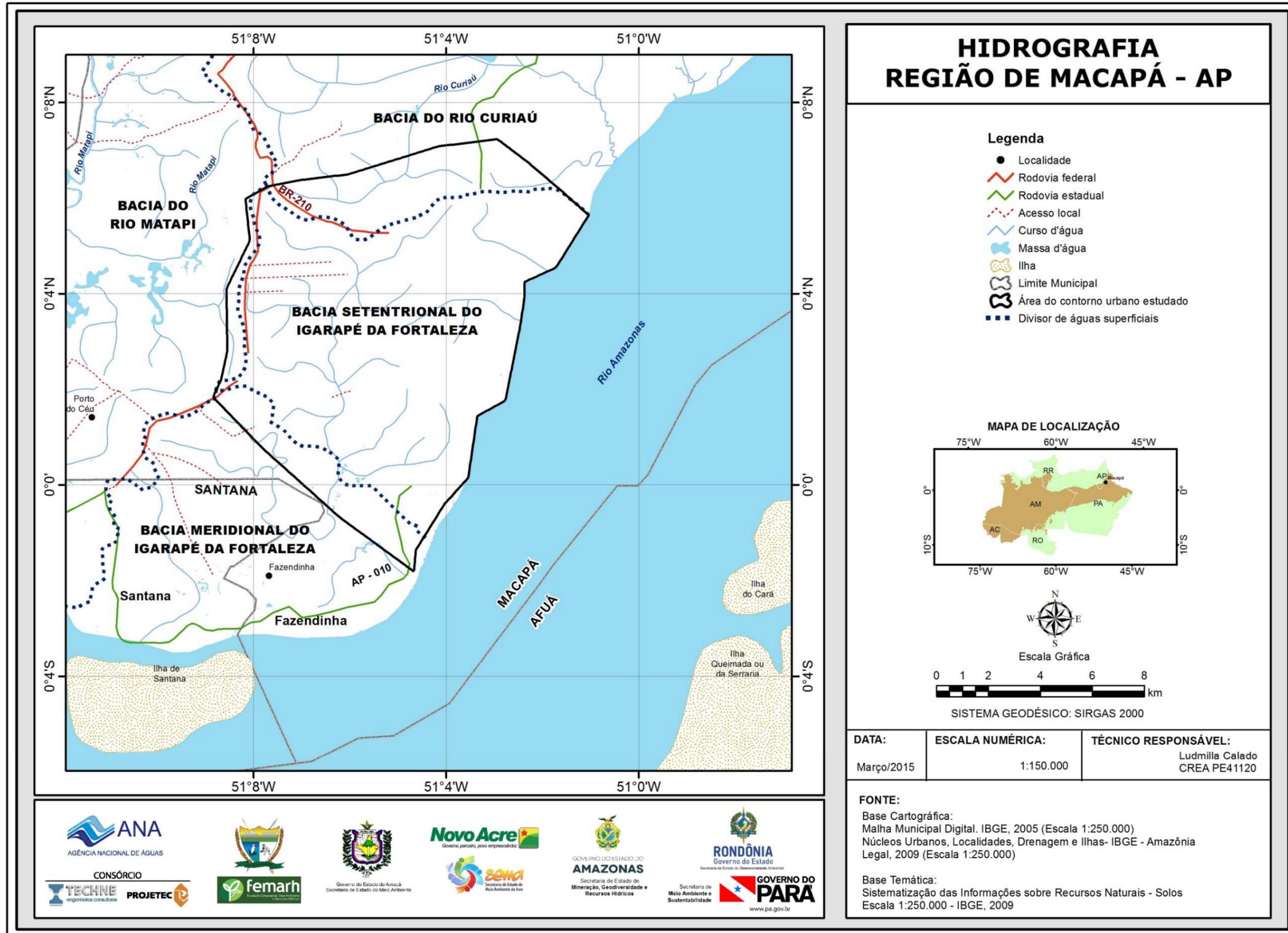


Figura 2.5 – Hidrografia da folha de 15 minutos da região de Macapá - AP.

## 2.4 - Solos

A caracterização dos solos na folha de 15 minutos da região de Macapá (**figura 2.6**) se baseia em estudos realizados por Santos *et al.* (2004) no âmbito do Projeto Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro do Estado do Amapá, através dos quais foram identificadas as seguintes unidades:

- **Plintossolo Háptico Distrófico – FXd:** ocupa uma pequena área com cerca de 4 km<sup>2</sup> no sudeste da folha, na ilha Queimada ou da Serraria.
- **Gleissolo Háptico Tb Eutrófico – GXbe:** são solos pouco desenvolvidos, pouco porosos, mal drenados, de baixa permeabilidade, de cores acinzentadas mosqueadas por conta dos processos de oxirredução dos compostos de ferro que ocorrem em meio anaeróbico sob influência do nível freático que se encontra muito próximo à superfície devido ao regime de marés a que estão submetidos. Na folha de 15 minutos da região de Macapá esses solos estão mapeados em quatro manchas isoladas, das quais 3 (três) correspondem às ilhas de Santana (17,3 km<sup>2</sup>), ao sul, Queimada (16,3 km<sup>2</sup>) e do Cará (6,7 km<sup>2</sup>) a sudeste. A quarta e última mancha, com 17,2 km<sup>2</sup>, se encontra na porção centro norte da folha, tendo uma pequena parte (2,5 km<sup>2</sup>) dentro da área de estudo.
- **Gleissolo Háptico Ta Eutrófico – GXve:** em termos de composição no primeiro e segundo níveis (ou horizontes A e B) são semelhantes aos gleissolos GXbe, porém deles se diferenciam no terceiro nível por conta da presença de argila de alta atividade (Ta). Na área da folha estão representados em 4 (quatro) manchas isoladas, estando a mais importante localizada no setor NE, ocupando 38,5 km<sup>2</sup> dos quais 12 km<sup>2</sup> na área de estudo. A três manchas restantes se encontram a noroeste (11,6 km<sup>2</sup>), a oeste (1,3 km<sup>2</sup>) e ao sul (5,7 km<sup>2</sup>).
- **Latossolo Amarelo Distrófico – LAd:** é o tipo de solo dominante na folha de 15 minutos e na área de estudo. Típico A moderado textura argilosa se distribui na região de Macapá sobre uma superfície de 268 km<sup>2</sup>, dos quais cerca de 130 km<sup>2</sup> estão na área de estudo e correspondem a 90% da mesma.
- **Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico – LVAd:** A fraco textura média. É muito pouco representado na folha de 15 minutos, cobrindo tão somente uma pequena área (1,3 km<sup>2</sup>) no setor noroeste da folha e não ocorre na área de estudo.
- **Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico – PVAd:** A moderado textura média/argilosa. Não ocorre na área de estudo e somente se encontra na bacia do rio Matapi, no setor noroeste da folha, cobrindo uma superfície de 54 km<sup>2</sup>.

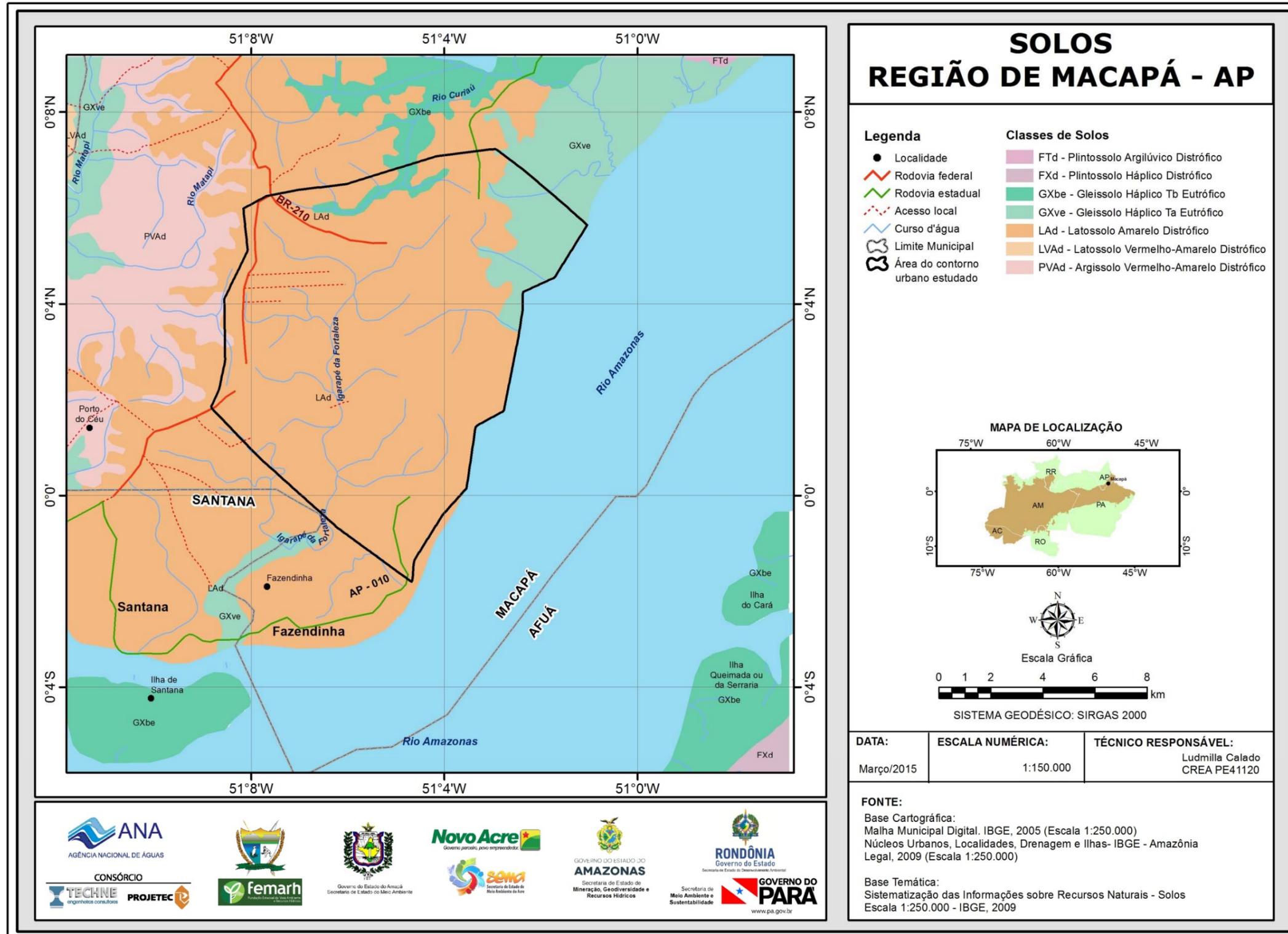


Figura 2.6 – Classes de solos da região de Macapá - AP.

## 2.5 - Vegetação

Na folha de 15 minutos da região de Macapá, segundo Santos *et al.* (2004), as áreas de ocupação antrópica e de vegetação natural, como mostra a **figura 2.7**, se distribuem da seguinte maneira:

### Áreas de Influência Antrópica Dominante

1. **Culturas Cíclicas:** são desenvolvidas numa área de 110 km<sup>2</sup> (25% do território da folha) dos quais 47,6 km<sup>2</sup> se encontram na área de estudo e representam 33% da mesma;
2. **Vegetação Secundária sem Palmeiras:** corresponde a uma área de 18,2 km<sup>2</sup> (4% da área emersa da folha) e não ocorre na área de estudo;
3. **Ocupação urbana:** com superfície de 22 km<sup>2</sup> representa cerca de 5% do território da folha e 15% da área de estudo.

### Vegetação Natural Dominante

4. **Floresta Ombrófila Densa Aluvial** - vegetação exuberante com grande variedade de espécies ocupa área de apenas 7 km<sup>2</sup> na porção nordeste da folha de 15 minutos, dos quais 5,5 km<sup>2</sup> se acham na área de estudo cobrindo cerca de 4% da mesma. Essa floresta está sujeita à influência anual do nível de água e apresenta espécies com adaptações que permitem suportar os meses de submersão ou alagamento;
5. **Floresta Ombrófila Densa Aluvial Dossel Uniforme** – essa formação florestal se distribui na área da folha em manchas dispersas pelos setores nordeste, sudoeste e sudeste que cobrem uma área total de 78 km<sup>2</sup> equivalente a 18% da área da folha de 15 minutos, mas que não está presente na área de estudo;
6. **Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas** – trata-se de formação florestal com área de 5,2 km<sup>2</sup> que ocorre em uma única mancha de 5,2 km<sup>2</sup> (aproximadamente 1% da área da região) no centro-oeste da folha e que também não aparece na área de estudo;
7. **Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas Dossel Uniforme** - formação florestal representada por uma única mancha de 13,9 km<sup>2</sup> (cerca de 3% do território da área da região) no noroeste da folha de 15 minutos e sem representação na área de estudo;
8. **Formações Pioneiras** – também constituídas por uma única mancha no noroeste da folha, essas formações ocupam área de 27,1 km<sup>2</sup> (6% da área da folha de 15 minutos), porém não aparecem, na área de estudo;
9. **Savana Parque** – ocorre essencialmente (99,5% da ocorrência) a oeste da área de estudo, na bacia do rio Matapi, cobrindo uma área de 40,3 km<sup>2</sup>. Todavia, tem uma minúscula representação (0,5%) na área de estudo;
10. **Savana Parque com Floresta de Galeria** – cobre uma superfície de 63,4 km<sup>2</sup>, constitui a vegetação dominante no setor norte da área de estudo e ocupa 44% da mesma.

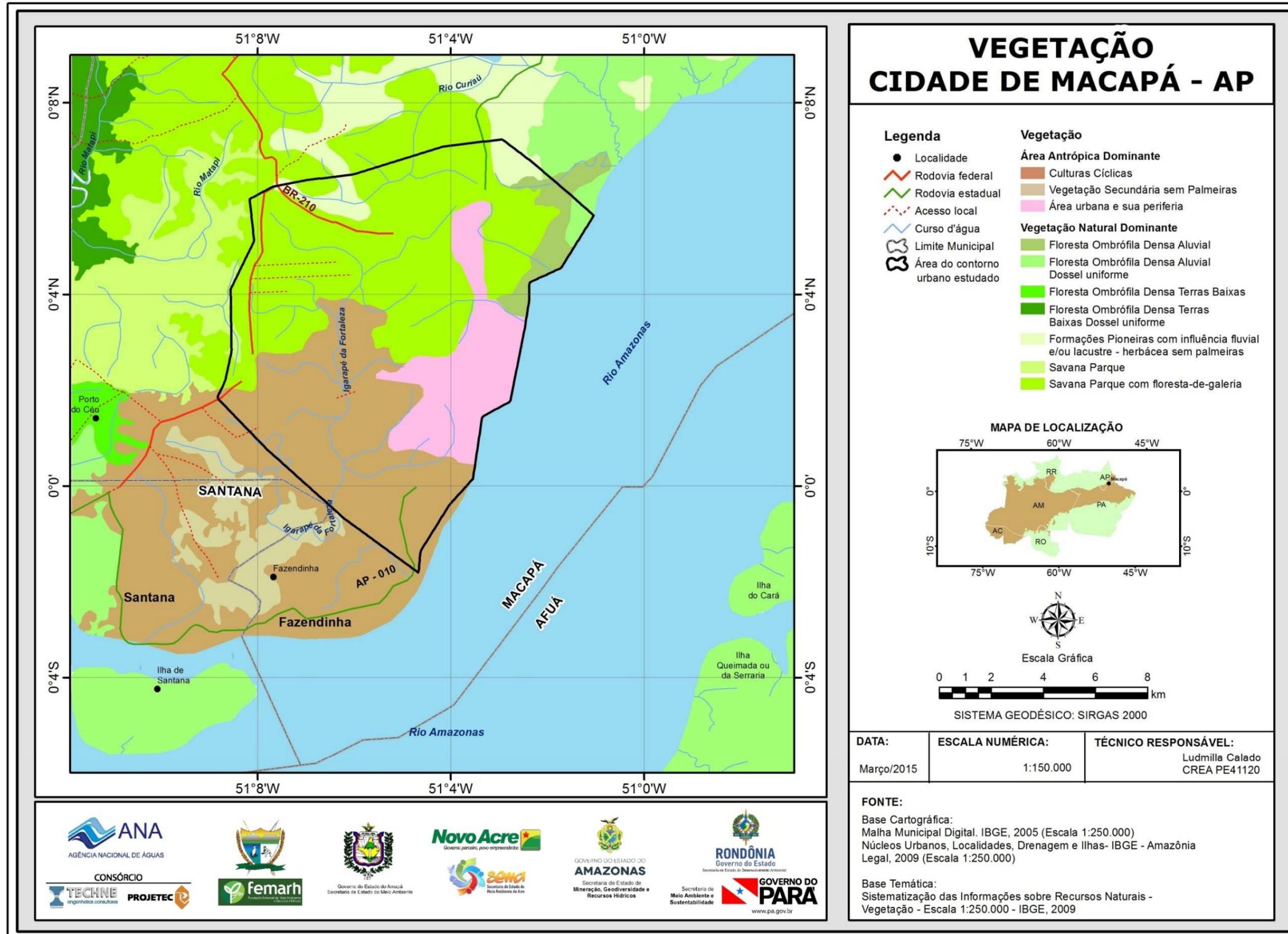


Figura 2.7 – Classes de vegetação da região de Macapá - AP.

## **2.6 – O Fenômeno das Ressacas em Macapá**

Segundo Bitencourt *et al.* (2002), o fenômeno ressaca é o aumento do nível do mar provocado pela elevação da maré astronômica e/ou maré meteorológica, acompanhado de ondas com amplitude maior que o normal. Geralmente o aumento do nível do mar se dá pelo “empilhamento” de água na costa, causado pela força do vento na superfície do mar (maré meteorológica), somado a força gravitacional exercida pelos astros (maré astronômica), principalmente o sol e a lua.

Em Macapá encontram-se extensas áreas úmidas chamadas localmente de "ressacas", que constituem sistemas físicos fluviais preenchidos por partículas finas, drenados por água doce e ligadas a um curso principal d'água, influenciados fortemente pela pluviosidade e possuindo vegetação herbácea (Takiyama *et al.*, 2012).

O termo “áreas de ressaca” é utilizado regionalmente no Amapá para designar as bacias de acumulação de águas influenciadas pelo regime das marés e das chuvas (SEMA-AP, 2006). Apesar da existência de legislação específica de proteção dessas áreas (Lei Estadual nº 0835 de 27 de maio de 2004), estas continuam sofrendo impactos da ocupação humana, como destruição da vegetação nativa, despejamento de lixo e esgoto e inclusive impactos de atividades econômicas, como a extração mineral, especialmente a argila. É nessas áreas que muitos dos imigrantes oriundos de outros Estados estão encontrando espaço “gratuito” para a construção de suas moradias, a falta de fiscalização de órgãos responsáveis, bem como a ausência de discussão social contribuem para sua degradação (Santos Filho, 2011).

As zonas baixas de planícies interiores ocupadas por depósitos aluviais e flúvio-marinhos são conhecidas como ressacas em Macapá. Os depósitos de planície localizados nas proximidades do rio Amazonas estão sujeitos a inundações, principalmente no pico de cheia de março e abril, que coincide com o período chuvoso da região, o que acarreta do ponto de vista da qualidade de água subterrânea, aumento significativo nos teores de sólidos totais dissolvidos, como será observado adiante no capítulo 5, da Hidrogeoquímica.

Esse aumento significativo em grande parte dos teores se realiza por influência da faixa de transição entre as águas doces e salgadas, que constitui uma zona de mistura, originada pelo fenômeno da dispersão hidrodinâmica.

## **2.7 – Influência do Intemperismo Químico Regional na Qualidade das Águas Subterrâneas da PHA**

As considerações a seguir, derivadas de Snoeyink & Jenkins (1980), ajudam a entender a formação da composição química dos tipos de águas naturais oriundas de precipitações e, por esse motivo, são úteis para a interpretação dos resultados das análises físico-químicas realizadas na PHA.

Como parte do ciclo hidrológico a água que evapora dos oceanos é transportada para o interior dos continentes. O vapor d'água, durante a sua passagem através da baixa atmosfera, tem a possibilidade de entrar em equilíbrio com os gases ali existentes, cuja composição média está sujeita a variações consideráveis, principalmente de alguns constituintes menores, tais como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre

(SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), etc. que são produtos de processos de combustão e estão associados com a poluição do ar, em comunidades urbanas e industriais.

Quando precipita sobre a superfície do terreno, a água da chuva entra em contato com rochas, sedimentos, solos, áreas urbanas, animais e plantas. Desse contato decorrem reações químicas que posteriormente modificam a composição da água. As reações químicas dos ácidos da água da chuva (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>) com os minerais constituintes das rochas alteram esses minerais através de um processo chamado de **intemperismo químico**. Trata-se de um processo que depende exclusivamente da água.

Os fatores condicionantes deste processo são inúmeros, começando pelo clima, marcado por altas temperaturas e alta pluviosidade associadas a uma vasta cobertura vegetal, incluindo ainda relevo, circulação de água, condições de Eh e pH, variações no nível freático e, sobretudo, tempo de atuação desses fatores.

Na PHA esse processo vem atuando sobre as formações cenozoicas, nas quais se encontram os principais aquíferos, desde o Neomioceno até os dias atuais, ou seja, há milhões de anos, e dele resultaram como produtos: resíduos e solutos.

- **Resíduos:** são elementos “insolúveis” em água, tais como Al<sup>3+</sup> e Fe<sup>3+</sup> que dão origem a depósitos de bauxita e laterita, respectivamente, além do quartzo que resulta em areia;
- **Solutos:** são elementos móveis em solução: Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, que são lixiviados no processo de intemperismo e quase totalmente (99%) transportados pelos rios, daí porque é de se esperar que na PHA esses íons não mais existam em quantidade significativa nos sedimentos e que hoje estes provenham, sobretudo, da água da chuva e de influências antrópicas, já que todas as amostras foram coletadas em zonas urbanas na PHA.

Portanto, a origem desses solutos nas águas subterrâneas dos aquíferos da PHA, nos quais predominam materiais arenosos, provavelmente pouco se deve diretamente ao processo de intemperismo, que praticamente já está consumado. As baixas concentrações se devem ao fato de que os íons provêm quase totalmente da chuva.

Em Macapá, como em toda a PHA, as águas subterrâneas apresentam baixos teores de STD, CE, Ca, Mg, K, Na, CO<sub>3</sub> e HCO<sub>3</sub>, mas possuem altos teores de ferro, que afetam 37% das amostras na primeira campanha e 30% na segunda.

Por outro lado, a presença desses teores de ferro na água subterrânea não se deve ao intemperismo, pois este não gera ferro solúvel e sim à dissolução do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> existente na laterita (39,34% em peso) pela água de infiltração oriunda da chuva, que possui pH ácido e conforme avaliação de Monteiro & Gioda (2011), variável de 3,9 a 5,9, com valor médio de 4,95 na região amazônica.

Isso ocorre porque a água da chuva rica em O<sub>2</sub>, em interação com o CO<sub>2</sub> da atmosfera adquire caráter ácido e em contato com o solo, onde a respiração das plantas pelas raízes e a oxidação da matéria orgânica (processos redox)

enriquecem o ambiente em CO<sub>2</sub>, diminuindo ainda mais o seu pH (Teixeira *et al.*, 2000).

## **3 – Geologia**

### 3.1 – Estrutura e Tectônica

A bacia do Marajó é constituída por um conjunto de blocos que incluem zonas profundas (fossas e grabens) e zonas rasas (horsts) que constituem as plataformas rasas, também chamadas ombreiras.

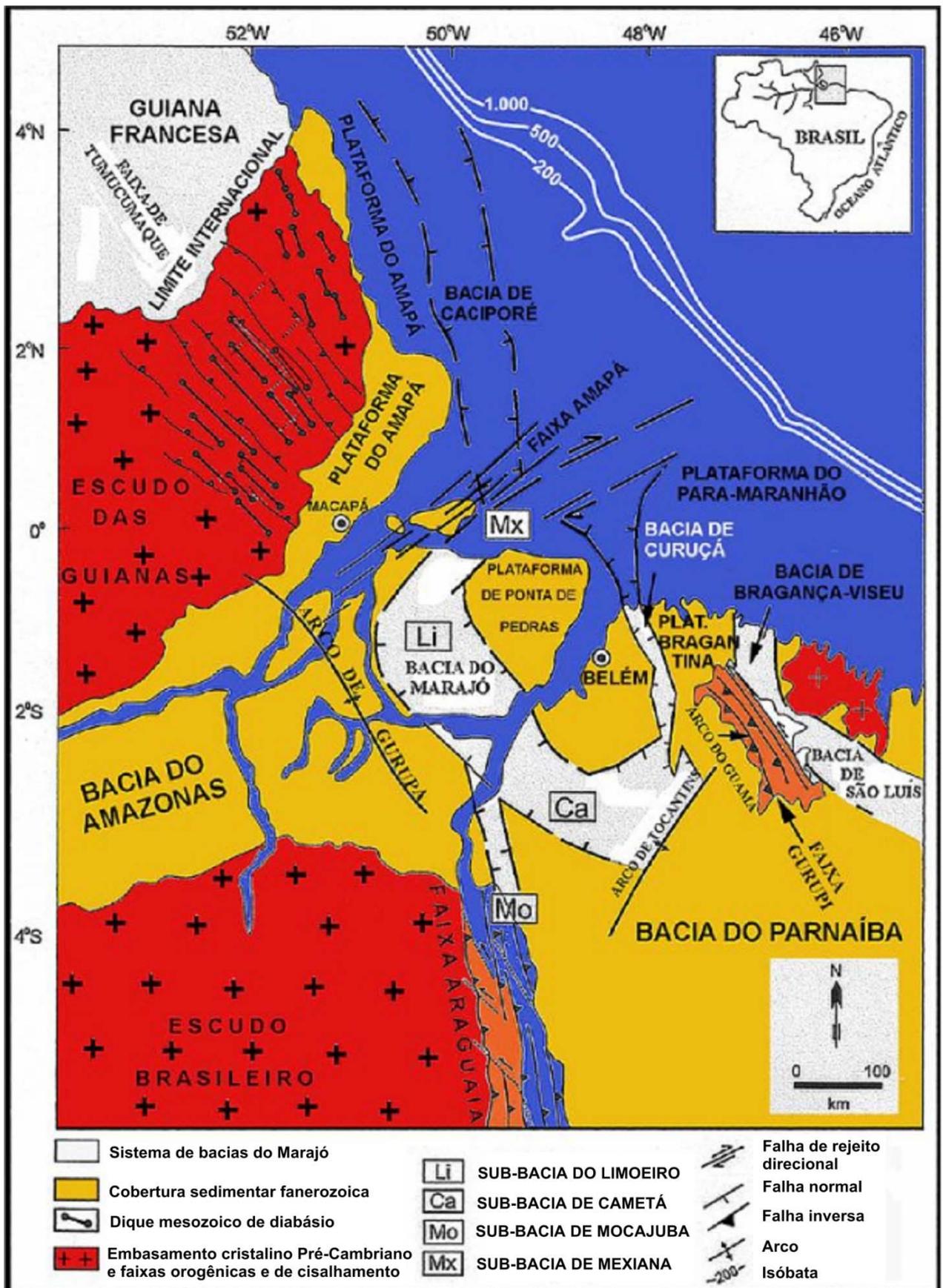
Nas zonas profundas da bacia do Marajó, segundo o relatório da geologia, são divisadas (**figura 3.1**), 4 (quatro) sub-bacias e duas principais plataformas:

- **Sub-bacia de Mexiana**, que se desenvolve numa estreita faixa de direção SW-NE, a noroeste da qual se encontra, na mesma direção, um pronunciado conjunto de falhamentos paralelos denominado *Faixa Amapá*, constituída de longos e estreitos blocos nos quais o embasamento cristalino progressivamente ascende e culmina, a NW, na estrutura rasa chamada *Plataforma do Amapá*, na qual se localiza a cidade de Macapá. A Sudeste desta sub-bacia, a ascensão do embasamento cristalino se processa de forma muito mais abrupta e culmina a SE, na estrutura rasa denominada *Plataforma de Ponta de Pedras*, na qual está localizada a cidade de Belém;
- **Sub-bacia do Limoeiro**, situada na porção NW do amplo graben central de direção NW-SE da bacia do Marajó, propriamente dita;
- **Sub-bacia de Cametá**, situada na porção SE do amplo graben central de direção NW-SE da bacia do Marajó;
- **Sub-bacia de Mocajuba**, representada por um estreito apêndice de direção SSE, do graben central da bacia do Marajó.

#### 3.1.1 - A Plataforma do Amapá

Na escala da folha de 15 minutos da região de Macapá, do ponto de vista geológico a cidade de Macapá situa-se no bloco estrutural denominado *Plataforma do Amapá*, que se encontra no setor noroeste da Bacia do Marajó, ou mais exatamente, da sub-bacia de Mexiana. Nessa plataforma não existem poços estratigráficos profundos e datações dos sedimentos e por esta razão a sequência sedimentar e a espessura do pacote nela depositado, que se encontra recoberto por sedimentos cenozoicos são desconhecidas. De fato, sabe-se, conforme relatório da geologia da PHA, que nas plataformas rasas da bacia do Marajó predominam sedimentos cenozoicos. Sabe-se ainda que “a sedimentação pós-rifte iniciou na Sub-bacia de Mexiana, continuando para sul até a Sub-bacia de Cametá (Galvão, 2004). A partir daí a sedimentação começou a avançar também em direção às plataformas e arcos, amplificando as dimensões da bacia (Zalán & Matsuda, 2007)”.

Durante essa fase, que Soares Junior *et al.* (2013) denominam “Bacia de Pirabas”, a sedimentação (no Neógeno-Quaternário) incluiu deposições em ambiente marinho raso (parte da Formação Pirabas de idade neo-oligocênica-eomiocênica), deposições em ambiente transicional (Formação Barreiras neomiocênica) e, por fim, em discordância, depósitos quaternários de ambientes fluvial e transicional. Considerando que esta sedimentação recente se estende sobre as áreas da Bacia do Marajó e suas plataformas (ombreiras), a denominação de “Bacia de Pirabas”, soa inapropriada, notadamente porque a Formação Pirabas inicia sua sedimentação no Paleógeno.



**Figura 3.1** - Localização e principais feições tectônicas da Bacia do Marajó. Modificado de Costa *et al.* (2002).

Também, em trabalho mais recente, Zalán & Matsuda (2007) discutem a litoestratigrafia e a estrutura da bacia do Marajó, mostrando que nas sequências sedimentares mais superiores de origem continental ocorrem depósitos Quaternários da Formação Tucunaré e sedimentos cenozoicos da Formação Marajó, esta sendo equivalente, em parte, às Formações Barreiras e Pirabas (**tabela 3.1**).

A presença da Formação Barreiras em Macapá, como o aquífero livre local, é também admitida por diversos autores, em estudos geológicos (Lima *et al.*, 1991) e em estudos geofísicos por eletrorresistividade (Oliveira *et al.*, 2004).

Segundo o extrato do mapa geológico ao milionésimo da CPRM (Faraco *et al.*, 2004) apresentado na **figura 3.2** afloram na região de Macapá: ao norte da Plataforma do Amapá, o embasamento cristalino e ao sul, sedimentos recentes constituídos de aluviões fluviais, flúvio-marinhos e lagunares, componentes da grande planície do baixo Amazonas. Na Plataforma propriamente dita afloram sedimentos da Formação Barreiras.

Como se vê, ainda persistem divergências entre alguns autores sobre a geologia de Macapá e há necessidade de avançar no conhecimento. Considerando que a litoestratigrafia do Cenozoico, adotada no âmbito do Projeto ANA-PHA, descrita no relatório da Geologia (volume II) é também consistente com a de Rossetti & Valeriano (2007), estabelecida para a região do baixo Amazonas e que será usada como base para a hidrogeologia da região de Macapá, como descrito a seguir.

### **3.2 - Litoestratigrafia**

Estudos extensivos de campo combinados com análise de mapas geológicos disponíveis revelam que os depósitos pós-Barreiras de idade Pleistocênica e possivelmente também Plio-Pleistocênica, ocorrem na ilha de Marajó (Rossetti & Valeriano, 2007) e na plataforma do Amapá. A Formação Tucunaré corresponde aos sedimentos plio-pleistocênicos flúvio-marinhos e aluviões recentes. Os depósitos holocênicos e aluviões modernas são sazonalmente inundados na região de Macapá (Rossetti & Valeriano, 2007).

A litoestratigrafia do Cenozoico na vizinha região da Ilha de Marajó, mostrada na **tabela 3.1**, revela que a Formação Marajó (eocênica-eomiocênica) ocorre em subsuperfície e corresponde em superfície à Formação Pirabas na Plataforma Bragantina. A Formação Barreiras ocorre em subsuperfície e também em superfície na Plataforma Bragantina. A Formação Tucunaré ocorre em subsuperfície e corresponde em superfície aos sedimentos pós-Barreiras, que na Plataforma do Amapá considera-se estar em repouso discordantemente sobre o embasamento cristalino.

Na região, ocorre a junção da geologia da Bacia do Amazonas com a da Bacia do Marajó. A Formação Alter do Chão da Bacia do Amazonas, antes considerada de idade cretácea, atualmente é datada como cenozoica (Eoceno-Mesomioceno), conforme relatório da Geologia (volume II). Portanto, as formações Marajó e Barreiras (Eoceno-Eomioceno e Eomioceno-Mesomioceno), em termos de idade, são em parte equivalentes e também contidas na Formação Alter do Chão.

**Tabela 3.1** – Litoestratigrafia do Cenozoico estabelecida na vizinha Ilha de Marajó (Rossetti & Valeriano, 2007).

Idade		Litoestratigrafia	
		Subsuperfície	Superfície
CENOZOICO	Quaternário Discordância	Formação Tucunaré Discordância	Sedimentos Pós-Barreiras Discordância
	Terciário	Formação Barreiras Formação Marajó	Formação Barreiras Formação Pirabas
			-

Segundo o relatório da Geologia - Volume II, na Plataforma de Macapá somente ocorrem sedimentos Quaternários e as águas subterrâneas livres da região de Macapá podem ser caracterizadas como pertencentes ao **aquífero Tucunaré**, com espessura máxima de aproximadamente 300 m, no qual se incluem os sedimentos flúvio-marinhas.

### 3.2.1 – Formação Tucunaré

A litologia dos depósitos da Formação Tucunaré, dentro da folha de 15 minutos da área de estudo é constituída de materiais areno-argilosos, arenosos e conglomeráticos distribuídos pelos municípios de Macapá e Santana. As exposições desses depósitos estão presentes em afloramentos naturais e em cortes de estradas das rodovias BR-156, BR-210, AP-070 e AP-020 bem como nas falésias ativas e inativas existentes na orla das cidades de Macapá e Santana e ainda nas margens das drenagens que cortam a região (Santos *et al.*, 2004).

Os levantamentos de campo permitiram caracterizar a ocorrência de 3 (três) unidades distintas: sedimentos argilo-arenosos na base, areno-argilosos e materiais arenosos e conglomeráticos, reconhecidos como quaternários e atribuídos no relatório da Geologia (volume II) à Formação Tucunaré:

- **Materiais argilo-arenosos:** se fazem presentes no domínio do tabuleiro costeiro em cotas de 20 a 40 m. São friáveis, de coloração amarelo-avermelhada e cinza-esbranquiçada, apresentando concreções lateríticas nas proximidades do topo, em contato gradacional ou brusco através de níveis de *stone-line* (Santos *et al.*, 2004).
- **Materiais areno-argilosos:** são inconsolidados, de coloração amarelo-avermelhada, contendo lentes e níveis de cascalhos muito grosseiros com seixos de dimensão centímetrica formando conglomerados. Concreções lateríticas ocorrem no contato entre as porções mais argilosas e mais arenosas.

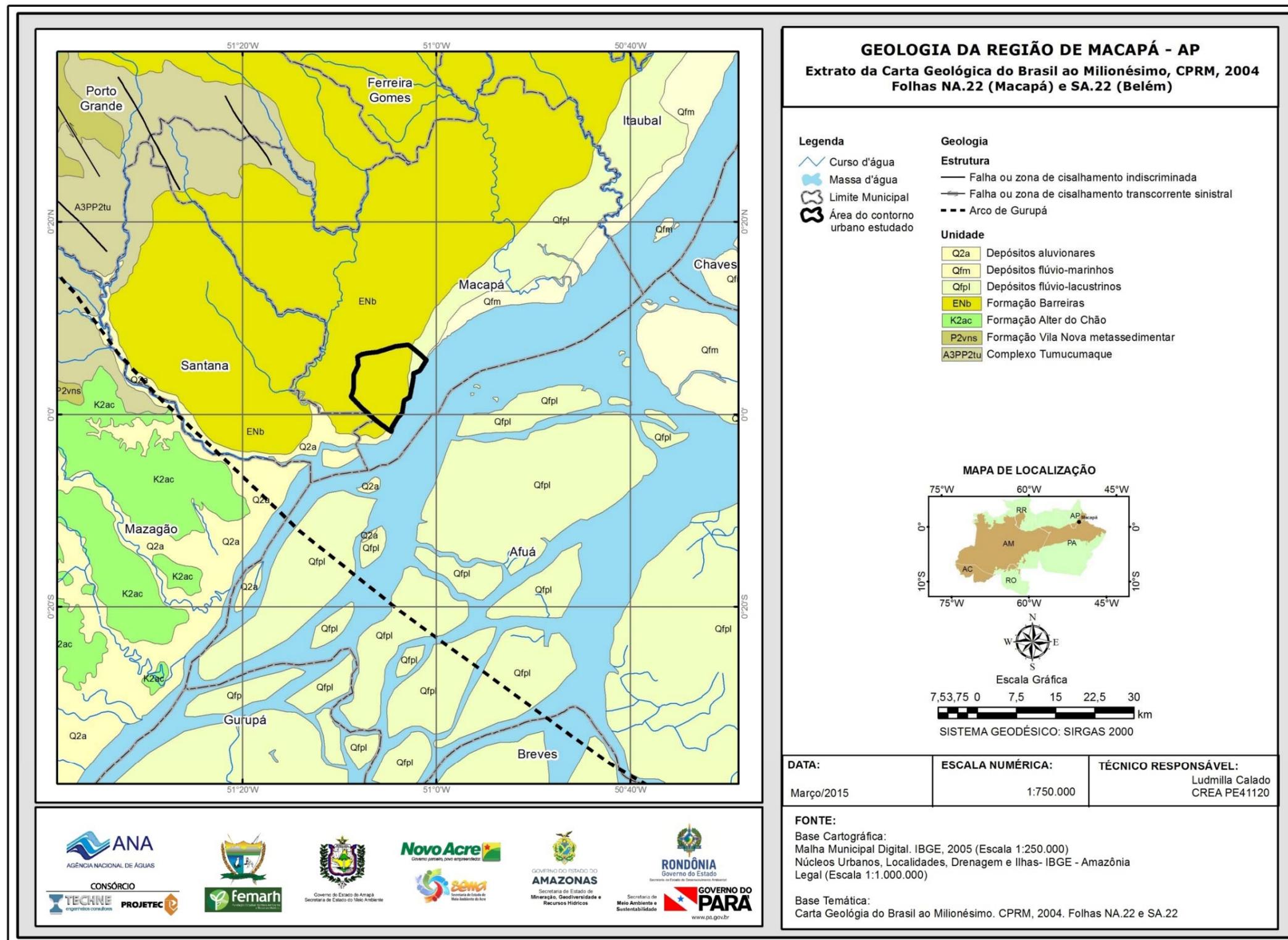


Figura 3.2 – Mapa geológico da região de Macapá. Extraído da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo CPRM Folhas NA.22 Macapá e SA.22 Belém.

- **Materiais arenosos e conglomeráticos:** são constituídos de seixos de tamanhos variados, dispersos numa matriz arenosa de coloração esbranquiçada.

Em profundidade, a litologia dominante em 3 (três) poços da CAESA, com profundidades de 150 m e 160 m, com vazões de 90 a 108 m<sup>3</sup>/h, é mostrada na **tabela 3.2** e também ilustrada nos respectivos perfis litológicos e construtivos apresentados na **figura 3.3**.

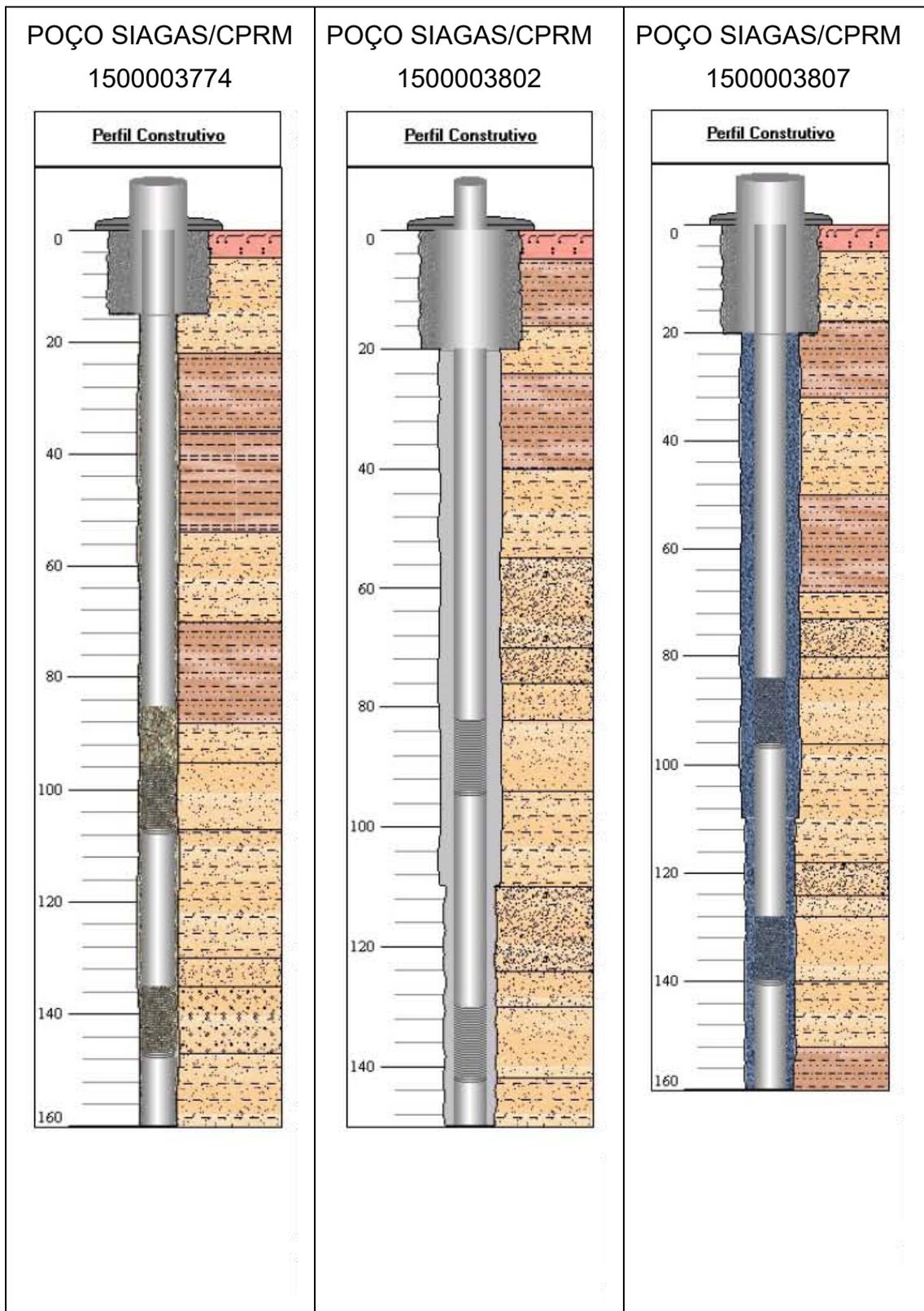
**Tabela 3.2** - Litologia dos poços tubulares com profundidades de 150 m a 160 m perfurados na Formação Tucunaré na cidade de Macapá – AP.

Poço SIAGAS/CPRM	UTM_E	UTM_N	Profundidade (m)	Intervalo (m)	Litologia
1500003774	487513	9994811	160	0 - 22	Areia argilosa
				22 - 54	Argila e Argila arenosa
				54 - 70	Areia argilosa
				70 - 88	Argila arenosa
				88 - 160	Areias: argilosa, fina, média e grossa
1500003802	487482	10005189	150	0 - 16	Solo laterítico e Argila arenosa
				16 - 24	Areia argilosa
				24 - 40	Argila arenosa
				40 - 150	Areias: argilosa, fina, média e grossa
1500003808	490974	10001965	160	0 - 28	Solo arenoso, argila arenosa e areia argilosa
				28 - 160	Areias: argilosa, fina, média e grossa; raras intercalações argilosas

### 3.2.2 - Depósitos Aluviais e Flúvio-Marinhas

Ocorrem nas zonas mais baixas da região de Macapá e são de origem fluvial, flúvio-estuarina e flúvio-marinha. Não há diferença significativa entre a sua natureza litológica ou composição granulométrica, porém a sua morfologia permite verificar que pertencem a períodos distintos ao longo da história da formação da planície do baixo Amazonas (Santos *et al.*, 2004). Nesse contexto são caracterizados os seguintes tipos de depósitos quaternários:

- **Depósitos Aluviais:** ocorrem nas zonas mais próximas das cabeceiras das planícies de inundação do sistema de igarapés da Fortaleza, não sofrendo diretamente inundações por influência das marés, mas apenas inundações pluviais nos períodos chuvosos;
- **Depósitos de Planícies Fluviais Antigas:** estão associados e recobrem as aluviões em cotas de 2 a 5 m. São argilosos, com laminação plano paralela, cores variáveis de cinza-escura na base, a cinza-clara, no topo, quando capeados por lama com matéria orgânica oriunda de restos vegetais;
- **Depósitos de Planícies Flúvio-Estuarinas:** constituem o que se denomina de várzeas e afloram ao longo das margens do rio Amazonas, onde podem atingir largura de 1 a 2 km.



**Figura 3.3** – Perfis litológicos e construtivos de 3 (três) poços tubulares com profundidades de 160 m, 150 m e 160 m, respectivamente, perfurados na área de estudo na Formação Tucunaré.

De modo geral todas essas zonas baixas de planícies interiores ocupadas por depósitos aluviais e flúvio-marinhos são conhecidas localmente como zonas de ressacas ou até mesmo simplesmente como **ressacas**. Os depósitos de planície localizados nas proximidades do rio Amazonas, são interpretados como **várzeas**, “pois embora possam assemelhar-se aos **sistemas de ressacas**”, segundo Takiyama & Silva (2003) “a dinâmica de inundação e o tipo de solo permitem que sejam distinguidas das **ressacas**”.

Não obstante, do ponto de vista litoestratigráfico, todos esses depósitos quaternários no sistema de igarapés da Fortaleza, conforme revelam resultados de análises granulométricas realizadas por Torres & Oliveira (2003) são constituídos de silte, silte arenoso até areia média a fina, com presença de matéria orgânica e por este motivo são interpretados no mapa geológico da região de Macapá, elaborado a partir de imagens SRTM TOPODATA (**figura 3.4**), como depósitos aluviais indiferenciados de planície de inundação (Qa).

Por definição, ressacas são marés de amplitude superior à normal. Portanto, as ressacas constituem um fenômeno natural que, a rigor, não tem nada a ver com depósitos aluviais e nem tão pouco com planícies de inundação. Pelo menos em artigos científicos é recomendável que se faça a devida distinção entre o que é “maré anormal ou ressaca”; “planície de inundação” e “depósito aluvial”, para evitar confusão entre termos já perfeitamente consagrados na oceanografia, na geomorfologia e na geologia.

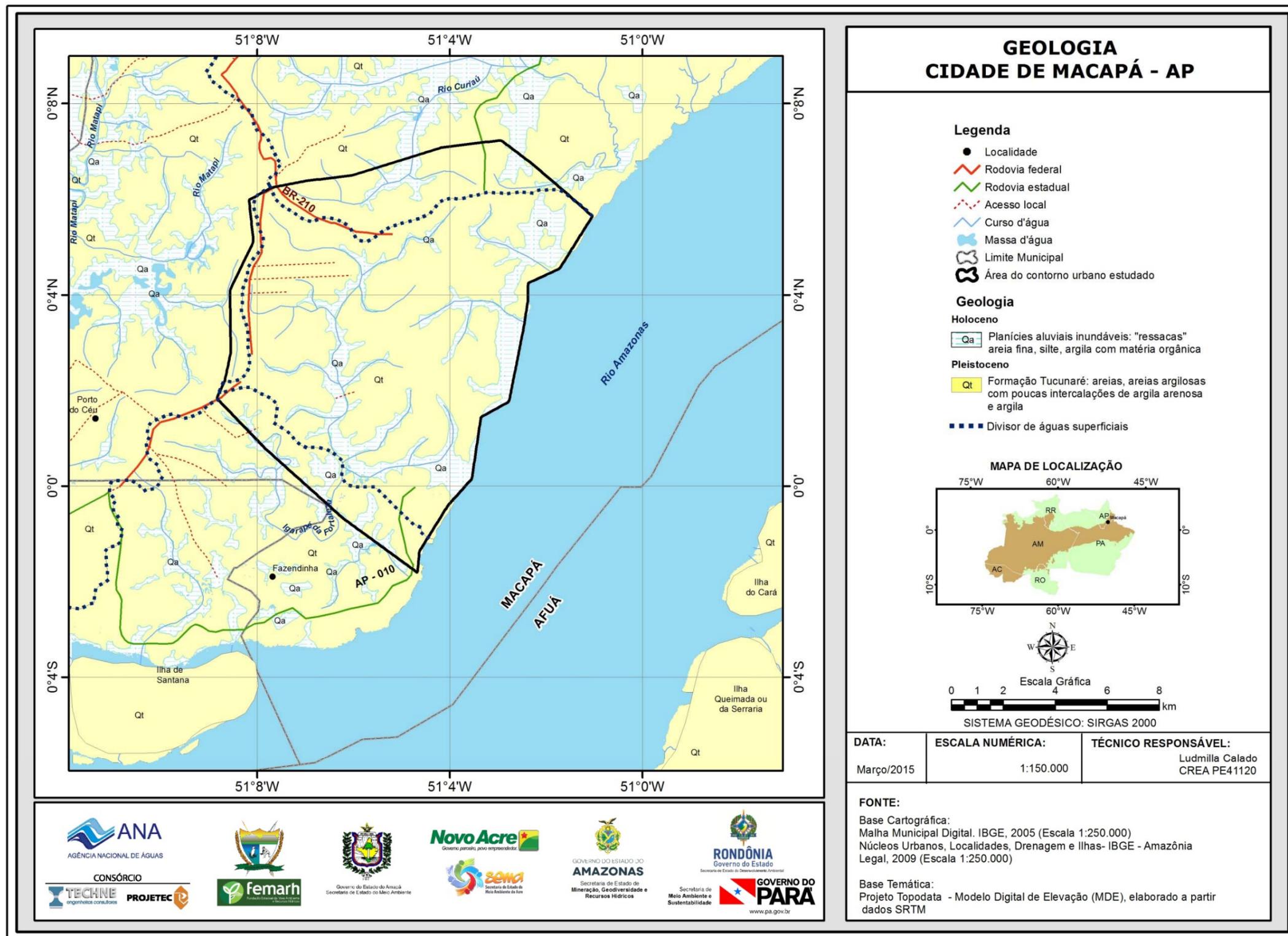


Figura 3.4 – Mapa geológico da folha de 15 minutos e da área de estudo na cidade de Macapá – AP.

## **4 – Hidrogeologia e Hidrodinâmica**

## 4.1 – Aquífero Tucunaré

Na cidade de Macapá admite-se com base no conhecimento geológico descrito no **capítulo 3**, que o aquífero local é formado pelos depósitos pleistocênicos da Formação Tucunaré e pelos aluviões holocênicos das planícies aluviais inundáveis. Esse aquífero, supostamente repousa sobre o embasamento cristalino na Plataforma do Amapá.

### 4.1.1 – Litologia, Dimensões e Limites

De acordo com os perfis litológicos dos poços catalogados no SIAGAS (CPRM, 2010) apresentados no **anexo 7.2.2**, essa formação é constituída, sobretudo, de sedimentos arenosos com intercalações de areias argilosas, argilas arenosas e ainda lentes de argila.

Em termos de dimensões e limites o aquífero Tucunaré ocupa dentro da área de 109 km<sup>2</sup> selecionada para o balanço hidrogeológico no setor norte da bacia hidrográfica do sistema de igarapés da Fortaleza, uma superfície aflorante de 86 km<sup>2</sup>, sendo os 23 km<sup>2</sup> restantes ocupados pelas planícies aluviais de inundação do rio Amazonas.

De acordo com o mapa geológico da folha Macapá NA-22-Y-D na escala 1:250.000 da CPRM (Barbosa *et al.*, 2013), a cobertura sedimentar pleistocênica indiferenciada mapeada na região de Macapá, sobre a Plataforma do Amapá, definida no relatório da Geologia (volume II) como Formação Tucunaré, se acha em contato lateral com o embasamento cristalino. Embora não haja uma certeza absoluta por falta de poços estratigráficos profundos na Plataforma do Amapá, esta circunstância sugere que estes sedimentos provavelmente repousam sobre o cristalino. Os poços mais profundos existentes em exploração, com profundidades de 160 m, não alcançam a base do aquífero, ou seja, são poços parcialmente penetrantes.

O modelo litoestratigráfico do aquífero Tucunaré em Macapá é ilustrado através de um diagrama de cerca (**figura 4.1**) e de um bloco 3D (**figura 4.2**). A elaboração desse modelo teve como base as informações disponíveis de 11 (onze) poços catalogados da CPRM/SIAGAS com perfis litológicos conhecidos (**anexo 7.2.2**). Para cobrir da forma mais regular possível a área de interesse (109 km<sup>2</sup>) foram utilizados 16 pontos distribuídos em 5 (cinco) perfis transversais. Assim, além dos 11 poços com perfis conhecidos foram incluídos mais 5 (cinco) pontos, nos quais a litologia foi inferida de poços mais próximos. Dois desses pontos com perfil inferido são os poços testados Caesa 1 e Caesa 2 (de profundidades conhecidas) e os três restantes são pontos localizados na na seção situada no extremo nordeste da área, denominados ID14, ID15 e ID16 (**figura 4.1**). Dessa forma, tem-se um modelo litoestratigráfico que ilustra a geometria do aquífero Tucunaré considerando como limite inferior a profundidade de penetração dos poços até 160 m e com espessura saturada de 150 m.

O volume total do bloco 3D para a espessura de 150 m do aquífero Tucunaré na área de 109 km<sup>2</sup> é de 16,34E09 m<sup>3</sup>. A litologia, por sua vez é composta de areia argilosa (37,1%), areia (37,7%), argila (1,2%) e argila arenosa (24%), o que revela um predomínio absoluto de materiais arenosos com um percentual muito baixo de argila.

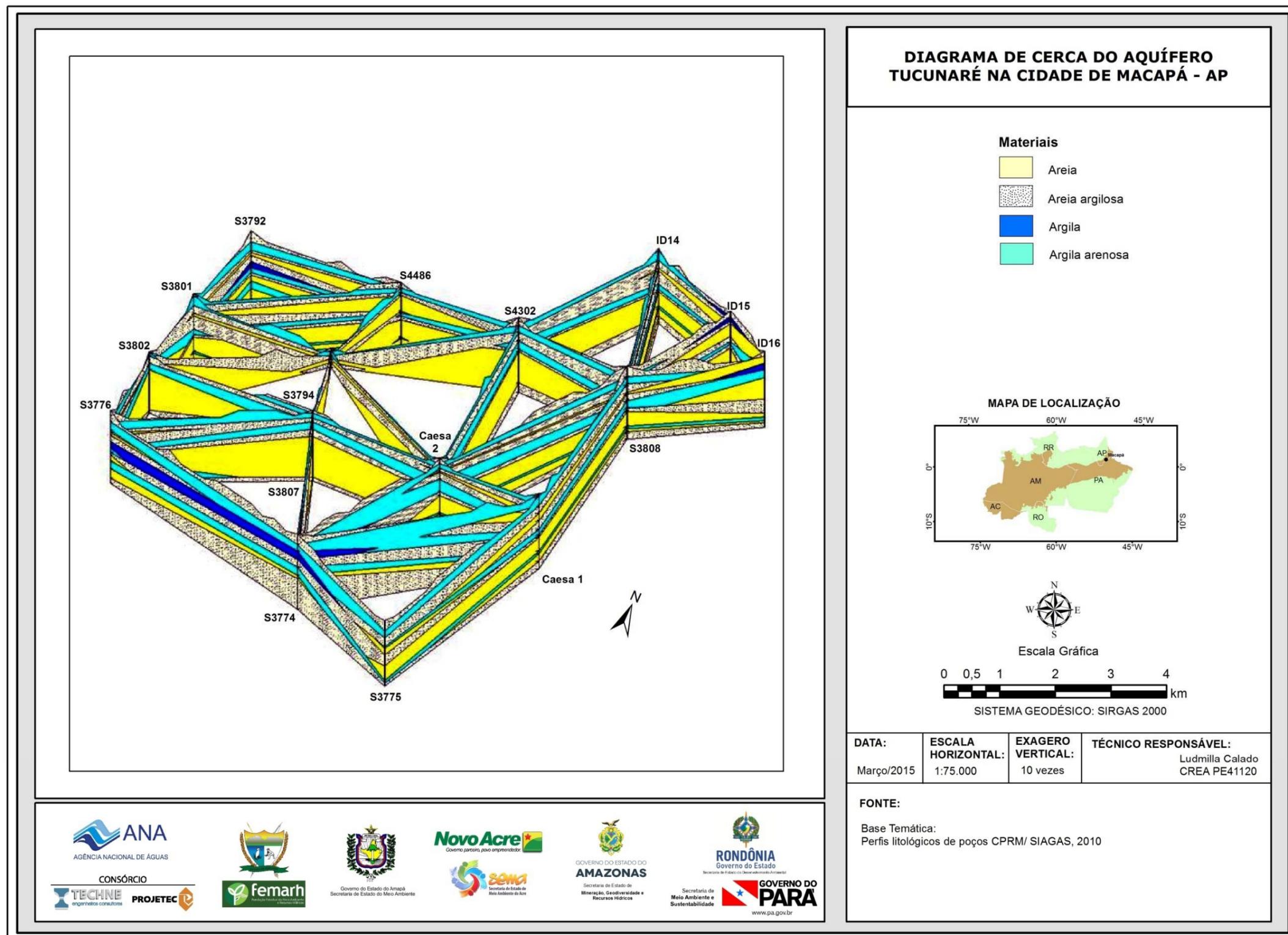


Figura 4.1 – Diagrama de cerca do aquífero Tucunaré na área de estudo na cidade de Macapá – AP.

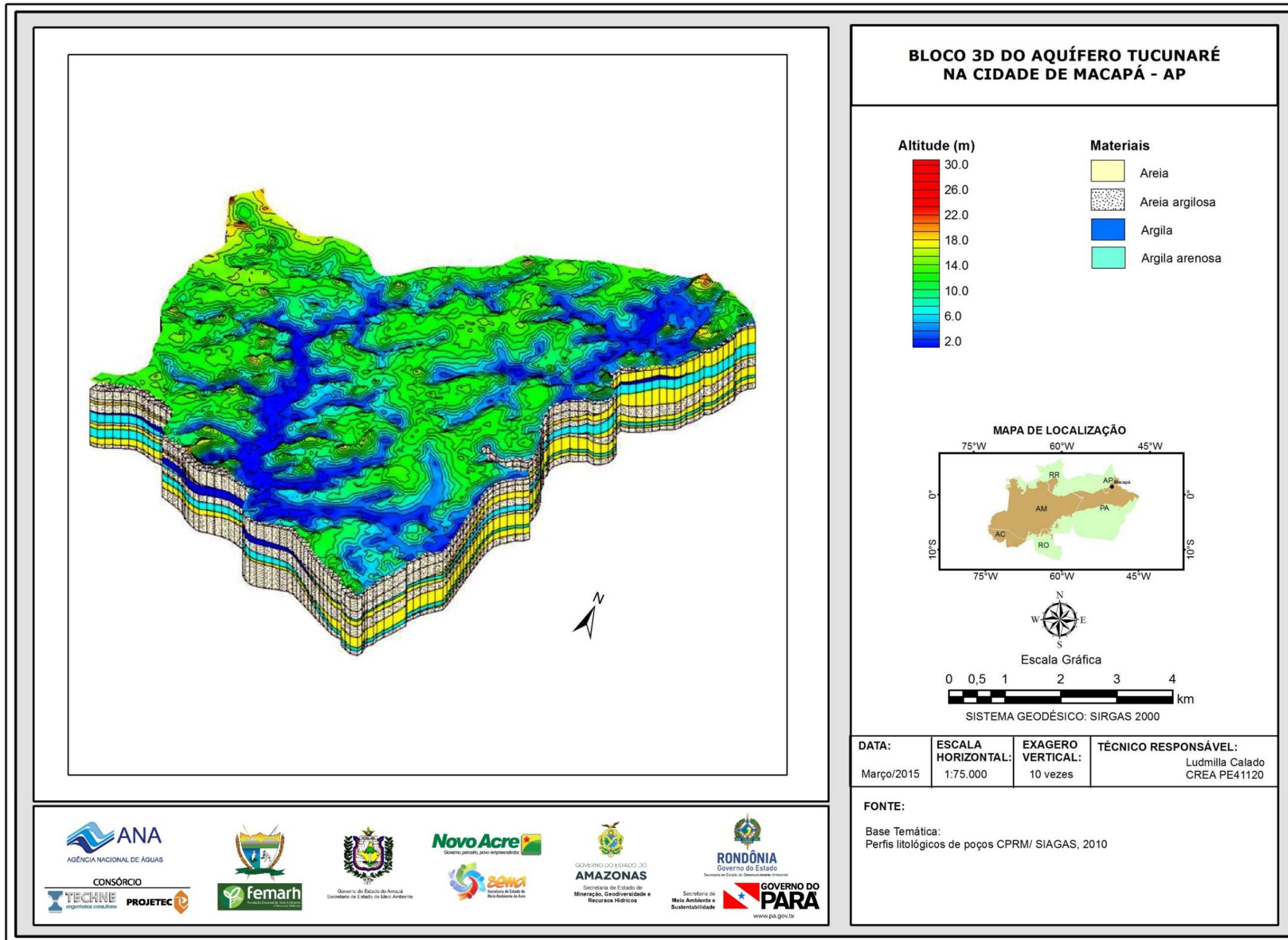


Figura 4.2 – Bloco 3D do modelo litoestratigráfico do aquífero Tucunaré parcialmente penetrado até 160 m de profundidade na área de estudo na cidade de Macapá – AP.

#### 4.1.2 – Propriedades Hidráulicas

As propriedades hidráulicas do aquífero Tucunaré foram avaliadas através de testes de bombeamento conduzidos no âmbito do Projeto ANA-PHA e ainda através de valores compilados de estudos anteriores realizados em Macapá, referidos nos texto.

##### **Considerações sobre a Condutividade Hidráulica dos Aquíferos**

Para auxiliar na compreensão do significado dos valores de condutividade hidráulica determinados nos testes de aquífero realizados em Macapá e também dos valores conhecidos da literatura e apresentados neste relatório, a **tabela 4.1** (Fetter, 1994) indica a natureza litológica dos materiais geológicos esperados, de acordo com a magnitude dos valores desse parâmetro.

**Tabela 4.1** – Faixa de valores de condutividade hidráulica em depósitos inconsolidados de natureza análoga à do Aquífero Tucunaré em m/s e m/dia (Adaptado de Fetter, 1994).

Depósitos Inconsolidados	Condutividade Hidráulica	
	m/s	m/dia
Cascalho	$10^{-4}$ a $10^{-2}$	$8,6 \times 10^0$ a $8,6 \times 10^2$
Areias bem selecionadas	$10^{-5}$ a $10^{-3}$	$8,6 \times 10^{-1}$ a $8,6 \times 10^1$
Areias siltosas, areias finas	$10^{-7}$ a $10^{-5}$	$8,6 \times 10^{-3}$ a $8,6 \times 10^{-1}$
Siltos, areias siltosas, areias argilosas	$10^{-8}$ a $10^{-6}$	$8,6 \times 10^{-4}$ a $8,6 \times 10^{-2}$
Argilas	$10^{-11}$ a $10^{-8}$	$8,6 \times 10^{-7}$ a $8,6 \times 10^{-4}$

##### 4.1.2.1 - Execução de Testes de Bombeamento

A realização de testes de bombeamento ou mais adequadamente denominados de testes de aquífero, tem por objetivo fundamental a obtenção dos valores dos coeficientes de transmissividade, de condutividade hidráulica e de armazenamento, parâmetros hidrodinâmicos de fundamental importância para posterior avaliação das reservas hídricas acumuladas no aquífero.

Esses testes devem ser realizados por pessoal técnico que possua amplo conhecimento hidrogeológico, pois de um teste bem executado podem resultar valores confiáveis na sua interpretação, uma vez que durante a realização do trabalho de campo é comum ocorrer problemas que o leigo não tem condições de resolver a contento.

Foi com esse espírito e essa preocupação que os testes de aquífero na região amazônica, objeto do presente trabalho, foram executados no campo por toda a equipe técnica sênior alocada ao projeto, visando obter os melhores resultados possíveis.

Os testes de bombeamento, numa classificação mais ampla, podem ser divididos em: testes de aquífero e testes de produção.

Os testes de aquífero consistem no bombeamento de um poço com uma vazão constante (ou estabilizada ao longo do teste) e, sempre que possível, no acompanhamento da evolução dos rebaixamentos produzidos em um ou mais poços de observação. Quando inexitem poços de observação ou piezômetros, o coeficiente de armazenamento pode ser avaliado de forma aproximada supondo que o raio do poço é infinitamente pequeno. Com essa hipótese o armazenamento no poço se torna desprezível e o armazenamento do aquífero

pode ser estimado a 1 m de distância, ou seja, nas proximidades imediatas do poço para permitir o uso dos dados do poço bombeado como se fossem de um poço de observação a essa distância.

No caso específico do estudo executado em Macapá, 2 (dois) testes de bombeamento foram realizados no aquífero Tucunaré (**anexo 7.1**), usando os poços CAESA 1 e CAESA 2 (**figura 4.3 e tabela 4.2**) sem utilização de poços de observação. A escolha desses poços foi feita por se tratarem de poços profundos (158 e 160 m, respectivamente) e estarem devidamente equipados, em boas condições para teste. As medidas de nível dinâmico foram executadas com uma sonda elétrica sonora e a medição de vazão através de método volumétrico.

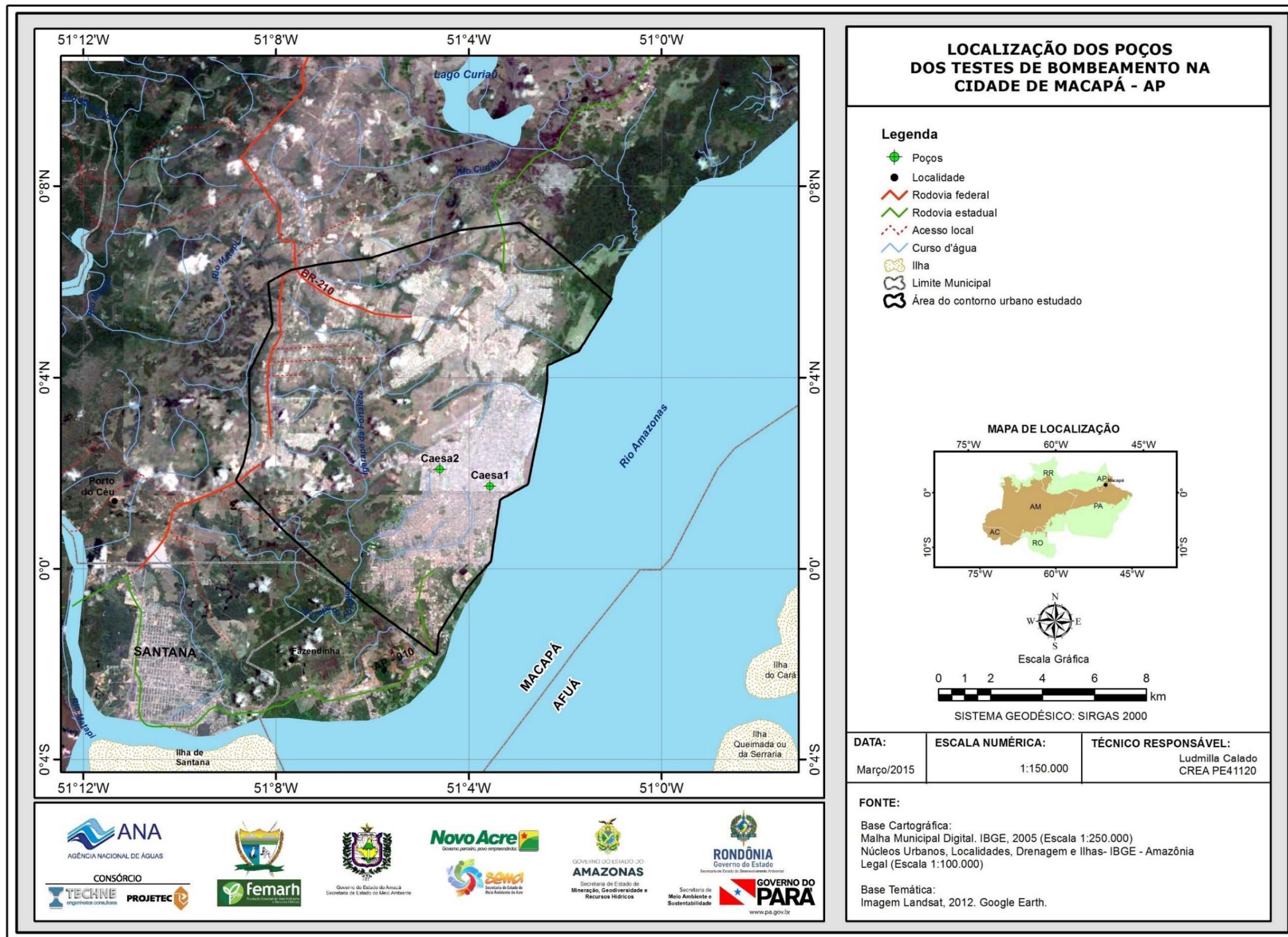


Figura 4.3 – Localização dos poços Caesa 1 e Caesa 2 utilizados nos testes de bombeamento realizados no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá – AP.

**Tabela 4.2** – Características dos poços da CAESA utilizados nos testes de bombeamento realizados na cidade de Macapá – AP.

Poço	UTM (E)	UTM (N)	Profundidade (m)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão (m³/h)
CAESA 1	493399	3165	160	11,44	20,92	75
CAESA 2	491464	3813	158	13,26	22,54	240

#### 4.1.2.2 – Interpretação dos Testes de Bombeamento

Dois métodos foram utilizados na interpretação dos testes de bombeamento realizados no âmbito do Projeto ANA PHA na cidade de Macapá:

- O primeiro foi o semilogarítmico de Cooper & Jacob (1946), previsto para aquífero confinado, homogêneo e isotrópico.
- O segundo foi o método de Neuman (1975) para aquífero livre, homogêneo e anisotrópico. Isto porque, o aquífero Tucunaré apresenta comportamento de aquífero livre que torna necessária a avaliação dos seus parâmetros hidráulicos por um método que permita avaliar com maior segurança, mesmo de forma aproximada, a porosidade efetiva.

#### **Método Semilogarítmico de Cooper & Jacob (1946)**

Como os testes de bombeamento foram essencialmente de produção, conforme especificado nos TDRs, o procedimento preferencial de análise empregado foi o método aproximativo de Jacob (forma aproximada da **equação 4.1** de Theis), segundo Manoel Filho (2007), que o aplicou no *software Grapher*. No presente trabalho, o referido método é a seguir descrito, e a sua aplicação feita através de planilha *Excel*.

<p>Equação do rebaixamento: <math>s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)</math> sendo <math>u = \frac{r^2 S}{4Tt}</math> (4.1)</p> <p>Parâmetros:</p> $T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) \quad (4.1a)$ $S = \frac{4Ttu}{r^2} \quad (4.1b)$
---

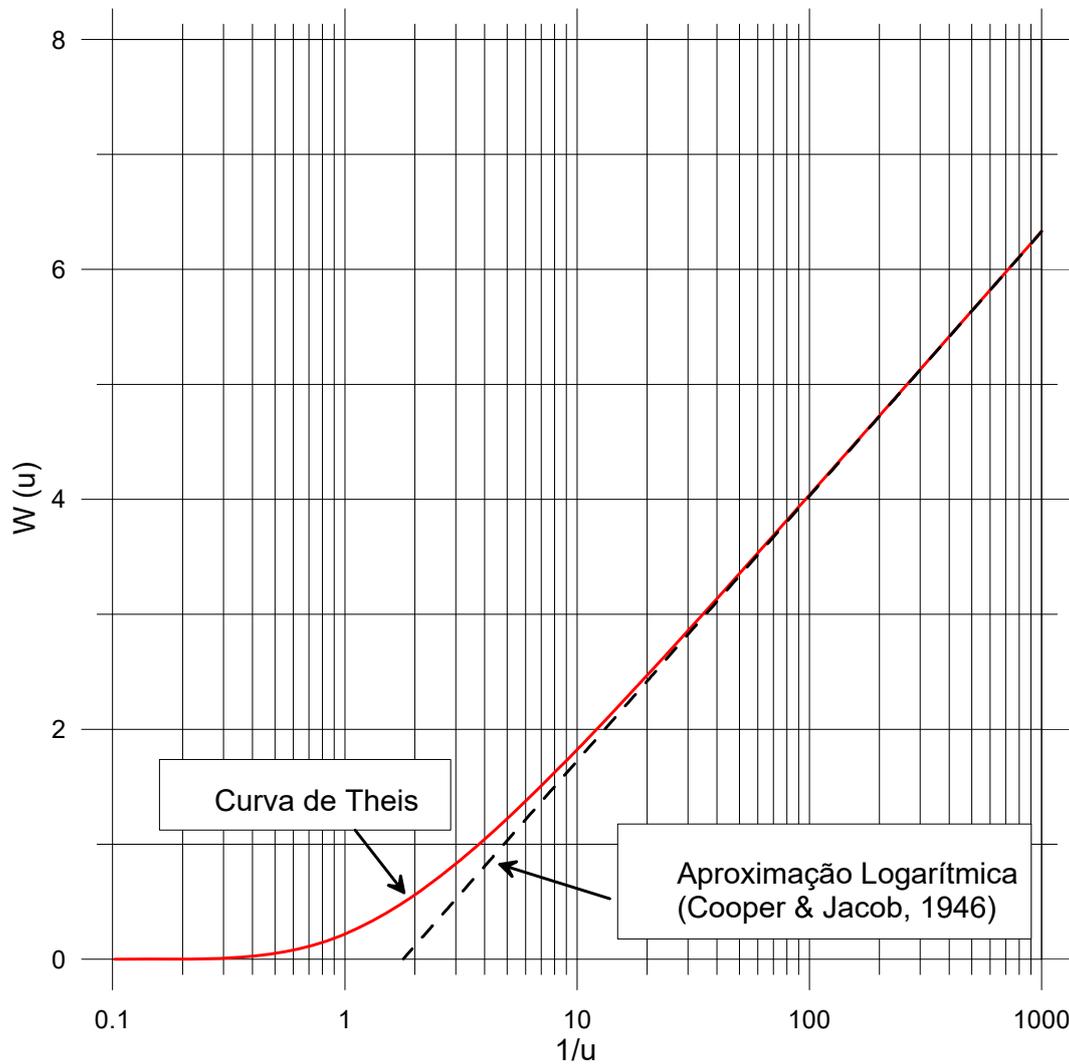
Cooper & Jacob (1946) mostraram que para valores de  $u < 0,01$  ou  $1/u > 100$ , a função do poço  $W(u) \cong -0,5772 - \ln u$ . Esta é a chamada aproximação logarítmica da função de Theis, ilustrada na **figura 4.4**.

Substituindo a aproximação logarítmica na **equação (4.1)** obtém-se a **equação (4.2)** de Jacob.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{2,25Tt}{r^2 S}\right) \quad (4.2)$$

Essa equação pode ser escrita sob a forma:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln(t) + \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{2,25T}{r^2 S}\right) \quad (4.3)$$



**Figura 4.4** – Ilustração gráfica da aproximação logarítmica da função  $W(u)$  (Cooper & Jacob, 1946).

ou ainda sob a forma mais simples:

$$s = M \ln(t) + N \quad (4.4)$$

A declividade da reta logarítmica decimal (**equações 4.2 e 4.3**) é dada por:

$$M = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s_2 - s_1}{\ln t_2 - \ln t_1} = \frac{Q}{4\pi T} \quad (4.5)$$

Comparando então as **equações (4.3) e (4.4)**, tem-se:

$$M = \frac{Q}{4\pi T} \quad ; \quad N = \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{2,25T}{r^2 S}\right) \quad (4.6)$$

Por outro lado, a **equação (4.2)** permite verificar que o rebaixamento  $s = 0$  ocorre em um instante  $t_0$  tal que:

$$\frac{2,25Tt_0}{r^2 S} = 1 \quad \text{e portanto,} \quad S = \frac{2,25Tt_0}{r^2} \quad (4.7)$$

Como os valores dos parâmetros  $M \left[ \frac{m}{\text{min}} \right]$  e  $N [m]$  são obtidos automaticamente no ajuste feito no computador, o valor de  $t_0$  pode ser deduzido da **equação (4.3)**, expressa sob a forma:

$$0 = M \ln t_0 + N \quad \Rightarrow \quad M \ln t_0 = -N \quad \Rightarrow \quad t_0 = \exp\left(-\frac{N}{M}\right)$$

(4.8)

Esses resultados conduzem finalmente às seguintes equações e parâmetros:

$$\text{Equação do rebaixamento:} \quad s(t) = M \ln(t) + N \quad (4.9)$$

$$\text{Parâmetros:} \quad M = \left[ \frac{\Delta s}{2,303 \log(\Delta t)} \right] \quad \Rightarrow \quad \Delta s = 2,303M$$

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta s} \quad (4.10)$$

$$S = \frac{2,25 T \times 60 \times \exp\left(-\frac{N}{M}\right)}{r^2} \quad (4.11)$$

Nas **equações 4.1, 4.1a e 4.1b**, bem como nas **equações 4.2 a 4.11**, os significados dos símbolos utilizados são os seguintes:

- ✓  $s = s(r, t)$  = rebaixamento no ponto situado à distância  $r$ , do poço de bombeamento, no instante  $t$  após o início do bombeamento [ L ];
- ✓  $Q$  = vazão bombeada do poço [ L<sup>3</sup>/T ];
- ✓  $T$  = coeficiente de transmissividade do aquífero [ L<sup>2</sup>/T ];
- ✓  $S$  = coeficiente de armazenamento do aquífero [ ];
- ✓  $W(u)$  = função do poço para aquífero confinado ou função de Theis;
- ✓  $u$  = argumento da função do poço;
- ✓  $M$  = coeficiente angular ou declividade da reta logarítmica decimal (**equação 4.4**);
- ✓  $N$  = coeficiente linear ou ordenada na origem da reta logarítmica decimal (**equação 4.4**);

- ✓  $\Delta s = s_2 - s_1$  = variação do rebaixamento entre dois instantes, no intervalo de tempo  $\Delta t = t_2 - t_1$ ;
- ✓  $t_0$  = tempo medido sobre o eixo das abscissas no ponto de rebaixamento  $s = 0$ .

### **Metodologia de execução**

Construir um gráfico monolog de rebaixamento versus tempo e nele efetuar um ajuste logarítmico, para obter a reta  $s = M \ln(t) + N$  (**equação 4.9**).

Calcular os parâmetros do aquífero, usando as **equações (4.10) e (4.11)**.

Em Macapá os testes foram realizados sem poço de observação e, portanto, o procedimento é aplicável ao poço bombeado supondo que o raio do mesmo é desprezível e calculando o coeficiente de armazenamento a uma distância  $r = 1$  m (na ausência de perdas singulares e desde que os resultados obtidos se mantenham dentro das ordens de grandeza esperadas para o tipo de aquífero analisado).

No **anexo 7.1** são encontradas, para cada teste, as planilhas de dados de rebaixamento e recuperação, os gráficos e os parâmetros hidráulicos obtidos.

### **Método de Neuman (1975)**

No caso de Macapá os testes realizados nos dois poços profundos da CAESA, os quais se encontram em exploração há muito tempo com vazões elevadas, o aquífero já se apresenta bastante descomprimido e por esse motivo as curvas dilog de rebaixamento x tempo não mostram o efeito da água liberada do confinamento (falta o trecho da curva Padrão Tipo A), ou seja, já no primeiro minuto (no CAESA 1) o rebaixamento transiente evolui sobre a curva padrão Tipo B (**figura 4.5a**) o mesmo acontecendo no poço CAESA-2 a partir de 2 minutos (**figura 4.5.b**).

O procedimento geral de análise para avaliação dos parâmetros hidráulicos foi feito usando o *software Grapher*, pelo método clássico de superposição envolvendo os seguintes passos:

- 1) Construção, em gráfico dilog, das famílias de curvas padrão de Neuman (Tipo A e Tipo B) de rebaixamento adimensional  $s_D$  em função dos tempos adimensionais  $t_s$  e  $t_y$  como descrito em Batu (1998), para uma faixa de valores práticos do fator de drenagem gravitacional  $\beta$ , como os usados nas **figuras 4.5a e 4.5b**;
- 2) Construção, em gráfico dilog, da curva de rebaixamento x tempo, com os dados medidos no campo e superposição da mesma sobre o gráfico da família de curvas (primeiro sobre a curva padrão Tipo A e depois sobre a curva padrão Tipo B se for caso ou apenas sobre a curva Tipo B como agora acontece) padrão de Neuman;
- 3) Selecionar e arrastar o gráfico de campo sobre o gráfico das curvas padrão até encontrar a curva padrão dilog Tipo A, que melhor se ajusta ao trecho inicial da curva de campo;

- 4) Escolher um ponto arbitrário sobre os gráficos superpostos na posição em que os mesmos se encontram e anotar o valor de  $\beta$  e fazer a leitura dos valores das coordenadas  $s$  e  $S_D$  nos eixos verticais e de  $t$  e  $t_s$  nos eixos horizontais;
- 5) Repetir os passos 3 e 4 arrastando sobre as curvas padrão Tipo B, o trecho final da curva de campo até obter o melhor ajuste e sobre o ponto arbitrário escolhido anotar o valor de  $\beta$  e os valores das coordenadas  $s$  e  $S_D$  nos eixos verticais das coordenadas  $t$  e  $t_y$  nos eixos horizontais;
- 6) Com os valores conhecidos de  $Q$ ,  $s$  e  $S_D$  calcular a transmissividade do aquífero usando a **equação (4.12)**:

$$T = \frac{Q S_D}{4\pi s} \quad (4.12)$$

- 7) Usando a transmissividade e a espessura do aquífero, calcular a condutividade hidráulica horizontal usando a **equação (4.13)**:

$$K_h = \frac{T}{b} \quad (4.13)$$

- 8) Avaliar o grau de anisotropia a partir da **equação (4.14)**:

$$K_D = \frac{K_v}{K_h} = \beta \left( \frac{b}{r} \right)^2 \quad (4.14)$$

- 9) Avaliar a condutividade hidráulica vertical usando a equação **(4.15)**:

$$K_v = K_D \times K_h \quad (4.15)$$

- 10) Avaliar o coeficiente de armazenamento através da **equação (4.16)**:

$$S = \frac{Tt}{t_s r^2} \quad (4.16)$$

- 11) Avaliar a porosidade efetiva por meio da **equação (4.17)**:

$$S_y = \frac{Tt}{t_y r^2} \quad (4.17)$$

Nas **equações 4.12 a 4.17**, os significados dos símbolos utilizados são:

$s_D$  = rebaixamento adimensional [ ];

$K_h$  = condutividade hidráulica horizontal [L/T];

$K_v$  = condutividade hidráulica vertical [L/T];

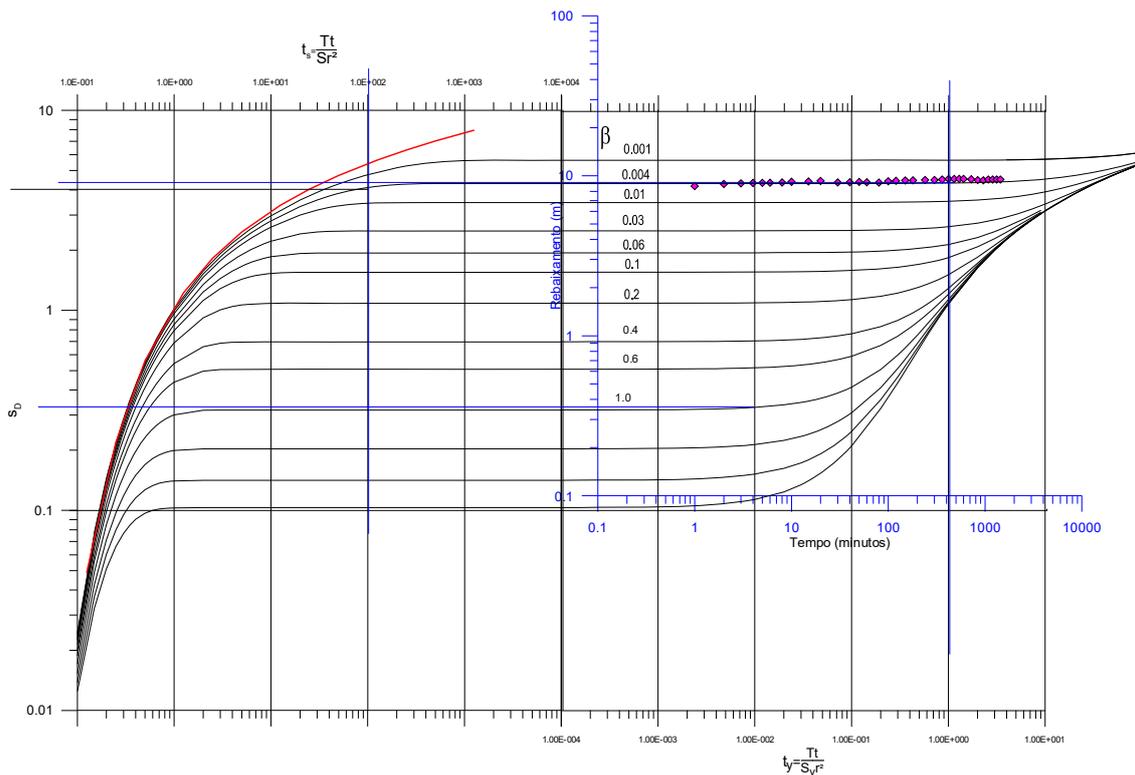
$b$  = espessura do aquífero [ L];

$K_D$  = grau de anisotropia do aquífero [ ];

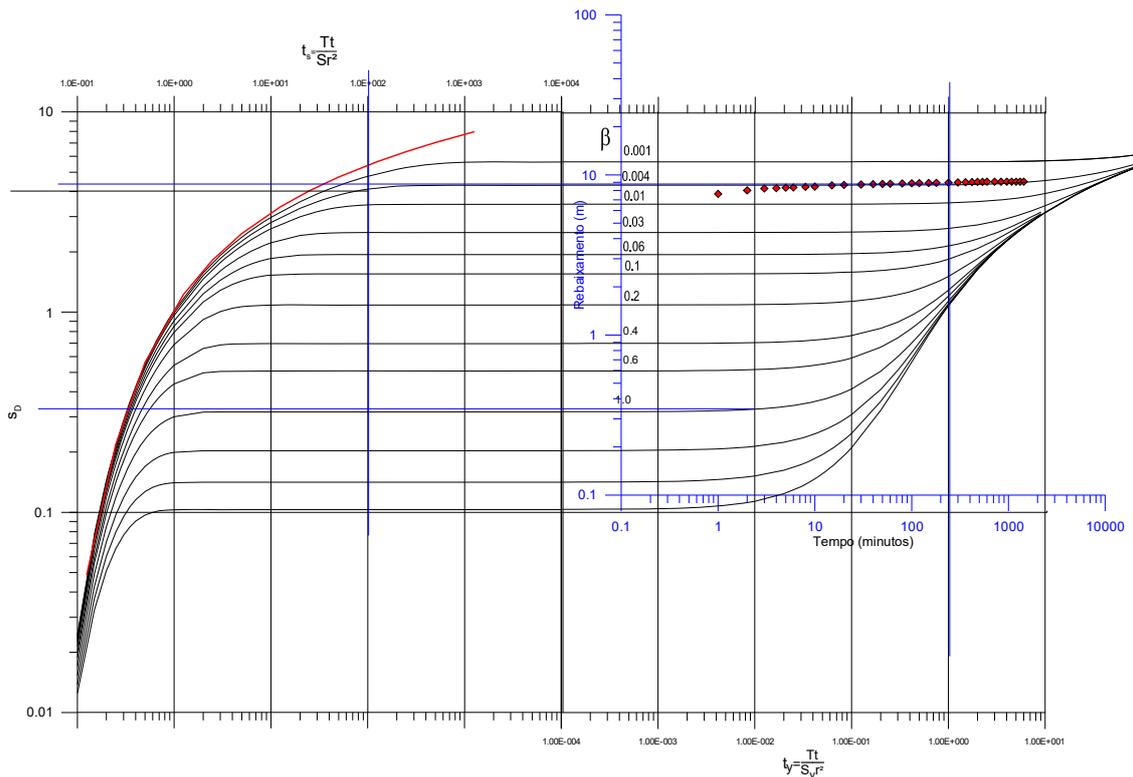
$\beta$  = fator de drenagem retardada [ ];

$t_s$  e  $t_y$  = parâmetros temporais adimensionais para tempos curtos e tempos longos, respectivamente [ ];

$S_y$  = porosidade efetiva ou coeficiente de armazenamento do aquífero livre [ ].



**Figura 4.5a** – Curva de rebaixamento x tempo do poço CAESA-1, evoluindo desde o primeiro minuto sobre a curva padrão Tipo B de Neuman (1975).



**Figura 4.5b** – Curva de rebaixamento x tempo do poço CAESA-2, evoluindo a partir de apenas 3 minutos sobre a curva padrão Tipo B de Neuman (1975).

#### 4.1.2.3 – Parâmetros Hidráulicos Obtidos

##### *Metodo de Cooper & Jacob (1946)*

Os valores médios das propriedades hidráulicas avaliadas através da interpretação dos testes realizados em Macapá no aquífero Tucunaré, pelo método de Cooper & Jacob (1946) são apresentados na **tabela 4.3**. A magnitude dos parâmetros de transporte se revela superestimada e os valores do coeficiente de armazenamento (S) são inconsistentes para aquífero confinado e sugerem que a metodologia adotada não é apropriada para o aquífero livre Tucunaré.

**Tabela 4.3** – Parâmetros hidráulicos avaliados para o aquífero Tucunaré na cidade de Macapá – AP, pelo método de Cooper & Jacob (1946).

Poço	UF	Longitude Decimal	Latitude Decimal	Aquífero	T (m <sup>2</sup> /dia)	b (m)	K (m/dia)	S (adm)
CAESA 1	AP	-51,0544	-0,0328	Tucunaré	1158	160	7,24	0,022
CAESA 2	AP	-51,0767	-0,045	Tucunaré	2238	158	10,04	0,042
		<b>Média</b>			<b>1710</b>	<b>159</b>	<b>8,64</b>	

T = transmissividade; K = condutividade hidráulica; S = coeficiente de armazenamento; b=Espessura saturada

##### **Parâmetros compilados de estudos anteriores**

A **tabela 4.4** mostra alguns valores de parâmetros hidráulicos avaliados em Macapá, obtidos de estudos hidrodinâmicos existentes: Tancredi & Tagliarini (2002), Tancredi & Oliveira (2004) e Tancredi (2006) realizados para empresas de água mineral na região de Macapá. Inicialmente atribuídos ao aquífero Barreiras, os referidos parâmetros são agora reconhecidos, à luz dos estudos

de Rossetti & Valeriano (2007), como pertencentes ao aquífero Tucunaré. Os poços utilizados nos testes foram de pequena profundidade (média de 23 m) e os parâmetros de transporte indicam para o aquífero Tucunaré ordens de grandeza aproximadamente 12 vezes menores do que as que foram reveladas para esse aquífero pelos poços profundos existentes em exploração em Macapá.

**Tabela 4.4** – Parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Tucunaré segundo Tancredi & Tagliarini (2002), Tancredi & Oliveira (2004) e Tancredi (2006) em Macapá - AP.

Teste	Aquífero	NE (m)	T (m <sup>2</sup> /dia)	K (m/dia)	Sy	S	Espessura do aquífero (m)
I	Livre	13,2	17,28	0,48	0,2	-	36
II	Confinado	11,8	16,56	0,72	-	3,50E-05	23
III	Confinado	19,8	2,64	0,24	-	5,30E-05	11
<b>Média</b>		<b>14,9</b>	<b>12,2</b>	<b>0,48</b>	<b>0,2</b>	<b>4,4E-05</b>	<b>23</b>

NE = nível estático; T = transmissividade K = condutividade hidráulica; Sy= Porosidade efetiva; S = coeficiente de armazenamento.

Nos 3 (três) testes realizados no aquífero Tucunaré, referidos na **tabela 4.4**, nota-se que em um deles o aquífero foi interpretado como livre, fornecendo condutividade hidráulica de 0,48 m/dia, porosidade efetiva de 20% e espessura saturada de apenas 36 m. Nos dois outros testes, o aquífero foi suposto confinado e a interpretação dos resultados forneceu uma transmissividade média de 12,2 m<sup>2</sup>/dia e coeficiente de armazenamento médio de 4,4 x 10<sup>-5</sup>, ou seja, valores consistentes com o modelo de interpretação adotado de Cooper & Jacob (1946).

#### **Método de Neuman (1975)**

Os testes realizados no âmbito do Projeto PHA, no poço CAESA 1 (160 m de profundidade) e CAESA 2 (158 m de profundidade), reavaliados pelo método de Neuman (1975) reconhecendo o aquífero Tucunaré como livre, homogêneo e anisotrópico, apresentaram os resultados mostrados na **tabela 4.5**.

**Tabela 4.5** – Parâmetros hidráulicos do Aquífero Tucunaré em Macapá - AP obtidos pelo modelo de Neuman (1975).

Poço	Longitude	Latitude	T (m <sup>2</sup> /dia)	Kh (m/dia)	Kv (m/dia)	KD (adm)	Sy
CAESA 1	-51,0540	-0,0328	69,1	2,9	0,0125	0,004	0,04
CAESA 2	-51,0767	-0,045	220,3	9,2	0,037	0,004	0,11
<b>Média</b>			<b>145</b>	<b>6</b>	<b>0,025</b>	<b>0,004</b>	<b>0,08</b>

T = transmissividade; Kh = condutividade hidráulica; horizontal; Kv= condutividade hidráulica vertical ; S = coeficiente de armazenamento; Sy= Porosidade efetiva; KD= Grau de anisotropia.

#### 4.1.2.4 - Conclusões sobre os Resultados Obtidos

Em Macapá os valores do coeficiente de armazenamento (S) avaliados com o modelo de Cooper & Jacob (1946) são inconsistentes e isso mostrou a necessidade de reavaliação dos testes pelo modelo de Neuman (1975), como pode ser observado na **tabela 4.6**, que forneceu valores plenamente satisfatórios para uma caracterização confiável do aquífero Tucunaré, como sendo do tipo livre, homogêneo e anisotrópico com drenagem gravitacional (**tabela 4.8**).

**Tabela 4.6** – Parâmetros hidráulicos avaliados pelo método de Neuman (1975) para o aquífero Tucunaré na cidade de Macapá – AP.

TESTE	Curva Tipo	T (m <sup>2</sup> /dia)	b (m)	Kh (m/dia)	$\beta$	r (m)	S	Sy	KD
CAESA 1	A	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	69,1	24	2,9	0,004	24	-	0,04	1/250
<b>Média CAESA 1</b>		<b>69,1</b>	<b>24</b>	<b>2,9</b>	<b>0,004</b>	<b>24</b>	-	<b>0,04</b>	<b>1/250</b>
CAESA 2	A	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	220,3	24	9,2	0,004	-	-	0,11	1/250
<b>Média CAESA 2</b>		<b>220,3</b>	<b>24</b>	<b>9,2</b>	<b>0,004</b>	<b>24</b>	-	<b>0,11</b>	<b>1/250</b>
<b>Média do Aquífero</b>		<b>145</b>	<b>24</b>	<b>6,1</b>	<b>0,004</b>	<b>24</b>	-	<b>0,08</b>	<b>1/250</b>

T=transmissividade; b = espessura do aquífero (zona de admissão de água); Kh = condutividade hidráulica horizontal ;  $\beta$  =fator de drenagem gravitacional; r = distância de avaliação do armazenamento; S=coeficiente de armazenamento; Sy = Porosidade efetiva; KD = Grau de anisotropia

Pela teoria empregada, o aquífero deve se encontrar inicialmente em repouso, porém na área de Macapá, o aquífero testado (Tucunaré) se encontra em exploração há muito tempo e não foi possível garantir essa condição. No caso em estudo, os poços testados da CAESA já se encontravam em operação há muito tempo e neles as curvas iniciais de rebaixamento transiente (que refletem a liberação instantânea de água do aquífero pelo alívio de pressão) se desenvolvem em intervalos de tempo muito pequenos, que correspondem às primeiras leituras. Teoricamente, usando transdutores de pressão com leituras programadas em segundos seria possível registrar essas curvas e caracterizá-las como Tipo A de Neuman. Como não foi possível paralisar os poços por um longo período de recuperação, somente foram registradas as curvas Tipo B, como visto nas **figuras 4.5a** e **4.5b**. Na análise dos testes, para garantir a condição de poço totalmente penetrante, a espessura do aquífero foi considerada igual à extensão dos filtros (24 m), que corresponde à zona de entrada de fluxo horizontal para o poço, através das camadas permeáveis.

Os valores finais (**tabela 4.9**) considerados representativos do aquífero como um todo, correspondem a uma condutividade hidráulica horizontal de 6 m/dia e uma porosidade efetiva média de 8%. A espessura saturada já conhecida através de poços existentes é de 150 m, mas não penetra totalmente o aquífero Tucunaré, o que leva a supor que a real potencialidade do mesmo é superior.

Quanto aos parâmetros, para atender à condição de poço totalmente penetrante exigida pelo modelo, ao invés da espessura real, que é

desconhecida, adotou-se a zona de admissão de água do poço, que é de 24 m e igual à extensão das duas seções de 12 m de filtros.

Embora os poços testados sejam praticamente de mesma profundidade e tenham apresentado o mesmo rebaixamento, os parâmetros hidráulicos de transporte e armazenamento são cerca de 3 (três) vezes maiores no poço 2, do que no poço 1, refletindo exatamente o que ocorre em termos de vazão e de capacidade específica, cuja diferença também é da ordem de 3 (três) vezes. Esse resultado sugere que o aquífero se comporta como heterogêneo e nessas condições o resultado pode ser aceito (**tabela 4.7**).

**Tabela 4.7** – Parâmetros hidráulicos e capacidade de produção dos poços testados em Macapá – AP, indicando aquífero heterogêneo, embora interpretado como homogêneo.

Poço	Profundidade (m)	T (m <sup>2</sup> /dia)	K (m/dia)	Sy	Q (m <sup>3</sup> /dia)	s (m)	Q/s (m <sup>3</sup> /h.m)
CAESA 1	160	69,1	2,9	0,04	75	9,48	7,91
CAESA 2	158	220,3	9,2	0,11	240	9,08	26,4
Razão 2/1	1,0	3,2	3,2	2,8	3,2	1,0	3,3

T = transmissividade; K = condutividade hidráulica; Sy = Porosidade efetiva; Q = vazão do poço; s = rebaixamento no poço; Q/s = capacidade específica do poço.

Supondo válida a hipótese de aquífero homogêneo, a diferença pode ser atribuída a perdas de carga não lineares no poço 1. A correção dessas perdas pode ser feita considerando no poço 1 a mesma capacidade específica do poço 2 (26,4 m<sup>3</sup>/h.m), o que leva (**anexo 7.1.2.7**) à obtenção dos mesmos parâmetros em ambos os poços (**tabela 4.8**).

**Tabela 4.8** – Parâmetros hidráulicos e capacidade de produção dos poços para o aquífero Tucunaré, em Macapá - AP, interpretado como livre, homogêneo e anisotrópico.

Poço	Profundidade (m)	T (m <sup>2</sup> /dia)	K <sub>h</sub> (m/dia)	Sy	Q (m <sup>3</sup> /dia)	s (m)	Q/s (m <sup>3</sup> /h.m)
CAESA 1	160	221,7	9,2	0,11	75	2,84	26,4
CAESA 2	158	220,3	9,2	0,11	240	9,08	26,4

T = transmissividade; K<sub>h</sub> = condutividade hidráulica horizontal; Sy = Porosidade efetiva; Q = vazão do poço; s = rebaixamento no poço; Q/s = capacidade específica do poço.

Os resultados da **tabela 4.8** são otimistas, pois forçam arbitrariamente a vazão específica do poço 2, de 7,91 para 26,4 m<sup>3</sup>/h.m, incluindo perdas não lineares que na verdade não foram medidas, mas inferidas para manter a consistência com a hipótese de homogeneidade do aquífero, prevista no modelo de interpretação.

Pode-se, porém, conciliar a hipótese de homogeneidade do aquífero com a realidade observada, usando a média, que leva em conta os valores estimados nos dois poços conforme **tabela 4.8**, como se indica na **tabela 4.9**.

**Tabela 4.9** – Parâmetros hidráulicos médios avaliados para o aquífero Tucunaré, em Macapá - AP, interpretado como livre, homogêneo e anisotrópico.

Aquífero	Espessura (m)	T (m <sup>2</sup> /dia)	K <sub>h</sub> (m/dia)	K <sub>v</sub> (m/dia)	Sy
Média	150	145	6	0,04	0,08

T = transmissividade; K<sub>h</sub> = Condutividade hidráulica horizontal; K<sub>v</sub> = Condutividade hidráulica vertical; Sy = Porosidade efetiva

### 4.1.3 – Recarga e Descarga de Água Subterrânea

#### 4.1.3.1 – Variações de Nível Estático

A partir das medições de profundidade do nível estático dos poços localizados no município de Macapá, cujos resultados são apresentados na **tabela 4.10**, foram elaborados para o aquífero Tucunaré os mapas de profundidade de nível e de potenciometria (curvas potenciométricas), para cada período de medição (chuvoso e estiagem).

A distribuição espacial da profundidade das águas subterrâneas na cidade de Macapá, referente ao período chuvoso de medição (abril de 2012), ilustrada na **figura 4.6a**, mostra que os níveis estáticos do aquífero Tucunaré variam de 2 a pouco mais de 10 m. As zonas com níveis superiores a 8 m se desenvolvem na direção aproximada de sudoeste para nordeste ao longo da porção central da zona urbana. A Leste e a Oeste da zona central, predominam níveis da ordem de 2 a 4 m. A **figura 4.6b**, referente ao período de medição de estiagem (outubro de 2012), mostra a mesma configuração apresentada no período chuvoso, todavia os níveis estáticos se acham mais profundos, variando desde 6 m até 14 m.

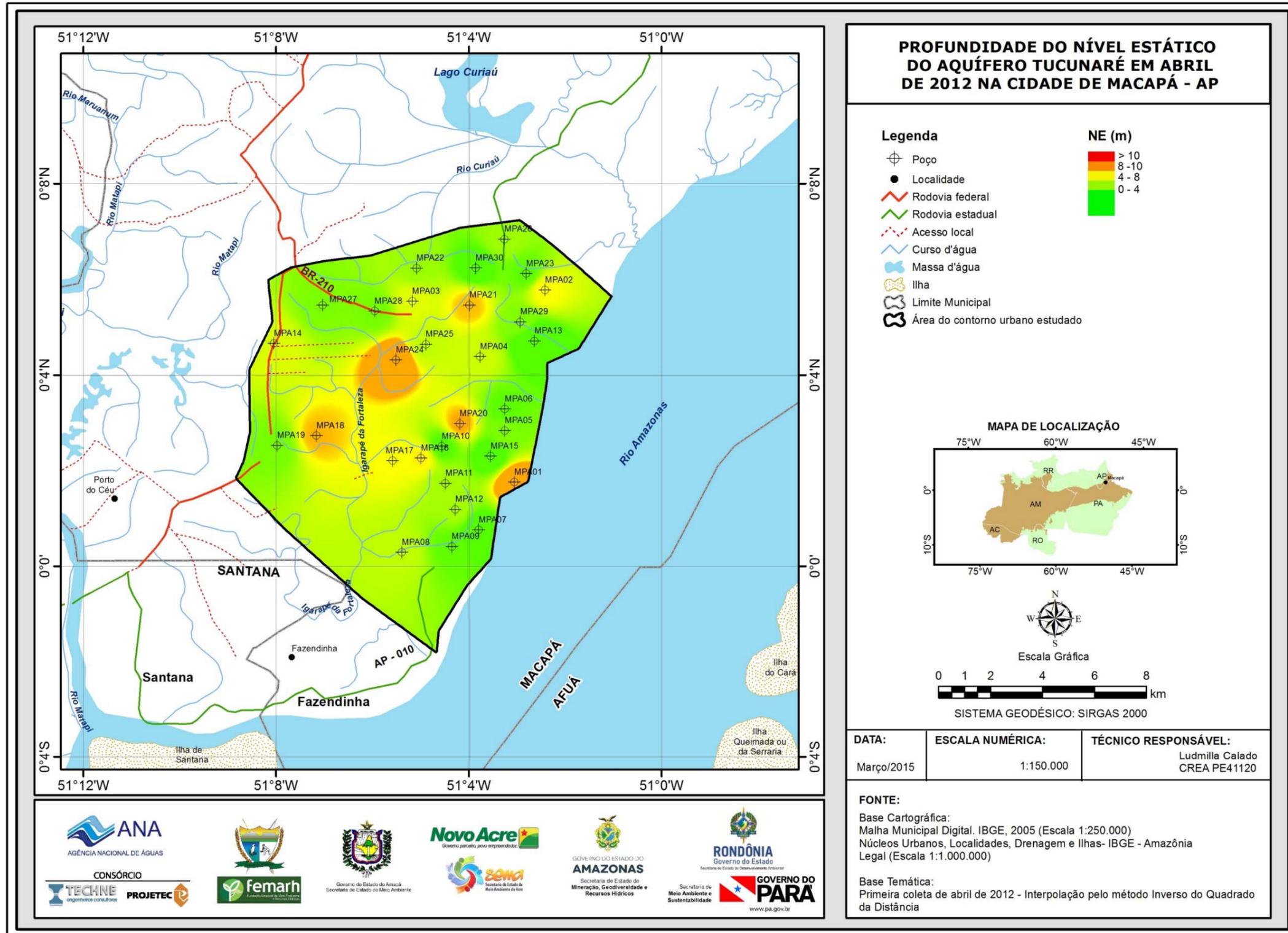
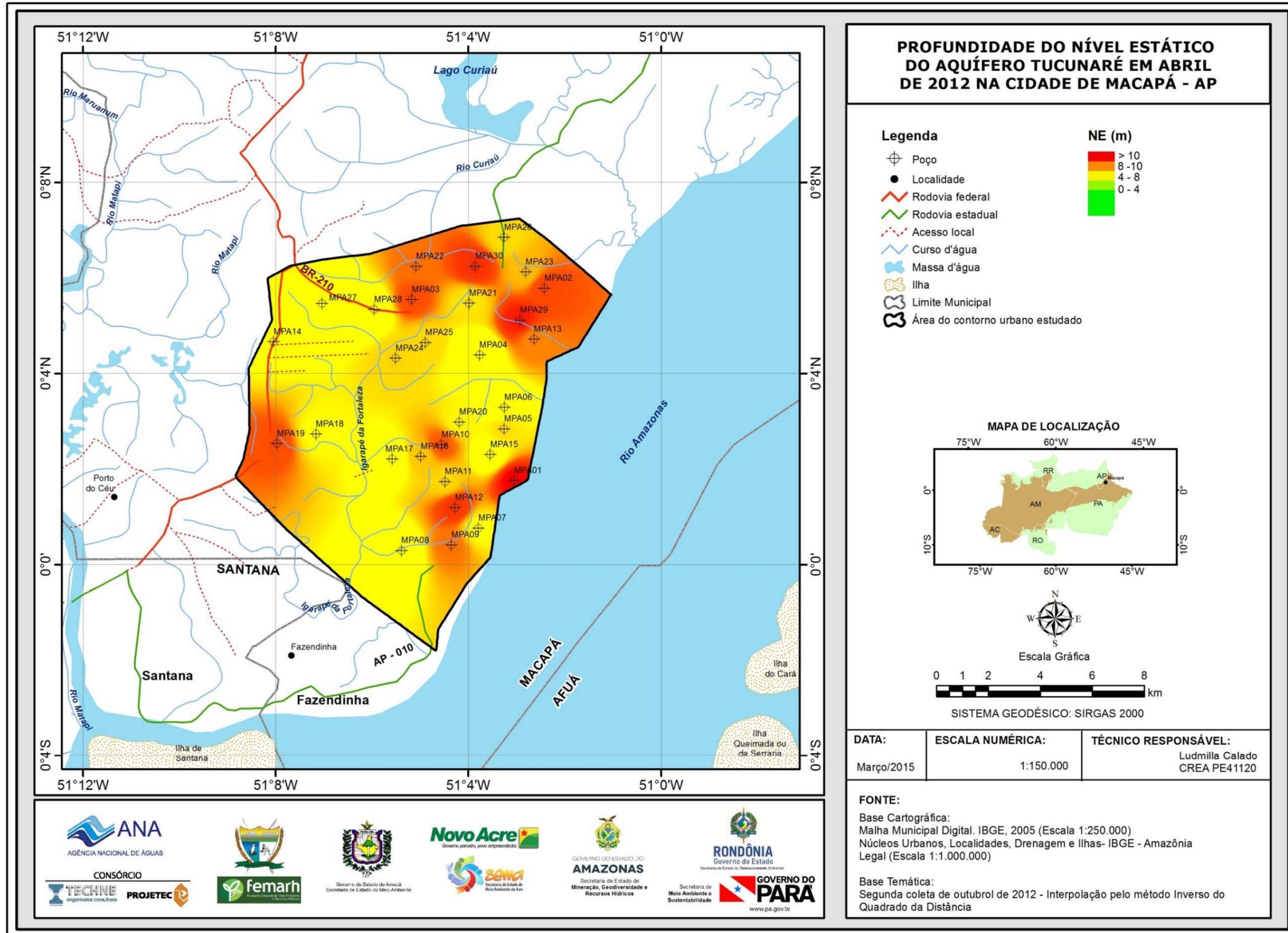


Figura 4.6a - Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em abril de 2012 na cidade de Macapá - AP.



**Figura 4.6b** - Profundidade do nível estático das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em outubro de 2012 na cidade de Macapá - AP.

#### 4.1.3.2 – Variações de Cotas Potenciométricas

Na região de Macapá, na área de estudo, ou mais precisamente na área urbana onde foram realizadas as duas campanhas de medição de níveis, a variação média sazonal entre abril de 2012 e outubro de 2012 foi de 3,31 m como pode ser visto na **tabela 4.10**.

**Tabela 4.10** - Variação de níveis estáticos e de cotas potenciométricas nos poços de Macapá no aquífero Tucunaré, no período chuvoso (abril de 2012) e no período de estiagem (outubro de 2012).

Poço	Coordenadas		Cota Terreno (m)	1ª Campanha - Abril de 2012		2ª Campanha - Outubro de 2012		Diferença da 1ª para a 2ª Campanha
	Longitude	Latitude		Prof. NE (m)	Cota NE (m)	Prof. NE (m)	Cota NE (m)	Cota NE (m)
MPA01	-51,05086	0,02924	17	10,00	7,00	13,35	3,65	3,40
MPA02	-51,04031	0,09625	22	8,00	14,00	11,82	10,18	3,80
MPA03	-51,08619	0,09234	32	7,25	24,75	11,60	20,40	4,40
MPA04	-51,06278	0,07301	29	6,70	22,30	11,60	17,41	4,90
MPA05	-51,05423	0,04719	22	4,78	17,22	8,22	13,78	3,40
MPA06	-51,05417	0,05474	17	4,15	12,85	6,85	10,15	2,70
MPA07	-51,0632	0,01259	14	3,28	10,72	5,34	8,66	2,10
MPA08	-51,08983	0,00479	15	6,40	8,60	8,57	6,43	2,20
MPA09	-51,07251	0,00676	11	4,24	6,76	8,69	2,32	4,40
MPA10	-51,07595	0,04174	20	3,90	16,10	6,65	13,35	2,80
MPA11	-51,07476	0,02881	21	5,75	15,25	7,92	13,08	2,20
MPA12	-51,07129	0,01978	20	5,74	14,26	8,00	12,00	2,30
MPA13	-51,04393	0,0785	29	2,45	26,55	6,45	22,56	4,00
MPA14	-51,13405	0,07761	27	7,10	19,90	10,94	16,07	3,80
MPA15	-51,0591	0,03831	24	3,45	20,55	6,35	17,66	2,90
MPA16	-51,08315	0,03763	23	8,10	14,90	10,88	12,12	2,80
MPA17	-51,09296	0,0367	49	7,90	41,10	11,32	37,68	3,40
MPA18	-51,11937	0,04544	22	8,42	13,58	12,98	9,02	4,60
MPA19	-51,13292	0,04208	17	4,67	12,33	8,92	8,09	4,20
MPA20	-51,06978	0,04961	17	8,50	8,50	12,33	4,67	3,80
MPA21	-51,06638	0,09102	21	8,38	12,62	10,60	10,41	2,20
MPA22	-51,08471	0,10385	29	5,50	23,50	7,85	21,15	2,40
MPA23	-51,04678	0,10195	35	4,20	30,80	6,98	28,02	2,80
MPA24	-51,09184	0,07188	17	9,62	7,38	12,50	4,50	2,90
MPA25	-51,08153	0,07733	24	6,48	17,52	9,52	14,48	3,00
MPA26	-51,05427	0,114	16	5,60	10,40	8,95	7,05	3,40
MPA27	-51,11726	0,091	18	4,80	13,20	8,85	9,16	4,00
MPA28	-51,0992	0,08889	17	4,67	12,33	8,75	8,25	4,10
MPA29	-51,04881	0,08514	15	4,93	10,07	9,27	5,74	4,30
MPA30	-51,06429	0,10395	28	3,60	24,40	5,75	22,25	2,20
<b>Média</b>								<b>3,31</b>

A potenciometria do aquífero Tucunaré em abril de 2012 é apresentada na **figura 4.7a** e em outubro de 2012 na **figura 4.7b**. As cargas hidráulicas variam de 5 a 40 m no período chuvoso e de 5 a 35 m na estiagem, exibindo um comportamento indicativo da influência da exploração do aquífero pela rede de poços produtores. Isto é revelado pelas curvas fechadas, deprimidas por bombeamento, que formam cones de depressão, e/ou curvas em forma de domos, que sugerem níveis de água localmente em recuperação. Embora as vazões bombeadas da maioria dos poços sejam pequenas, como será visto na **figura 4.14**, existem poços da CAESA de grande capacidade de produção. Os seus efeitos sobre a superfície potenciométrica se fazem naturalmente sentir, embora ainda de forma pouco significativa, em termos de rebaixamento, pois o aquífero, ao que tudo indica, tem espessura superior a 150 m.

#### **4.1.4 – Escoamento e Exutórios**

Em escala local da folha de 15 minutos de Macapá o escoamento das águas subterrâneas se faz para os poços existentes em operação e também ao longo de uma frente de escoamento natural de direção Sudeste, não capturada pelos poços. Esse escoamento natural tem como área de recarga efetiva a área da bacia setentrional do Igarapé da Fortaleza, com 109 km<sup>2</sup>, já que nos 35 km<sup>2</sup> restantes da área de estudo as águas infiltradas escoam para outras bacias hidrográficas, como foi mostrado nos **itens 1.3 e 2.3**.

##### ***Campanha de abril de 2012***

No final do período chuvoso de 2012, de acordo com as linhas potenciométricas do mapa hidrogeológico da **figura 4.7a**, as águas subterrâneas que escapam da convergência para poços existentes em exploração escoam em direção ao longo de uma frente natural de direção sudeste no sentido do rio Amazonas.

Entre as equipotenciais E14 e E12, a frente de fluxo natural para sudeste com largura de 7,5 km (**tabela 4.11**) e com gradiente hidráulico variável de 3 a 13 m/km, produz para uma transmissividade média de 145 m<sup>2</sup>/dia ( $17 \times 10^{-3} m^2/s$ ) uma descarga de **86 L/s**.

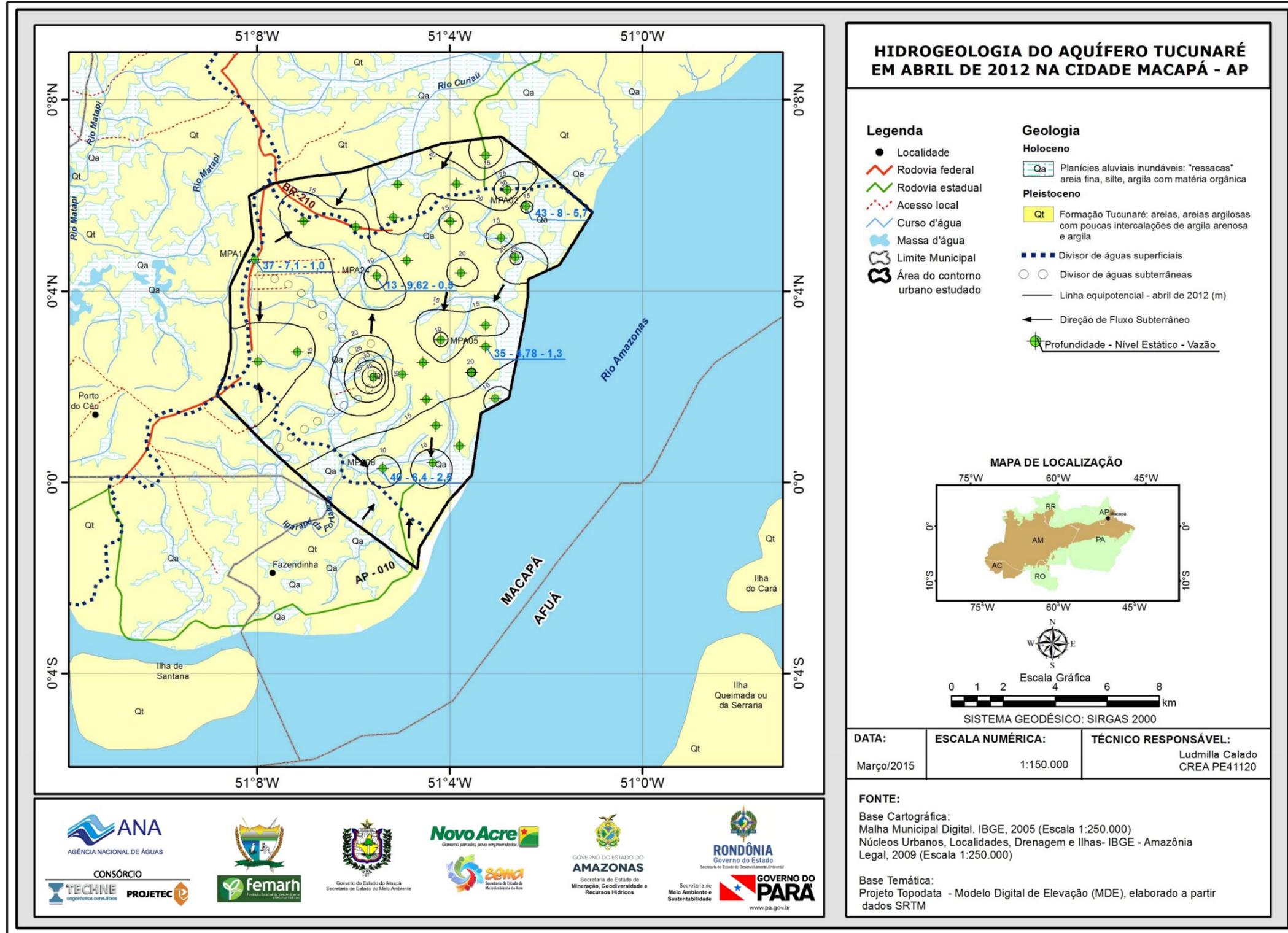


Figura 4.7a - Hidrogeologia e superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em abril de 2012 na cidade de Macapá - AP.

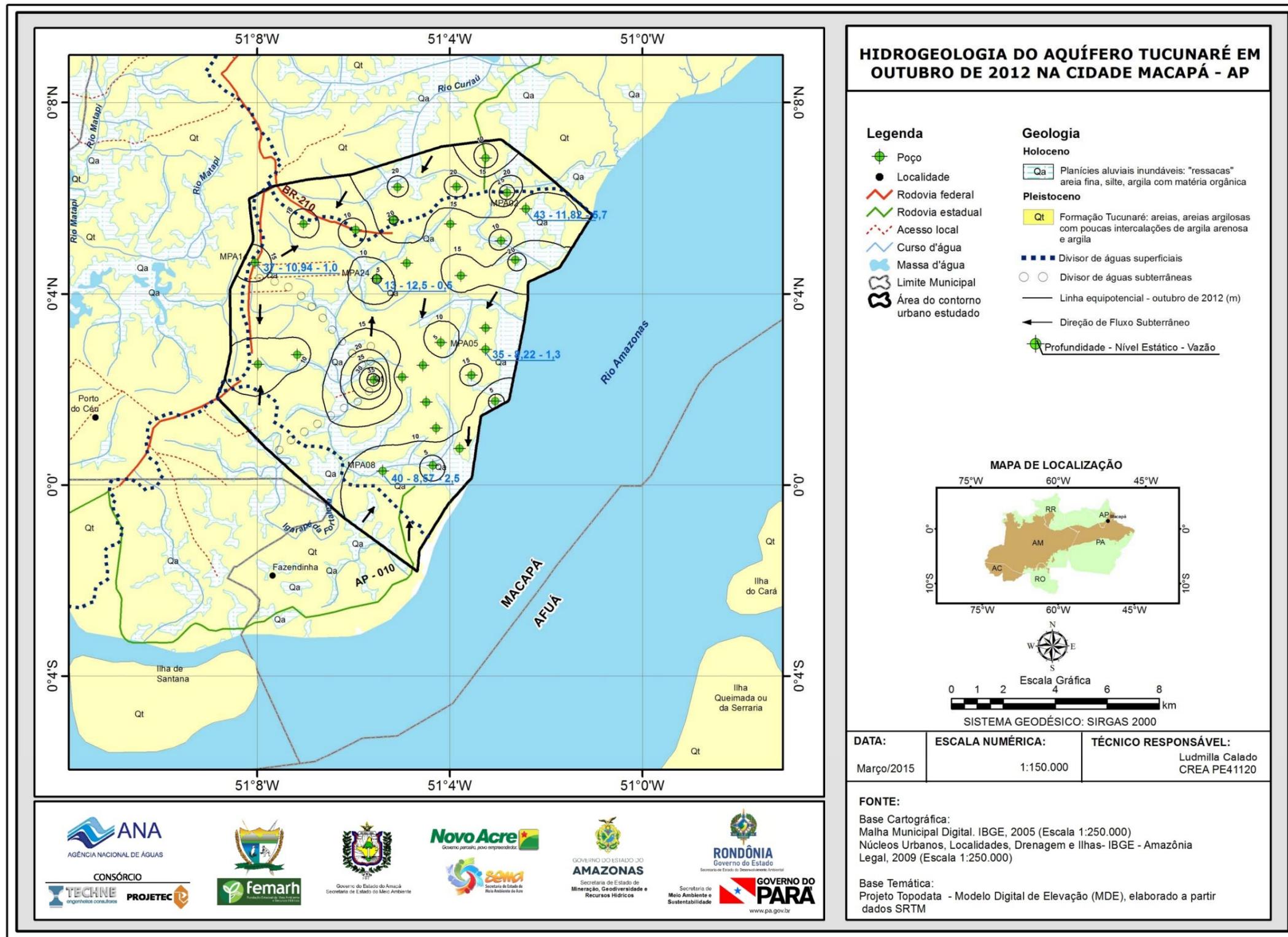


Figura 4.7b - Hidrogeologia e superfície potenciométrica das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em outubro de 2012 na cidade de Macapá - AP.

**Tabela 4.11** - Frente de escoamento natural do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá em abril de 2012, em direção ao rio Amazonas, parcialmente capturada por poços existentes em exploração.

Largura (m)	dW1	dW2	dW3	dW4	dW5	W
Equipotencial E14	1157	836	876	4631	-	7500
Equipotencial E12	1170	1079	872	4494	-	7615
dW médio (m)	1163,5	957,5	874	4562,5	-	7557,5
Comprimento (m)	dL1	dL2	dL3	dL4	dL5	W
Entre E14 e E12	154	361	670	329	-	-
dh (m)	2	2	2	2	-	-
dh/dL	0,012987	0,00554	0,00299	0,00608	-	0,0069
dh/dL (m/km)	13,0	5,5	3,0	6,1	-	6,9
T x dh/dLxW	2,57E-02	9,02E-03	4,44E-03	4,72E-02	-	0,08629

### **Campanha de outubro de 2012**

No período de estiagem em outubro de 2012 (**figura 4.7b**) o comportamento do fluxo subterrâneo se mantém similar ao do final do período chuvoso. A frente de escoamento, definida entre as equipotenciais E14 e E12 conforme pode ser visto na **tabela 4.12** tem largura média de 7,3 km e gradiente hidráulico variável de 3 m/km a 12 m/km.

Com a transmissividade de 145 m<sup>2</sup>/dia ( $1,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$ ), a vazão de escoamento natural do aquífero Tucunaré no período de estiagem é estimada em 76 L/s (**tabela 4.12**) que representa 88% da descarga encontrada no período chuvoso.

**Tabela 4.12** - Frente de escoamento natural do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá em outubro de 2012, em direção ao rio Amazonas, parcialmente capturada por poços existentes em exploração.

Largura (m)	dW1	dW2	dW3	dW4	dW5	W
Equipotencial E12	1288	894	1392	1284	2392	7250
Equipotencial E10	1172	933	2005	1211	2080	7401
dW médio (m)	1230	913,5	1698,5	1247,5	2236	7325,5
Comprimento (m)	dL1	dL2	dL3	dL4	dL5	W
Entre E12e E10	165	403	670	460	300	-
dh (m)	2	2	2	2	2	-
dh/dL	0,012121	0,00496	0,00299	0,00435	0,00667	-
dh/dL (m/km)	12,1	5,0	3,0	4,3	6,7	6,2
T x dh/dLxW	0,025345	0,00771	0,00862	0,00922	0,02534	0,07623

Conclui-se que os exutórios do fluxo natural, na escala da zona urbana de Macapá dentro da folha de 15 minutos, são representados pelos poços existentes em operação, que capturam, conforme mostrado adiante na **tabela**

**4.21**, uma descarga de 128 L/s, ficando uma descarga residual de 76 L/s no período de estiagem de 2012.

#### **4.1.5 – Reservas**

##### **4.1.5.1 – Reserva Reguladora ou Recarga Potencial Direta**

Em Macapá, a área de recarga responsável pela frente de escoamento natural não capturada pelos poços em Macapá, fica restrita à bacia hidrográfica setentrional do igarapé da Fortaleza, com 109 km<sup>2</sup>.

A recarga potencial direta (RPD) corresponde à parcela da precipitação pluviométrica média anual que infiltra e efetivamente alcança os aquíferos livres, constituindo assim a reserva renovável ou reguladora (ANA, 2013). Para estimativa da recarga, como já explicado no **item 4.1.4**, a área delimitada para o balanço hidrogeológico na zona urbana de Macapá é de 109 km<sup>2</sup>. Sobre essa área a variação sazonal média da superfície freática entre as duas campanhas de medições de nível foi de 3,31 m. A porosidade efetiva encontrada variou de 0,04 a 0,11 apresentando um valor médio de 0,08. Assim sendo os valores extremos e a média encontrada para a RPD são os seguintes:

$$RPD = 109 \times 10^6 \times 3,31 \times 0,04 = 14,4 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano} = 0,457 \text{ m}^3 / \text{s} = 132 \text{ mm} / \text{ano}$$

$$RPD = 109 \times 10^6 \times 3,31 \times 0,11 = 39,7 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano} = 1,260 \text{ m}^3 / \text{s} = 364 \text{ mm} / \text{ano}$$

$$RPD = 109 \times 10^6 \times 3,31 \times 0,08 = 28,9 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano} = 0,916 \text{ m}^3 / \text{s} = 265 \text{ mm} / \text{ano}$$

##### **4.1.5.2 – Reserva Potencial Explotável Estimada**

A reserva potencial explotável é dada pelo produto da recarga potencial direta pelo coeficiente de sustentabilidade CS (ANA, 2013) que no caso do aquífero Tucunaré em Macapá (adotando o CS do aquífero Içá, que é bastante arenoso) é igual a 0,4. Assim sendo, temos uma estimativa de reserva potencial explotável mínima de 0,183 m<sup>3</sup>/s e máxima de 0,504 m<sup>3</sup>/s, com valor médio igual a:

$$RPE = 0,4 \times 0,916 \text{ m}^3/\text{s} = 0,366 \text{ m}^3/\text{s}$$

Em 2012 conforme pode ser visto adiante na **tabela 4.21** a descarga total dos poços existentes em condições de funcionamento foi de 0,128 m<sup>3</sup>/s e, portanto, a exploração do aquífero Tucunaré naquele ano consumia 33% da RPE.

##### **4.1.5.3 – Reserva Permanente**

Tão somente para fins comparativos com a reserva reguladora, a reserva permanente do aquífero Tucunaré em Macapá é expressa pelo produto da área (A=109 km<sup>2</sup>), pela espessura média saturada (b = 150 m) e pela porosidade efetiva (coeficiente de armazenamento livre Sy=8%).

$$R_p = AbS_y = 109 \text{ km}^2 \times 150 \text{ m} \times 0,08 = 1,27 \times 10^9 \text{ m}^3$$

Naturalmente, para a área de estudo essa reserva é 1,32 vezes maior, ou seja:

$$R_p = AbS_y = 144 \text{ km}^2 \times 150 \text{ m} \times 0,08 = 1,73 \times 10^9 \text{ m}^3$$

Como se vê, a estimativa da reserva permanente leva em conta a espessura de 150 m sugerida pelos perfis dos poços mais profundos existentes em

Macapá. Não obstante convém assinalar que esses poços são parcialmente penetrantes e que a base do aquífero Tucunaré, segundo o estudo geológico Volume II, é provavelmente o cristalino, o qual ainda não foi atingido em nenhum dos poços. Logo, essa reserva, que é de 12 hm<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>, pode ser superior.

Na **tabela 4.13** são mostrados os valores das reservas do aquífero Tucunaré.

**Tabela 4.13** - Reservas do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá na área de 109 km<sup>2</sup> do balanço hidrogeológico.

Reservas	Unidade	Valor
Reserva reguladora (RPD)	m <sup>3</sup> /s	0,916
Reserva potencial explotável (RPE)	m <sup>3</sup> /s	0,366
Reserva permanente (RP)	m <sup>3</sup>	1,27 x 10 <sup>9</sup>

#### 4.1.6 – Situação da Exploração em 2012

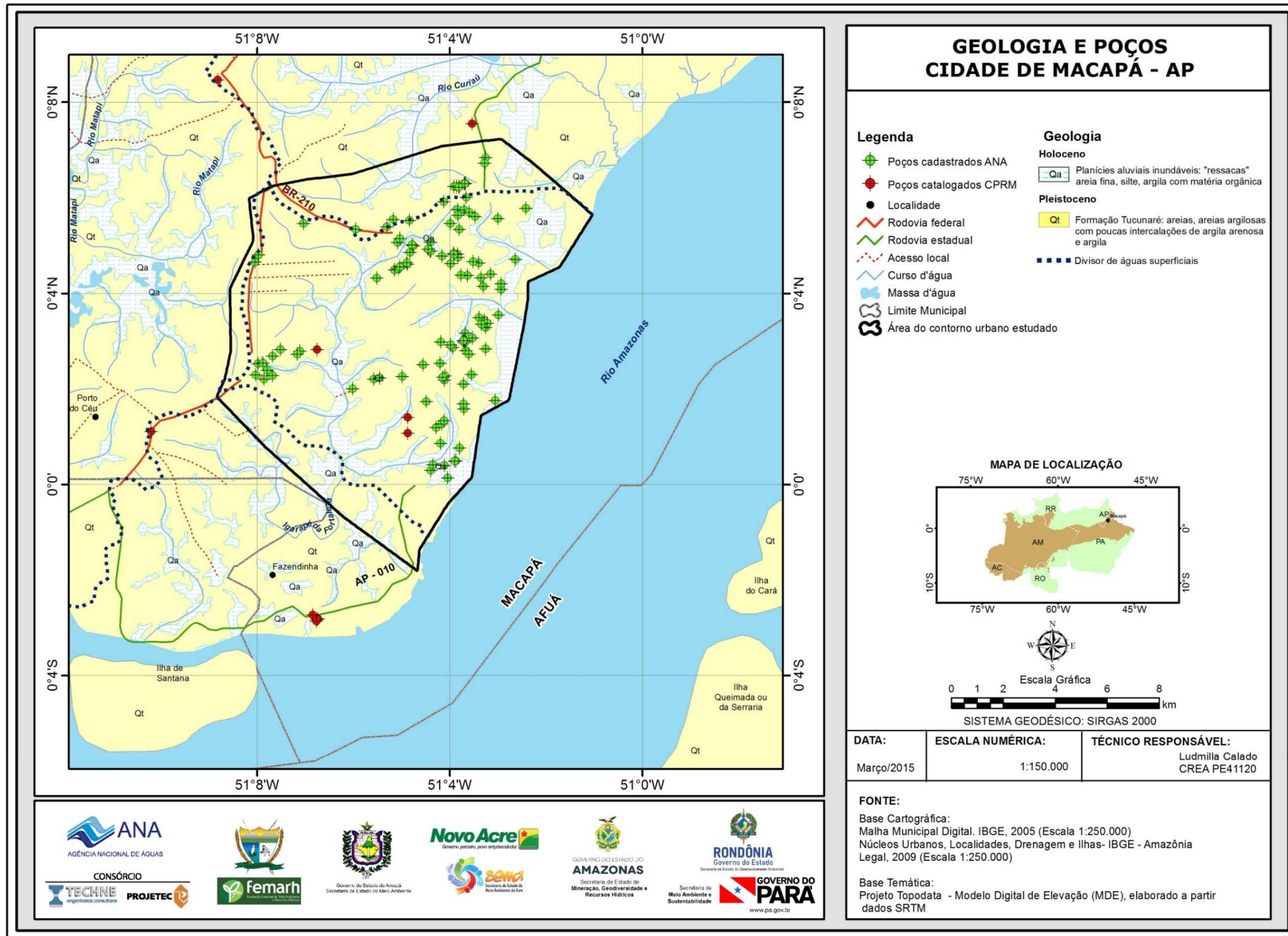
##### 4.1.6.1 – Levantamento e Sistematização de Dados

Todos os dados levantados no município de Macapá no âmbito do Projeto PHA foram sistematizados e fazem parte de um Sistema de Informações Geográficas – SIG ANA PHA 2013 que constitui a principal fonte de consulta de dados cartográficos, hidroclimáticos, geológicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos da Província Hidrogeológica Amazonas.

##### 4.1.6.2 - Poços Catalogados e Cadastrados

A pesquisa hidrogeológica desenvolvida na cidade de Macapá baseou-se em dados dos 136 poços constantes no SIG ANA PHA 2013, dos quais 22 catalogados no SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2010) e 114 novos poços cadastrados pela ANA, no âmbito do Projeto PHA, como pode ser observado no **anexo 7.2** e na **figura 4.8**.

Dentre os 114 novos poços cadastrados foi selecionada uma rede de 30 (trinta) poços para o monitoramento dos níveis freáticos e para a coleta de amostras de água que foram submetidas a análises físico-químicas, bacteriológicas e análises específicas (conforme descrito no **capítulo 5**, de Hidrogeoquímica), em duas etapas, uma no período de chuvas (abril de 2012) e outra no período de estiagem (outubro de 2012).



**Figura 4.8** – Distribuição espacial dos poços cadastrados pela ANA no projeto PHA e catalogados da CPRM-SIAGAS/CPRM na folha de 15 minutos e na área de estudo na cidade de Macapá – AP.

#### 4.1.6.3 – Tratamento Estatístico dos Dados Catalogados e Cadastrados

Na **tabela 4.14** é apresentada a estatística descritiva dos valores numéricos de profundidade, diâmetro, altura da boca, nível estático e vazão dos poços cadastrados e catalogados na cidade piloto de Macapá.

**Tabela 4.14** - Parâmetros estatísticos dos dados de poços de Macapá.

Parâmetros Estatísticos	Profundidade (m)	Diâmetro do revestimento (mm)	Altura da boca (m)	Nível Estático - NE (m)	Nível Dinâmico - ND (m)	Vazão (m³/h)
Média	32,8	107,9	0,2	2,1	2,9	6,2
Mediana	30,0	100,0	0,1	5,9	8,3	2,0
Desvio Padrão	28,6	47,1	0,2	7,1	9,4	16,2
Coefficiente Variação	0,9	0,4	1,3	3,4	3,3	2,6
Valor máximo	160,0	304,8	1,2	38,0	52,0	90,0
Valor mínimo	6,0	50,0	0,02	2,00	4,40	1,0
Nº amostras	129	125	102	22	22	122

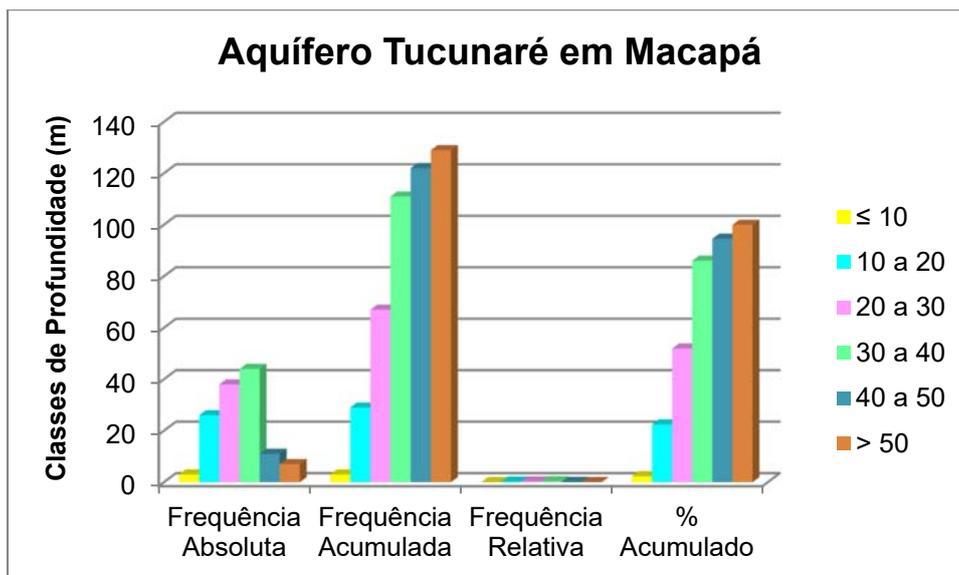
A profundidade dos poços levantados do SIAGAS e dos novos cadastrados pela ANA em Macapá varia de 6 a 160 m, com média aproximada de 32,8 m.

A **tabela 4.15** mostra que aproximadamente 95% dos poços têm profundidade menor ou igual a 50 m, sendo que as profundidades mais frequentes (64%) se encontram no intervalo de 20 a 40 m. Somente 5,4% dos poços possuem profundidade superior a 50 m. Trata-se, portanto de poços que podem ser considerados como tubulares rasos, que captam o aquífero livre Tucunaré.

**Tabela 4.15** – Frequência da profundidade dos poços tubulares levantados do SIAGAS e dos novos cadastrados pela ANA na cidade de Macapá – AP.

Classe Prof (m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
$0 < x \leq 10$	3	3	0,02	2,33
$10 < x \leq 20$	26	29	0,20	22,48
$20 < x \leq 30$	38	67	0,29	51,94
$30 < x \leq 40$	44	111	0,34	86,05
$40 < x \leq 50$	11	122	0,09	94,57
$x > 50$	7	129	0,05	100,00
<b>Total</b>	<b>129</b>			

A distribuição de frequência da profundidade dos poços de Macapá também pode ser vista no diagrama da **figura 4.9**.



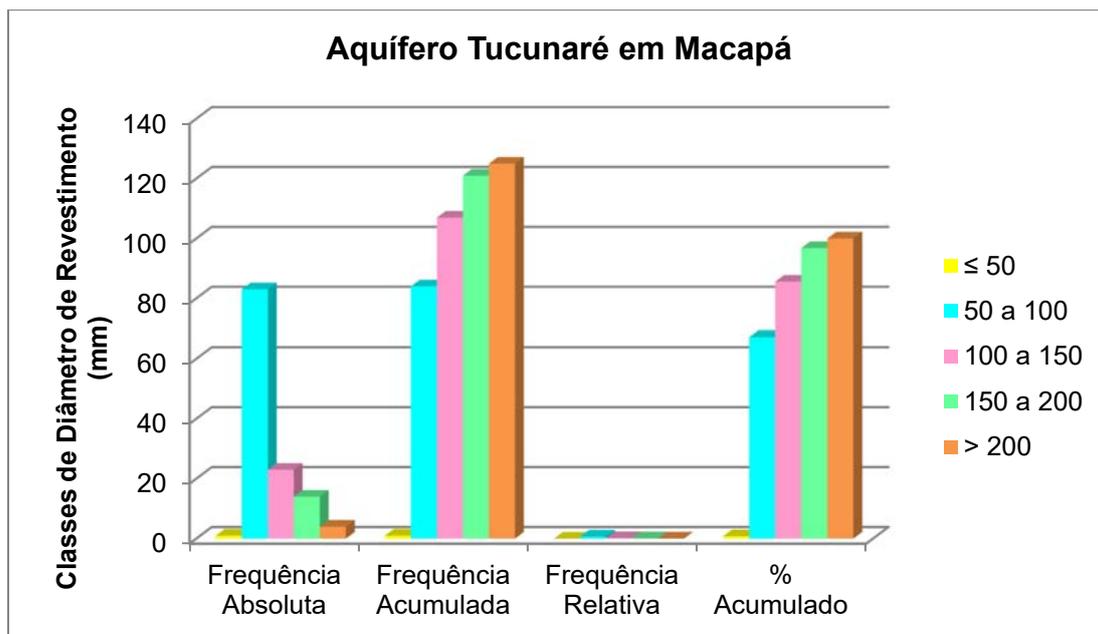
**Figura 4.9** – Frequência das classes de profundidade dos poços na cidade de Macapá - AP.

Em Macapá, de acordo com a **tabela 4.16**, o diâmetro de revestimento da grande maioria dos poços (67,2%) é de até 100 mm, havendo 18,4% de poços com diâmetros acima de 100 até 150 mm e 11,2% com diâmetros acima de 150 até 200 mm. Apenas 3,2% dos poços em Macapá possuem diâmetros superiores a 200 mm.

**Tabela 4.16** – Frequência dos diâmetros de revestimento dos poços tubulares levantados do SIAGAS e dos novos cadastrados pela ANA na cidade de Macapá – AP.

Classe Diâmetro do revestimento (mm)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
0<x≤50	1	1	0,01	0,80
50<x≤100	83	84	0,66	67,20
100<x≤150	23	107	0,18	85,60
150<x≤200	14	121	0,11	96,80
x>200	4	125	0,03	100,00
<b>Total</b>	<b>125</b>			

A distribuição de frequência do diâmetro de revestimento dos poços de Macapá pode ser visualizada na **figura 4.10**.

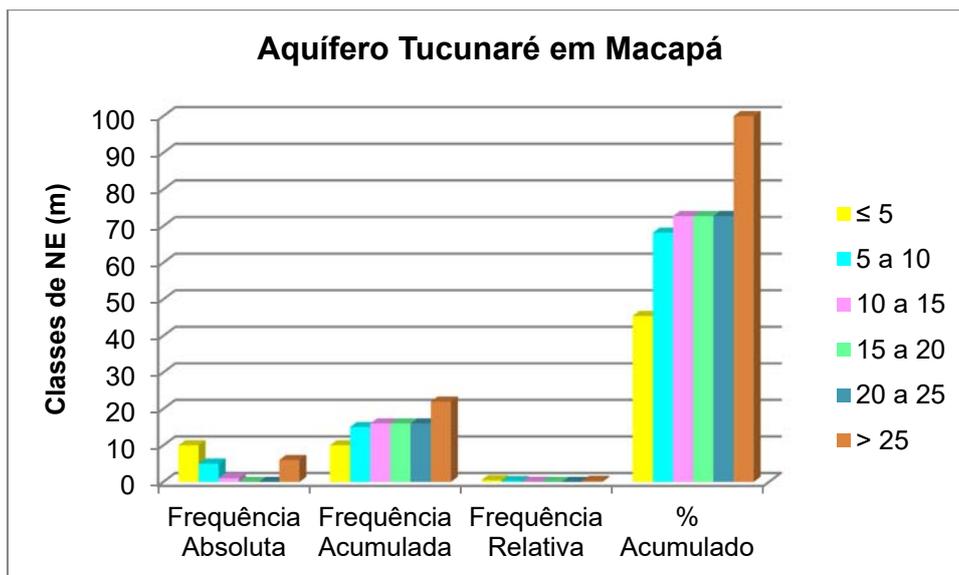


**Figura 4.10** – Frequências das classes de diâmetro de revestimento dos poços na cidade de Macapá - AP.

De acordo com os dados da **tabela 4.17** e **figura 4.11**, observa-se que os níveis estáticos dos poços em Macapá são rasos, em geral, sendo quase 68% com profundidades de até 10 m. Apenas 27% dos poços apresentam nível estático superior a 20 m de profundidade. Essa é uma característica do aquífero livre Tucunaré em Macapá, que o torna, sob este aspecto, mais vulnerável à contaminação, como será visto adiante.

**Tabela 4.17** – Distribuição de frequência da profundidade dos níveis estáticos dos poços levantados do SIAGAS e cadastrados pela ANA na cidade de Macapá - AP.

Classe NE (m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
$0 < x \leq 5$	10	10	0,45	45,45
$5 < x \leq 10$	5	15	0,23	68,18
$10 < x \leq 15$	1	16	0,05	72,73
$15 < x \leq 20$	0	16	0,00	72,73
$20 < x \leq 25$	0	16	0,00	72,73
$x > 25$	6	22	0,27	100,00
<b>Total</b>	<b>22</b>			

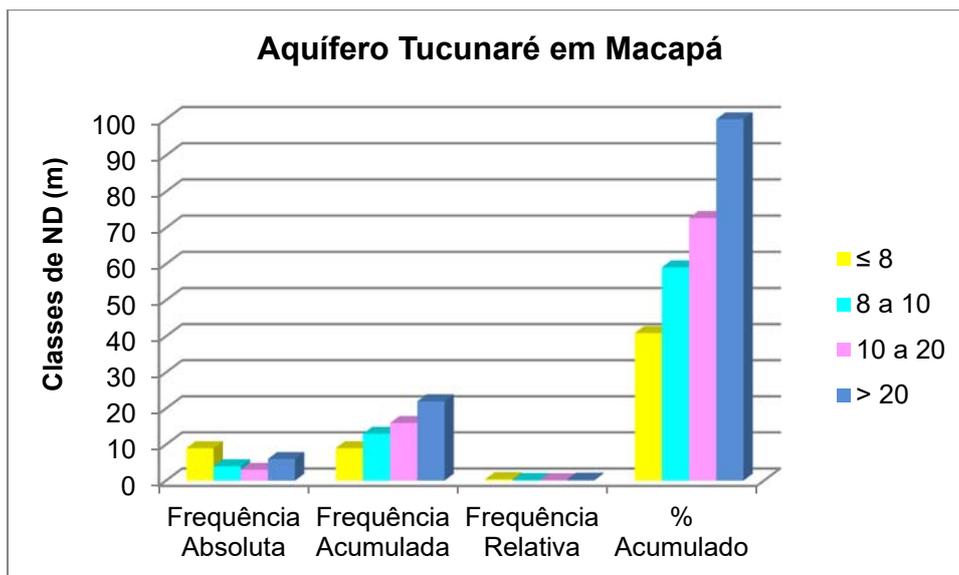


**Figura 4.11** – Frequências da profundidade do nível estático dos poços na cidade de Macapá - AP.

Para os níveis dinâmicos dos poços na cidade de Macapá, as frequências dos valores conhecidos são apresentadas na **tabela 4.18** e ilustradas na **figura 4.12**. Pode-se notar que 73% dos poços apresentam níveis dinâmicos inferiores a 20 m de profundidade, o que é uma consequência da pequena profundidade das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré e de uma exploração de poços geralmente abaixo da vazão ótima.

**Tabela 4.18** – Distribuição de frequência dos níveis dinâmicos dos poços na cidade de Macapá- AP.

Classe ND (m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
$0 < x \leq 8$	9	9	0,41	40,91
$8 < x \leq 10$	4	13	0,18	59,09
$10 < x \leq 20$	3	16	0,14	72,73
$x > 20$	6	22	0,27	100,00
<b>Total</b>	<b>22</b>			

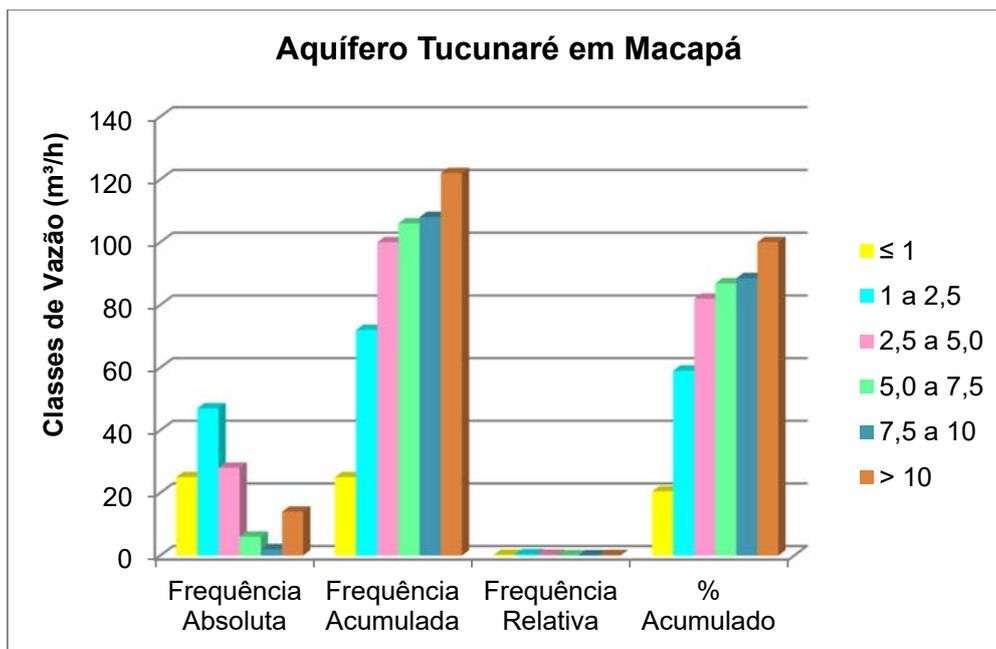


**Figura 4.12** – Frequência dos níveis dinâmicos de poços na cidade de Macapá- AP.

No que se refere à vazão dos poços com profundidade até 60 m que exploram o aquífero Tucunaré na cidade de Macapá, verifica-se que 82% dos poços possuem vazão de até 5 m<sup>3</sup>/h e apenas 11,5% apresentam vazão superior a 10 m<sup>3</sup>/h, sendo o máximo valor registrado o de 90 m<sup>3</sup>/h, como pode ser observado na **tabela 4.19** e **figura 4.13**.

**Tabela 4.19** – Frequência da vazão dos poços cadastrados pela ANA na cidade de Macapá – AP.

Classe Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
0<x≤1	25	25	0,20	20,49
1<x≤2,5	47	72	0,39	59,02
2,5<x≤5,0	28	100	0,23	81,97
5,0<x≤7,5	6	106	0,05	86,89
7,5<x≤10	2	108	0,02	88,52
x>10	14	122	0,11	100,00
<b>Total</b>	<b>122</b>			



**Figura 4.13** – Frequências de vazão de poços cadastrados pela ANA na cidade de Macapá – AP.

Com base nos dados apresentados anteriormente referentes ao aquífero Tucunaré em Macapá é possível deduzir que:

- A maioria dos poços cadastrados no município de Macapá, ou seja, 86% possui profundidade total inferior a 40 m;
- Quase 68% dos poços possuem níveis estáticos inferiores a 10 m de profundidade;
- As vazões dos poços com profundidade inferior a 60 m são predominantemente inferiores a 5 m³/h (82%), enquanto que apenas 11,5% possui vazão acima de 10 m³/h. Essas vazões são muito importantes para o abastecimento doméstico e industrial. Naturalmente, para o abastecimento público o mais recomendável é a utilização de poços profundos, como já vem já sendo feito pela CAESA. Como as águas subterrâneas são de boa qualidade para quaisquer usos (**item 5.2.18**) e o aquífero tem grande potencialidade, a possibilidade de ampliação das explorações atuais é muito grande.

Além dos parâmetros acima descritos, o cadastro obteve informações importantes relacionadas à operacionalidade dos poços atualmente usados para consumo doméstico, ao regime de bombeamento, aos tipos de equipamento e usos da água, os quais serão detalhados a seguir.

Dos 136 poços constantes do SIG ANA PHA 2013, foi constatado que em 2012 havia 93% (126) em operação, enquanto que 7% (10) estavam desativados.

Já no que se refere ao tipo de equipamento de bombeamento dos poços, os dados revelam que 11% usam bomba centrífuga, 63% bomba injetora, 14% bomba submersa, 1% compressor, 4% bomba sapo, 4% não possuem bomba e os 4% restantes não informaram o tipo de equipamento utilizado.

Dos 136 poços em condições de produção existem 122 com vazão informada. As classes mais frequentes, correspondem aos intervalos de 0 a 1 m³/h, 1 a 2,5

m<sup>3</sup>/h e 2,5 a 5 m<sup>3</sup>/h representando reunidas cerca de 82% dos poços, enquanto que apenas 1,7% apresentou vazão superior a 15 m<sup>3</sup>/h, como pode ser observado na **tabela 4.20**.

**Tabela 4.20** – Poços do SIG ANA-PHA 2013 com vazão informada em Macapá.

Classe Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
0<x≤1	25	25	0,20	20,49
1<x≤2,5	47	72	0,39	59,02
2,5<x≤5	28	100	0,23	81,97
5<x≤7,5	6	106	0,05	86,89
7,5<x≤10	2	108	0,02	88,52
10<x≤15	6	114	0,05	93,44
x>15	8	122	0,07	100,00
<b>Total</b>	<b>122</b>			

#### 4.1.7 – Regime de Funcionamento dos Poços

Na **tabela 4.21** são mostrados os valores das frequências do número de horas por dia em que são bombeados os poços da área estudada.

Usando o regime de funcionamento informado em 103 poços, o regime médio de funcionamento para todos os poços, do aquífero Tucunaré, ponderado pela frequência do número de horas de bombeamento, nos intervalos de classe, é dado pela expressão:

$$\overline{R}_e = \sum_{j=0}^{11} R_{mj} \times w_j$$

**Tabela 4.21** – Cálculo do regime médio de funcionamento usando 103 dos 126 poços em operação, com regime informado na cidade de Macapá, no aquífero Tucunaré.

Classe Regime de Funcionamento (h/dia)	Frequência Absoluta (FA)	Regime Médio Informado - Re (h/dia)	Frequência relativa - Wj	Regime Médio Estimado - Rm (h/dia)
0<x≤1	2	0,83	0,02	0,02
1<x≤2	6	1,83	0,06	0,11
2<x≤3	2	3,00	0,02	0,06
3<x≤4	3	4,00	0,03	0,12
4<x≤5	1	5,00	0,01	0,05
5<x≤6	1	6,00	0,01	0,06
6<x≤7	0	-	0,00	-
7<x≤8	18	8,00	0,17	1,40
8<x≤9	1	9,00	0,01	0,09
9<x≤10	18	10,00	0,17	1,75
10<x≤11	0	-	0,00	-
11<x≤12	10	12,00	0,10	1,17
12<x≤13	0	-	0,00	-
13<x≤14	2	14,00	0,02	0,27
14<x≤15	9	15,00	0,09	1,31
15<x≤16	7	16,00	0,07	1,09
16<x≤17	0	-	0,00	-
17<x≤18	0	-	0,00	-
18<x≤19	0	-	0,00	-
19<x≤20	5	20,00	0,05	0,97
20<x≤21	0	-	0,00	-
21<x≤22	1	22,00	0,01	0,21
22<x≤23	0	-	0,00	-
23<x≤24	17	23,98	0,17	3,96
<b>Total</b>	<b>103</b>		<b>1,00</b>	<b>12,62</b>

Legenda:

$N = \sum FA$  = número total de poços com regime de funcionamento informado no SIG ANA-PHA (2013).

Frequência Absoluta (FA) = número de poços com regime de funcionamento informado no SIG ANA-PHA (2013) em cada intervalo de classe.

Regime Médio Informado (Rej) = Média de horas de funcionamento dos poços em cada intervalo de classe.

Regime médio ponderado:  $R_{mj} = R_{ej} \times w_j$ .

Frequência Relativa (Wj) = FA/N.

Regime Médio Estimado

$$\overline{R_m} = \sum_{j=1}^{24} R_{mj} \times w_j = 12,62 \text{ horas}$$

Como visto na **tabela 4.21** o regime médio estimado para os poços de Macapá em 2012 é de 12,62 horas por dia, o que equivale a 12h:37min.

#### 4.1.8 – Produção Global dos Poços

Considerando o regime de funcionamento e a vazão média dos diferentes intervalos de classe de vazão apresentados na **tabela 4.22**, obtém-se uma produção estimada de 11.040 m<sup>3</sup>/dia.

**Tabela 4.22** - Produção global estimada para Macapá em 2012, explotada do aquífero Tucunaré.

Classe Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Frequência Absoluta	Frequência Relativa	Vazão Média (m <sup>3</sup> /h)	Efetivo de Poços	Vazão Estimada (m <sup>3</sup> /dia)	Vazão Estimada (m <sup>3</sup> /s)
0<x≤1	27	0,20	0,84	26	274,49	0,003
1<x≤2,5	47	0,39	1,86	49	1141,73	0,013
2,5<x≤5	28	0,23	3,63	29	1326,19	0,015
5<x≤7,5	6	0,05	6,36	6	497,63	0,006
7,5<x≤10	2	0,02	9,25	2	241,12	0,003
x>10	14	0,11	41,43	14	7559,62	0,087
<b>Total</b>	<b>122</b>	<b>1,00</b>		<b>126</b>	<b>11.040,78</b>	<b>0,128</b>

Legenda:

N = número total de poços com vazão informada no SIG ANA-PHA (2013).

Frequência Absoluta (FA) = número de poços com vazão informada no SIG ANA-PHA (2013) em cada intervalo de classe.

Frequência Relativa (FR) = FA/N.

Vazão Média (QM) = média dos valores de vazão informada em cada intervalo de classe.

Efetivo de poços = 126 x FR = número de poços estimado em 2012 no intervalo de classe correspondente ao dos dados informados.

Vazão Estimada (QE) m<sup>3</sup>/dia = QM x RME x Efetivo de poços em cada intervalo de classe.

Vazão Estimada (QE) m<sup>3</sup>/s = QE (m<sup>3</sup>/dia) x Quantidade de segundos em um dia (84.600).

Assim sendo, a produção global de água para os 126 poços em condições de produção atinge 0,128 m<sup>3</sup>/s como visto na **tabela 4.22**. Essa produção representa 14% da recarga potencial direta ou reserva reguladora do aquífero Tucunaré em Macapá. Isso indica que a exploração pode ser ampliada com a construção de novos poços para consumo humano, irrigação e pecuária, como demonstram os resultados adiante analisados no **item 5.2.18**.

A partir dos dados do SIG ANA-PHA 2013 verificou-se a situação operacional dos poços em Macapá da seguinte forma, 7% (10/136) abandonado, 76% (104/136) bombeando e 16% (22/136) equipado, como pode ser observado na **tabela 4.23**.

**Tabela 4.23** - Distribuição dos poços e da produção global com a situação operacional informada.

Poços	Registrados	Operando	Equipado
Número	126	104	22
Percentual	100%	83%	17%
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	0,128	0,106	0,022

Em 2012, com 104 poços em operação a exploração extraia 83% do total, o que corresponde a 0,106 m<sup>3</sup>/s (**tabela 4.23**).

A distribuição espacial da vazão dos poços produtores no aquífero Tucunaré pode ser visualizada na **figura 4.14**, na qual se observa que em grande parte da área as produções estão entre 1,0 e 2,5 m<sup>3</sup>/h, seguido de 2,5 a 5 m<sup>3</sup>/h, enquanto que em pequenas áreas isoladas estão os poços com vazão superior a 10 m<sup>3</sup>/h.

Quanto ao uso da água subterrânea para os 136 poços em Macapá, verifica-se que 90% são destinados ao abastecimento; 1% ao abastecimento múltiplo; e os 9% restantes sem informação.

Mediante análise do cadastro SIG ANA-PHA 2013, observou-se que, 78% dos poços possuem indicação do tipo de reservatório que utilizam para armazenamento da água explotada. De acordo com os dados da **tabela 4.24**, a maioria dos poços possui armazenamento em caixa de fibra de vidro (92%), seguido de caixa de polipropileno (3%), caixa de concreto (2%), caixa de plástico (2%) e tijolos (1%).

**Tabela 4.24** – Tipos de reservatório de água de poços em Macapá - AP.

Reservatórios	Nº	Caixa d'água de polipropileno	Caixa d'água de concreto	Caixa d'água de fibra de vidro	Caixa d'água de plástico	Tijolos
Registros	106	03	02	98	02	01
Percentual	100%	3%	2%	92%	2%	1%

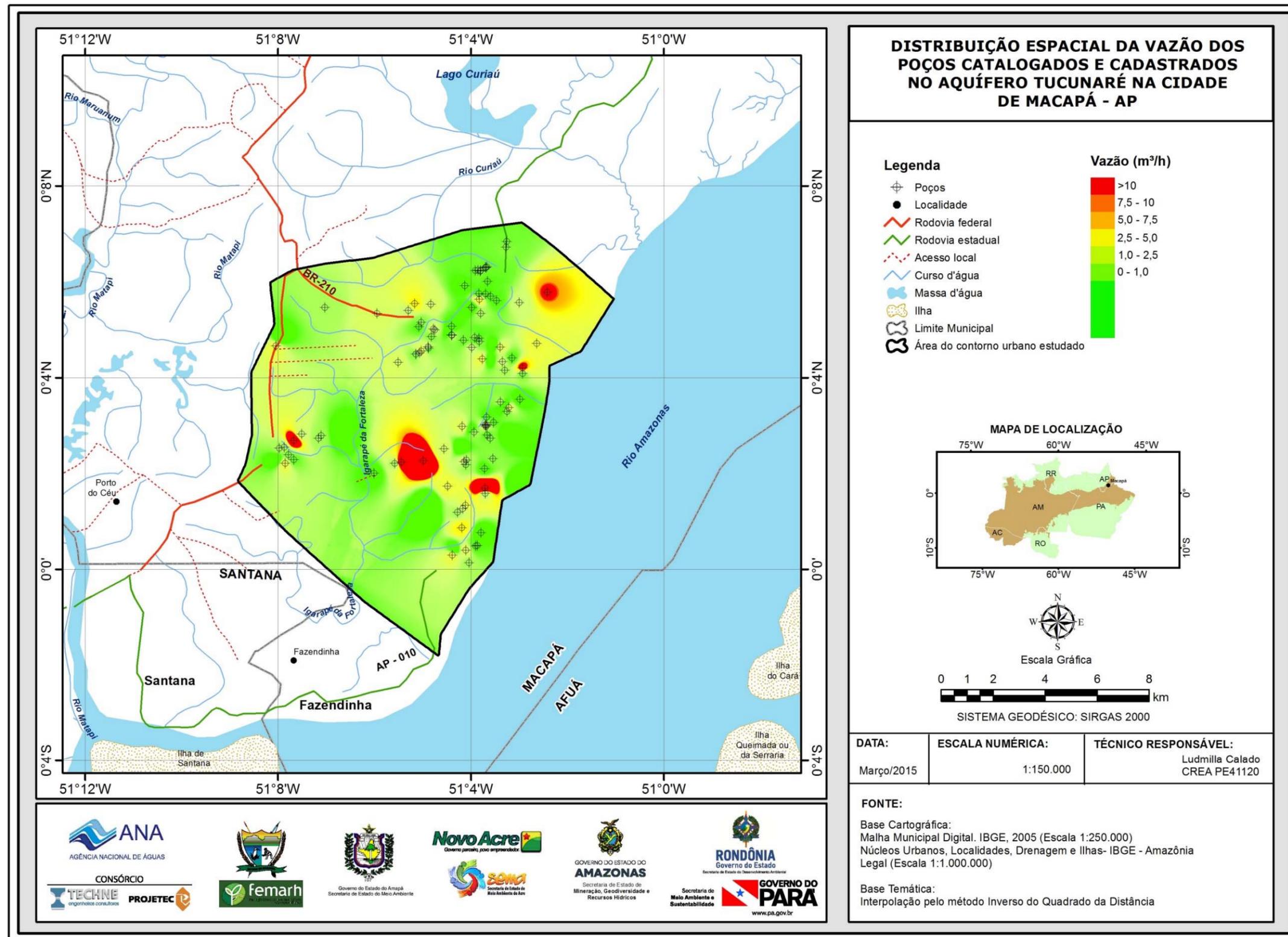


Figura 4.14 – Distribuição espacial da vazão dos poços cadastrados e catalogados na região de Macapá – AP.

## **5 - Hidrogeoquímica**

## 5.1 – Introdução

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas subterrâneas, do Aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, foram realizadas duas campanhas de amostragem: uma no período chuvoso (abril de 2012) e outra no período seco (outubro de 2012), com defasagem de 6 (seis) meses.

Ambas as campanhas seguiram as metodologias recomendadas por Barcelona *et al.* (1985), Puls & Barcelona (1989), Keith (1996), Feitosa & Manoel Filho (2000) e Nielsen & Nielsen (2007). Além dessas referências, também foi utilizado o Protocolo de Guia de Coleta de Amostra (GCA), elaborado pelo laboratório Bioagri Ambiental, que pode ser visualizado no **Anexo 7.4**.

Os Laboratórios responsáveis pelas análises na cidade de Macapá, juntamente com os poços avaliados, o quantitativo de amostras, os tipos de análises e os parâmetros analisados, encontram-se listados abaixo:

### **Laboratório da Bioagri Ambiental:**

- 30 (trinta) Análises Físico-Químicas e Bacteriológicas - cor, turbidez, condutividade elétrica (CE), temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD), pH, Eh, sódio, potássio, cálcio, magnésio, dureza, cloreto, sulfato, bicarbonato, nitrogênio (amoniacal, orgânico e total), nitrito, nitrato, ferro e manganês, Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli), nos poços 1 a 30;
- 10 (dez) Análises de Metais Pesados - arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel, zinco, nos poços: 2, 4, 7, 10, 14, 16, 18, 21, 23 e 28;
- 10 (dez) Análises de BTEX e Fenóis - benzeno, tolueno, etilbenzeno, o-Xileno e m,p-Xileno, índice de fenóis nos poços: 2, 4, 7, 10, 14, 16, 18, 21, 23 e 28.

### **Laboratório de Geocronologia do Instituto de Geociências da UnB:**

- 04 (quatro) Análises de Isótopos Ambientais Estáveis - deutério e oxigênio-18, nos poços: 1, 8, 14 e 26.

### **Laboratório do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CTDN), da UFMG:**

- 07 (sete) Análises do Isótopo Ambiental Radioativo - trício, nos poços: 1, 3, 4, 8, 14, 19 e 26.

### **Laboratório Beta Analytic, da Flórida - USA:**

- 02 (duas) Análises do Isótopo Ambiental - carbono 14, nos poços: 31 e 32.

Os resultados dessas análises para as duas campanhas podem ser verificados no **Anexo 7.3**.

### 5.1.1 - Critérios de seleção para as amostragens

Como resultado do levantamento dos dados previsto no **item 6.2.1** e posterior cadastramento *in situ* previsto no **item 6.3** dos TDRs, foram selecionados pela Consultora em comum acordo com a CTAF - Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização do Projeto PHA, os poços para as análises quantitativa e qualitativa do aquífero Tucunaré na cidade de Macapá.

Para a seleção dos poços foram adotadas as 07 (sete) condições apresentadas no **item 6.4.2.1** dos TDRs, quais sejam:

1. Devem ser predominantemente poços produtores;
2. Deve-se ter a anuência do proprietário para a coleta no poço;
3. Deve captar prioritariamente um sistema aquífero único;
4. Deve estar distribuído o mais uniformemente possível em relação aos demais, de modo a constituírem uma amostragem representativa da região estudada;
5. Os poços devem possuir perfil construtivo e litológico;
6. Os poços devem ser georreferenciados com GPS com altímetro barométrico (precisão planimétrica mínima de 1,0 metro; precisão altimétrica mínima de 3,0 metros);
7. Os poços devem ser equipados com bomba e ligados a rede de energia.

A seleção propriamente dita para a cidade de Macapá foi feita através de consulta a uma macro em VBA Excel, aplicada à matriz do cadastro geral (SIG ANA PHA 2013) através da qual foram selecionados todos os poços com o maior número de critérios atendidos, na área de estudo.

Em relação às análises de metais pesados, BTEX e Fenóis também se observou o critério do poço estar situado em locais próximos de potenciais fontes de contaminação como, por exemplo, indústrias de transformação, postos de combustível, estabelecimentos comerciais, entre outros, em consonância com o **item 6.4.3.2** dos TDRs.

Quanto à seleção dos poços para as análises de isótopos ambientais estáveis e radioativos foram feitas pela Consultora em definição conjunta com a CTAF, conforme consta no **item 6.4.3.2** dos TDRs, sempre com a preocupação de não coletar amostras em poços equipados com sistemas de bombeamento *air-lift* para evitar possíveis alterações nos resultados das análises, devido à presença de bolhas de ar.

#### **Localização dos pontos amostrados**

A distribuição espacial dos poços amostrados em Macapá é apresentada para as análises físico-químicas e bacteriológicas na **figura 5.1**; para as análises de metais pesados, BTEX e Fenóis, na **figura 5.2**, e finalmente para os isótopos ambientais ( $\delta^{18}O, \delta^2He, ^3H$ ) na **figura 5.3**.

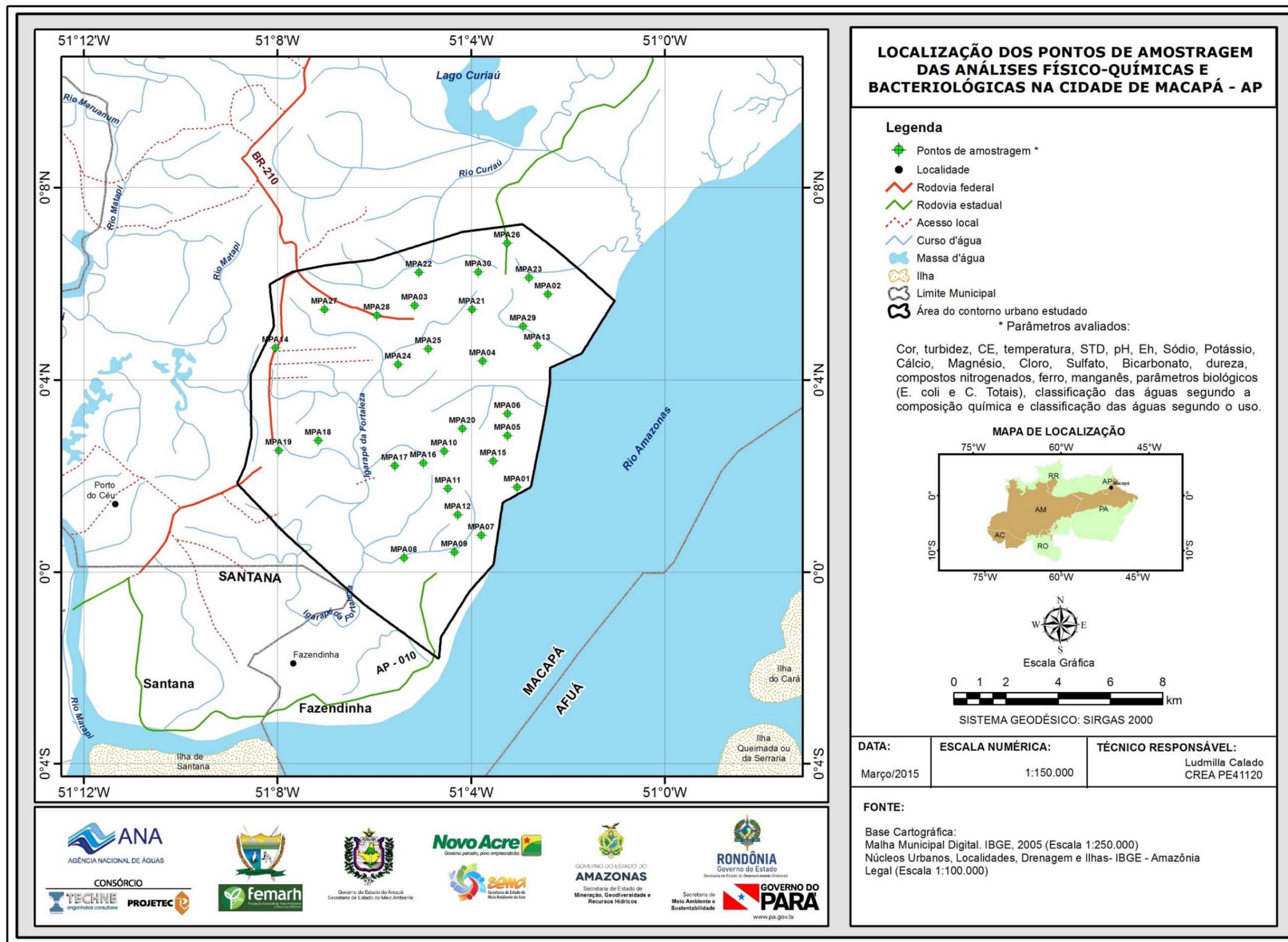


Figura 5.1 – Localização dos pontos de amostragem das análises físico-químicas e bacteriológicas no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá - AP.

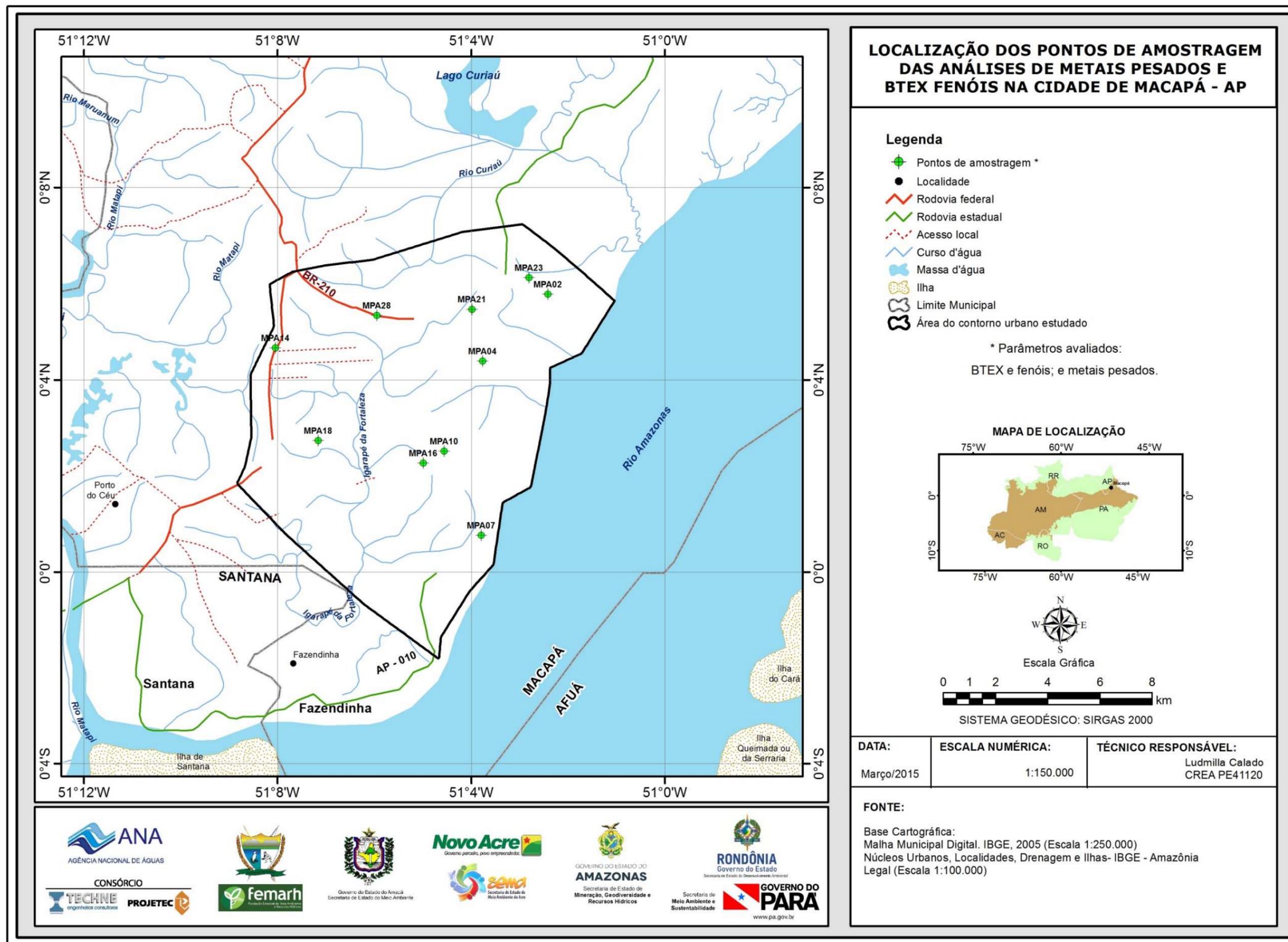


Figura 5.2 – Localização dos pontos de amostragem das análises de metais pesados e BTEX fenóis no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá - AP.

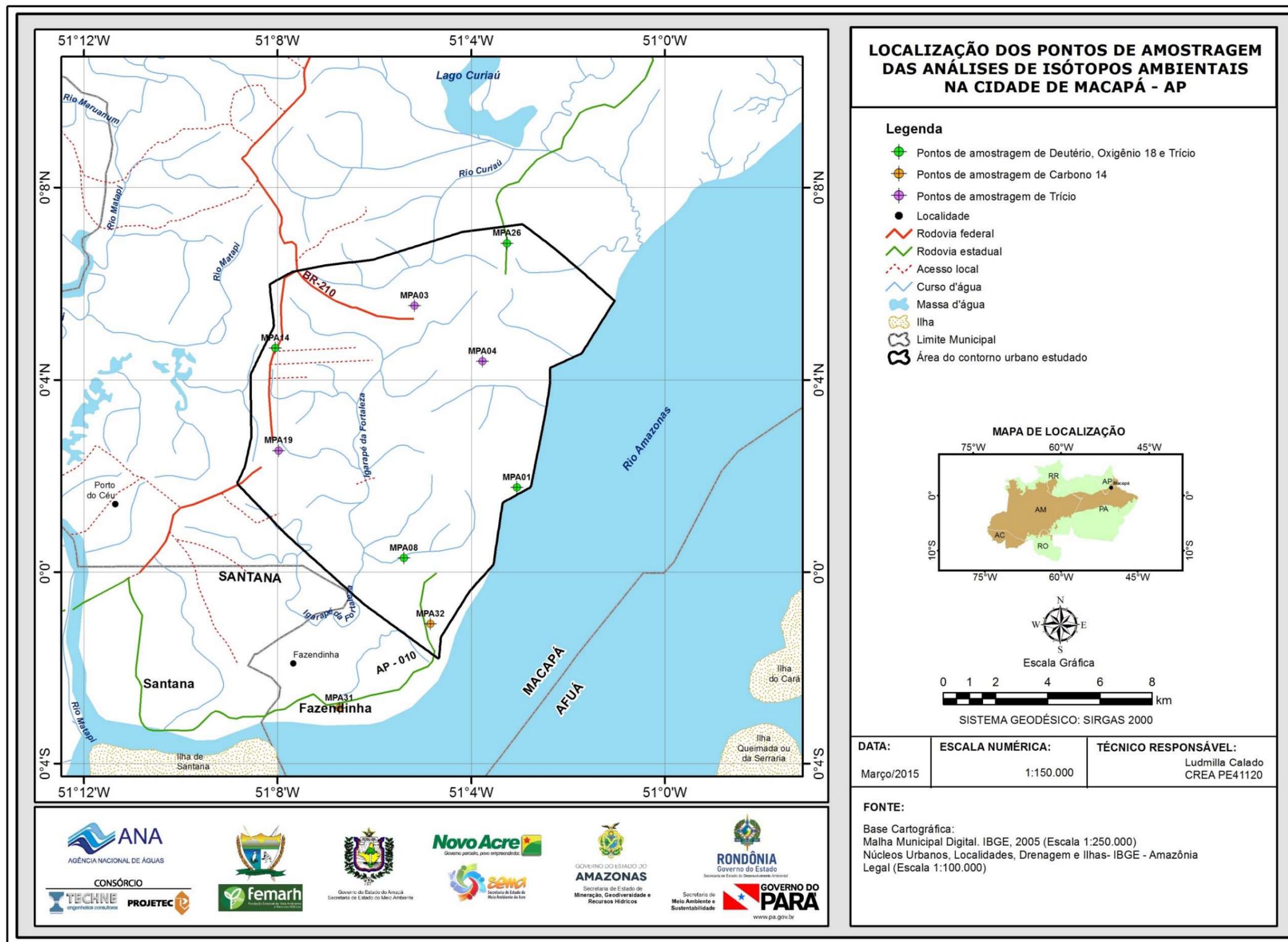


Figura 5.3 – Localização dos pontos de amostragem das análises de isótopos ambientais no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá - AP.

### 5.1.2 - Procedimentos de Coleta

Para a coleta em campo na cidade de Macapá, o Laboratório Bioagri forneceu aos grupos, acondicionados em caixas de isopor, cinco kit's de coletas, cada um deles para a amostragem de um poço, contendo: quatro frascos para coletas das análises físico-químicas, um frasco para a coleta das análises bacteriológicas, uma esponja dupla face, dois pares de luvas, uma fita crepe, três sacos plásticos grandes, as fichas do laboratório para as informações das coletas e dois kit's extras para um eventual problema durante a amostragem, como pode ser observado na **foto 5.1**.



**Foto 5.1** – Kit's de coletas usados em campo para as amostragens de água do aquífero Tucunaré, nas duas campanhas, na cidade de Macapá - AP.

Nas coletas das análises físico-químicas e bacteriológicas foram utilizados cinco frascos de polietileno para cada poço, sendo um de 500 mL, dois de 250 mL, um de 150 mL e um de 100 mL. Todos os frascos foram abertos somente no ato da coleta, preenchidos com as amostras de água e imediatamente preservados em refrigeração e suas análises realizadas no prazo de 48 horas. Nos frascos para as análises químicas da série nitrogenada (nitrogênio amoniacal e nitrogênio Kjeldahl Total), além das preservações das amostras em refrigeração, foram adicionados volumes de ácido sulfúrico.

Para as análises bacteriológicas, todos os frascos foram autoclavados, contendo uma partilha de tiosulfato de sódio, sendo acondicionado em isopor com gelo para preservação, logo após a coleta, pelo prazo de 24 horas, até a realização da análise.

Para as análises isotópicas de  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$ , as amostras foram armazenadas em frascos plásticos (100 mL) de polipropileno, tendo-se o cuidado de não deixar qualquer bolha permanecer no recipiente para evitar alterações nos resultados.

### 5.1.3 - Métodos de Análise

As metodologias de análise utilizadas pelo laboratório Bioagri Ambiental para os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos foram os seguintes:

**Cor** - POP PA 012 (Rev.02) / SMWW 2120 C;

**Condutividade Elétrica** - POP PA. 014 (Rev.00) / SMEWW 2510;

**Dureza** - POP PA 027 / SMWW 2340 A, B, C;

**Turbidez** - POP PA 013 (Rev.03) / SMWW 2130 B;

**Sólidos Totais Dissolvidos (STD)** - POP PA 009 (Rev.04) / SMWW 2540C;

**pH** - POP PA 011 (Rev.03) / SMWW 4500 – H+ B;

**Alcalinidade** - POP PA 026 / SMWW 2320B;

**Bicarbonato** - SMEWW 4500-CO<sub>2</sub>;

**Ânions** - POP PA 032 / USEPA SW 846 – 300.1. *Determination of Inorganic Anions in Drinking Water by Ion Chromatography*;

**Metais** (ICP-MS) - POP PA 038 (Rev.01) / SMWW 3125 B, *Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometry/USEPA 6020*;

**Nitrogênio Total** - Soma do NTK, NO<sub>3</sub> e NO<sub>2</sub>;

**Nitrogênio Total Kjeldahl** - POP PA 007 / SMEWW 4500 Norg C;

**Nitrogênio Amoniacal** - POP PA 005 /SMEWW 4500 - NH<sub>3</sub>- D- *Ammonia - Selective Electrode Method*;

**Coliformes** - POP PA 040 (Ver. 05) / SMEWW 9223 B;

**Carbono 14** - *Accelerate Mass Spectrometry (AMS)*.

O controle de qualidade do laboratório se baseou na Resolução CONAMA 396/2008 para o limite quantitativo praticável padrão para todas as amostras das águas subterrâneas que foram submetidas às análises físico-químicas e bacteriológicas. O controle de qualidade dos metais totais das amostras foi realizado pelo Branco de Análise para sódio, potássio, cálcio e magnésio, todos com limites quantificáveis de 10 µg/L; e manganês e ferro nos limites quantificáveis de 0,1 µg/L; e os resultados analisados por *Inductively Coupled Plasma* (ICP/MS) foram (< 10 µg/L) para sódio, potássio, cálcio e magnésio e (< 0,1 µg/L) para manganês e ferro.

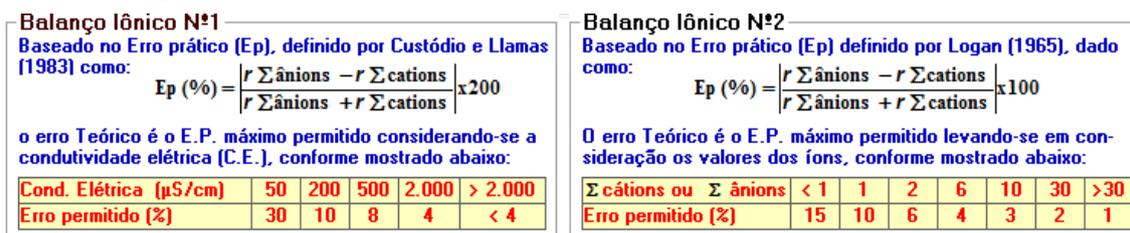
No ensaio do Branco de Análise, à amostra controle e às amostras dos 30 poços foram adicionados 50% de ítrio e recuperados por análise de (ICP/MS) e todos ficaram na faixa do limite aceitável que é de 70 a 130%. Enquanto que para os ensaios de recuperação analisados por ICP/MS foram adicionados 10 µg/L dos metais (lítio, vanádio, cobalto, zinco, molibdênio, antimônio e chumbo) e foram recuperados para cada metal 80% das alíquotas adicionadas que fica na faixa aceitável de recuperação que está o intervalo de (80 a 120%).

O Limite de Quantificação da Amostra (LQ) pode variar no mesmo parâmetro, pois consiste no resultado obtido entre o Limite de Quantificação do Método (LQM), multiplicado pelo fator de preparo da amostra, multiplicado pela correção da base seca, quando aplicável.

No ensaio de Carbono-14 os resultados são apresentados no padrão convencional de radiocarbono Idade Anos BP (*before present*), que representa o "radiocarbono medido Idade BP", de duas maneiras: Percentual de Carbono Moderno (pMC), que indica a média do resultado de biomassa (expressa em %), para menos de 200 anos BP; e Fração de Carbono Moderno (Fmdn).

#### 5.1.4 - Balanço Iônico

Os resultados das análises físico-químicas das duas campanhas de amostragem foram submetidos a avaliações, pelo cálculo do balanço de cátions e ânions, por meio do *software Qualigraf* desenvolvido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2010), o qual determina o Erro Prático (Ep) segundo as metodologias de Custódio & Llamas (1983) no balanço iônico nº 1 e Logan (1965) no balanço iônico nº 2, como mostra a **figura 5.4**.



**Figura 5.4** – Equações utilizadas no *software Qualigraf* para estimativa do erro prático no balanço iônico, segundo as metodologias de Custódio & Llamas (1983) e Logan (1965).

Segundo essas referências, a metodologia do balanço iônico nº 1 estabelece Ep máximo de 30% levando em consideração o valor de condutividade elétrica, ao passo que a metodologia do balanço iônico nº 2 define Ep limite de 15% observando os valores de íons.

#### Período Chuvoso

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que no período chuvoso (abril de 2012), 13,3% (4/30) das amostras coletadas no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá, apresentaram Ep dentro dos critérios da metodologia do balanço iônico nº 1. Enquanto que 20% (6/30) das amostras obtiveram Ep inferior a 15%, sendo considerada correta apenas segundo a metodologia nº 2.

Assim, 86,7% (26/30) das amostras pelo método 1 e (24/30) 80% pelo método 2 apresentam Ep superiores aos limites definidos, não sendo considerados válidos em ambos os balanços iônicos (**tabela 5.1**).

**Tabela 5.1** – Resultado do balanço iônico realizado no Qualigraf para as amostras coletadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – abril de 2012.

Poço	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Soma Cátions (meq/L)	Soma Ânions (meq/L)	Erro Prático - Ep (%)	
				Balanço Iônico nº1	Balanço Iônico nº2
MPA01	95	0,61	0,26	80,17	40,08
MPA02	85	0,77	0,39	65,36	32,68
MPA03	57	0,33	0,36	9,26	4,63
MPA04	200	1,37	1,08	23,47	11,74
MPA05	46	0,19	0,37	64,35	32,18
MPA06	267	1,93	1,47	26,71	13,35
MPA07	210	1,49	0,96	42,91	21,46
MPA08	132	0,81	0,65	22,49	11,25
MPA09	125	0,67	0,4	51,53	25,76
MPA10	121	0,75	0,55	30,75	15,38
MPA11	57	0,36	0,31	17,67	8,84
MPA12	75	0,31	0,11	92,19	46,09
MPA13	220	1,84	0,89	69,33	34,67
MPA14	107	0,62	0,44	33,41	16,7
MPA15	190	1,35	0,65	70,16	35,08
MPA16	259	2,31	1,38	50,6	25,3
MPA17	53	0,32	0,19	50,12	25,06
MPA18	145	0,62	0,41	40,88	20,44
MPA19	83	0,43	0,32	28,68	14,34
MPA20	74	0,38	0,23	47,6	23,8
MPA21	172	0,72	0,22	108,19	54,1
MPA22	67	0,49	0,22	75,64	37,82
MPA23	171	0,29	0,11	93,79	46,9
MPA24	51	0,29	0,17	55,11	27,55
MPA25	211	1,09	0,84	25,99	12,99
MPA26	124	0,62	0,53	16,04	8,02
MPA27	238	1,19	0,7	52,55	26,27
MPA28	274	1,52	0,8	61,79	30,9
MPA29	166	0,97	0,63	42,28	21,14
MPA30	181	1,06	1,01	4,1	2,05

Legenda:

Valores destacados em vermelho possuem os maiores Ep de acordo com os critérios estabelecidos nas metodologias do balanço iônico nº 1 e nº 2, respectivamente.

### **Período de Estiagem**

Segundo os dados coletados no período seco (outubro de 2012), observa-se que 20% (6/30) das amostras obtiveram resultados dentro dos padrões de Ep consideradas como apropriadas na metodologia nº 1 de balanço iônico. Igualmente, apenas 20% (6/30) das amostras ficaram abaixo do limite de erro

permitido pela metodologia nº 2. Assim, 80% (16/30) das amostras não foram consideradas corretas, haja vista que apresentaram Ep fora dos limites permissíveis estabelecidos nos dois balanços iônicos, como demonstra a **tabela 5.2**.

**Tabela 5.2** – Resultado do balanço iônico realizado no Qualigraf, para as amostras coletadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – outubro de 2012.

Poço	CE (µS/cm)	Soma Cátions (meq/L)	Soma Ânions (meq/L)	Erro Prático - Ep (%)	
				Balanço iônico nº1	Balanço iônico nº2
MPA01	98	0,71	0,34	70,51	35,26
MPA02	131	1,3	0,42	102,77	51,39
MPA03	19	0,11	0,05	72,01	36,01
MPA04	127	0,88	0,42	71,9	35,95
MPA05	151	1,12	0,61	59,39	29,7
MPA06	236	1,22	0,68	57,28	28,64
MPA07	116	0,67	0,42	44,9	22,45
MPA08	21	0,22	0,08	94,74	47,37
MPA09	13	0,07	0,05	40,00	20,00
MPA10	144	1,28	0,5	87,48	43,74
MPA11	164	1,2	0,57	71,68	35,84
MPA12	183	1,21	0,9	29,27	14,64
MPA13	119	0,85	0,34	85,61	42,8
MPA14	11	0,11	0,13	20,88	10,44
MPA15	71	0,37	0,34	8,26	4,13
MPA16	138	1,14	0,39	98,67	49,34
MPA17	19	0,13	0,08	46,54	23,27
MPA18	17	0,15	0,07	75,19	37,59
MPA19	111	0,56	0,26	73,01	36,5
MPA20	98	0,12	0,17	39,66	19,83
MPA21	22	0,11	0,09	13,6	6,8
MPA22	124	0,22	0,07	99,2	49,6
MPA23	31	0,28	0,31	9,02	4,51
MPA24	50	0,36	0,11	106,82	53,41
MPA25	40	0,22	0,11	70,85	35,43
MPA26	13	0,06	0,06	6,28	3,14
MPA27	15	0,05	0,05	1,00	0,50
MPA28	16	0,09	0,19	70,21	35,11
MPA29	33	0,17	0,07	90,64	45,32
MPA30	158	1,25	0,57	75,22	37,61

Legenda:

Valores destacados em vermelho possuem os maiores Ep de acordo com os critérios estabelecidos nas metodologias do balanço iônico nº 1 e nº 2, respectivamente.

Os resultados de Ep superiores a 30% podem indicar erro analítico ou de cálculo, presença de certos íons não analisados na água em concentrações apreciáveis e/ou águas pouco mineralizadas, tais como água da chuva.

Os métodos analíticos padrões para baixas concentrações iônicas podem levar a valores elevados de erros (Ep %), sem que isso indique necessariamente um erro de análise ou de cálculo (Schoeller, 1955 *apud* Feitosa & Manoel Filho, 2000). Na cidade de Macapá, as águas do aquífero Tucunaré, se enquadram como pouco mineralizadas, uma vez que os teores de STD alcançam no máximo 229 mg/L no período chuvoso e 159 mg/L no período de estiagem, quando o VMP desse parâmetro, para consumo humano, segundo a Portaria MS 2914/2011, é de 1.000 mg/L.

Convém destacar ainda que as concentrações de STD, assim como, dos íons sódio ( $Na^+$ ), Cloreto ( $Cl^-$ ) e sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) foram expressas em partes por bilhão (ppb) ou  $\mu g/L$ . Além disso, alguns valores situados abaixo do limite de detecção, indicados, por exemplo, como (<1) foram considerados no cálculo do erro, como 1  $\mu g/L$  (o valor pode ser qualquer outro abaixo de 1) e para a base de cálculo a concentração foi convertida para mg/L (ppm).

Conclui-se, assim, que os erros detectados não comprometem os resultados analíticos obtidos.

#### 5.1.5 - Índice de Troca de Bases (ITB)

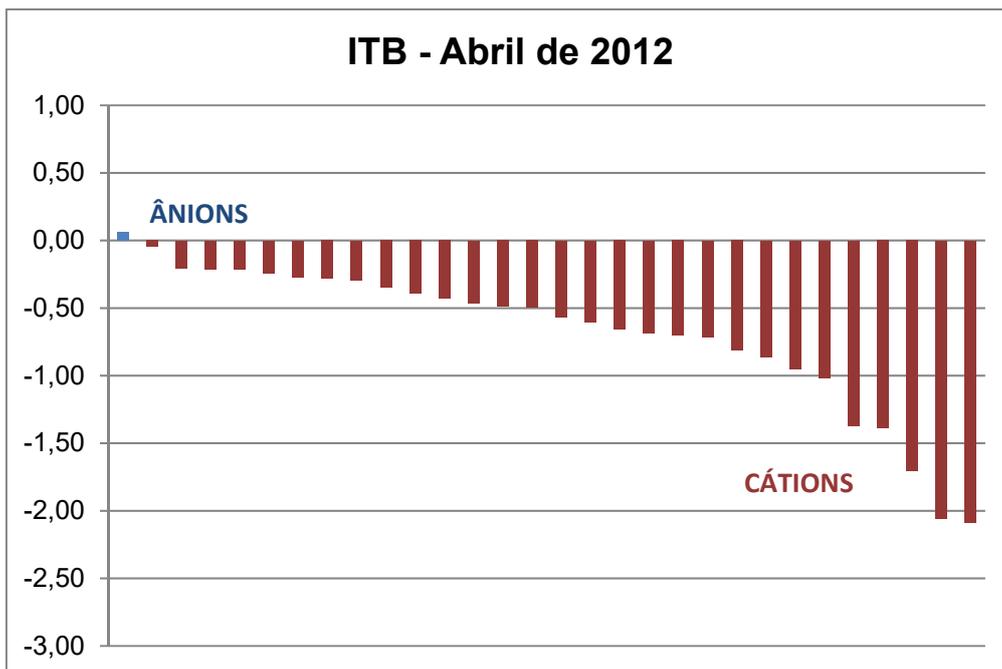
O ITB, também chamado Índice de Desequilíbrio, permite avaliar o grau de troca iônica ocorrido numa água com base nas relações entre os seus íons. Esse índice foi definido por meio da equação de Schoeller (1962), onde o símbolo *r* representa os valores em meq/L, como pode ser observado abaixo:

$$itb = \frac{rCl - r(Na + K)}{rCl}$$

De acordo com os resultados de ITB calculados verifica-se que apenas 3% (1/30) das amostras forneceram valores positivos, indicando o predomínio de cátions nas águas que ali circulam, enquanto que 97% (29/30) apresentaram valores negativos na coleta de abril de 2012 (**tabela 5.3** e **figura 5.5**). Isto revela maior presença dos íons alcalinos (sódio e potássio) em relação ao íon cloreto em solução, o que sugere o abrandamento das águas subterrâneas, ou seja, troca de  $Ca^{++}$  e  $Mg^{++}$  por  $Na^+$ .

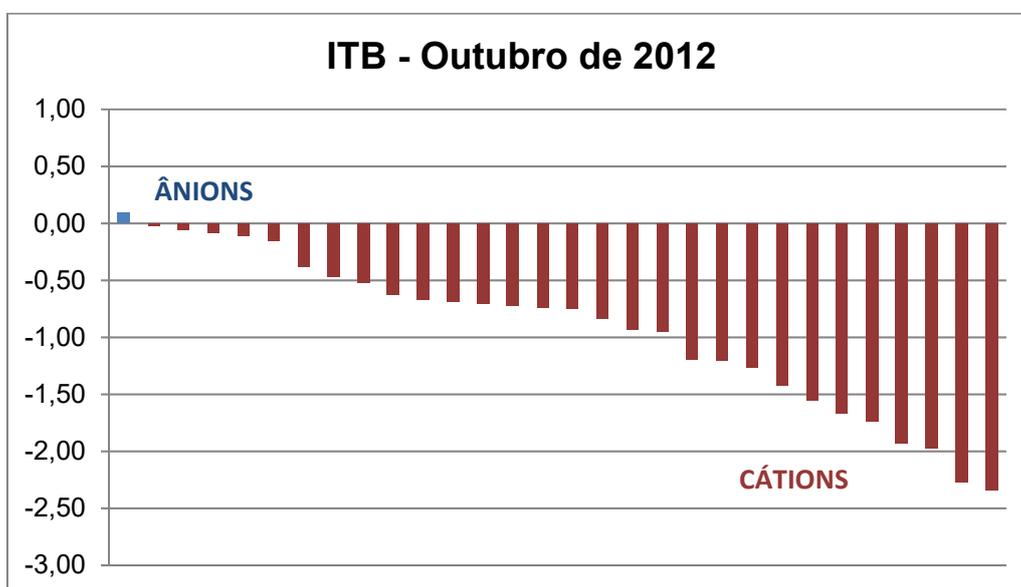
**Tabela 5.3 – Resultado do Índice de Troca de Bases para as amostras coletadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá nas duas campanhas.**

Poço	ITB - abril de 2012 (meq/L)	ITB - outubro de 2012 (meq/L)
MPA01	-1,37	-0,75
MPA02	-2,09	-2,34
MPA03	-0,21	-0,62
MPA04	-0,49	-1,93
MPA05	-2,06	-0,70
MPA06	-0,27	-0,69
MPA07	-0,46	-0,46
MPA08	-0,21	-0,11
MPA09	-0,39	-0,38
MPA10	-0,71	-1,55
MPA11	-0,21	-0,93
MPA12	-0,66	-0,74
MPA13	-0,43	-1,20
MPA14	-0,29	0,09
MPA15	-1,02	-0,06
MPA16	-0,60	-1,66
MPA17	-0,70	-0,15
MPA18	0,06	-0,52
MPA19	-0,24	-1,42
MPA20	-0,57	-0,95
MPA21	-1,39	-0,67
MPA22	-0,82	-1,97
MPA23	-1,71	-1,26
MPA24	-0,86	-2,27
MPA25	-0,28	-1,19
MPA26	-0,95	-0,02
MPA27	-0,50	-0,08
MPA28	-0,69	-0,83
MPA29	-0,35	-1,74
MPA30	-0,05	-0,72



**Figura 5.5** – Ilustração dos resultados de ITB calculados para as amostras coletadas no Aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, no período chuvoso, com o predomínio de cátions.

Na coleta de outubro de 2012, 3% (1/30) das amostras apresentaram valores positivos, ao passo que 97% (29/30) obtiveram resultados negativos, como pode ser visualizado na **tabela 5.3**. Tais resultados refletem a maior presença de cátions nas águas (**figura 5.6**).



**Figura 5.6** – Ilustração dos resultados de ITB calculados para as amostras coletadas no Aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, no período de estiagem, com o predomínio de cátions.

Os valores de ITB obtidos nas águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, nas duas campanhas estão coerentes, pois segundo Teixeira (2002), o enriquecimento em alcalinos, aumenta a diferença  $Cl-(Na + K)$ , numerador na equação de Schoeller (1962), o que torna mais negativos os valores de ITB.

Na **tabela 5.4** é apresentada a estatística descritiva dos resultados de ITB calculados, onde se verifica que os valores mínimo e máximo obtidos foram de -2,09 e 0,06; -2,34 e 0,09 para as coletas de abril e outubro de 2012, respectivamente.

**Tabela 5.4** – Parâmetros estatísticos dos resultados do Índice de Troca de Bases para as amostras coletadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá nas duas campanhas.

Parâmetros Estatísticos	ITB (Abril de 2012)	ITB (Outubro de 2012)
Média	-0,68	-0,93
Erro padrão	0,10	0,13
Mediana	-0,53	-0,74
Desvio padrão	0,55	0,69
Variância da amostra	0,30	0,47
Curtose	1,16	-0,62
Assimetria	-1,28	-0,48
Intervalo	2,15	2,43
Mínimo	-2,09	-2,34
Máximo	0,06	0,09
Soma	-20,51	-27,84
Contagem	30	30
Nível de confiança (95%)	0,21	0,26

Os resultados de ITB negativos obtidos em ambas as campanhas são justificáveis por conta dos elevados índices pluviométricos da região amazônica que favorecem a diluição dos compostos químicos em solução na água, o que implica no abrandamento das águas com troca de cálcio e magnésio por sódio, tanto no período chuvoso quanto na estiagem.

### 5.1.6 - Razões Iônicas

As razões iônicas são as relações entre os íons dissolvidos em uma água que pode guardar certa ligação com o terreno do qual procede à água, indicando a ação de fenômenos modificadores ou sugerindo alguma característica específica.

De acordo com Hem (1985), o estudo de razões iônicas é importante para a classificação e interpretação hidrogeoquímica das águas subterrâneas, para tanto, estabelece as principais razões iônicas e seus significados. Algumas dessas razões (adimensionais) entre íons são expressas em meq/L como indica o símbolo  $r$  nas equações apresentadas na **tabela 5.5**.

**Tabela 5.5** – Principais razões iônicas e seus significados segundo Hem (1985).

Razões Iônicas	Variações Teóricas	Significado
$\frac{rMg^{2+}}{rCa^{2+}}$	0,25 a 0,33	Água de circulação em rocha de composição granítica
	0,33 a 1,5	Águas continentais
	> 0,9	Contato com água do mar ou fluxo através de rocha básica; possível influência de terrenos dolomíticos
	> 1	Relações com litotipos ricos em silicatos magnesianos
	$\pm 5$	Água do mar
$\frac{rNa^+}{rCl^-}$	< 0,0876	Água do mar; substituição de $Na^+$ por $Ca^{+2}$ e $Mg^{+2}$
	< 0,7	Precipitações de sais de $Na^+$
	> 0,7	Fluxo através de rochas cristalinas ou vulcânicas
$\frac{rCl^-}{rHCO_3^-}$	0,5	Fluxo normal para rochas cristalinas
	0,1 a 0,5	Águas continentais
	20 a 50	Água do mar

A **tabela 5.6** mostra os resultados das principais razões iônicas para as duas campanhas, realizadas no período chuvoso (abril de 2012) e no período seco (outubro de 2012).

A razão  $rMg^{2+}/rCa^{2+}$  indica que 73% e 83% dos poços, respectivamente, para a primeira e segunda campanha, contém águas continentais que possivelmente sofrem influência de terrenos dolomíticos.

A razão  $rNa^+/rCl^-$  sugere em ambas as campanhas, que 100% dos poços, contém águas que possuem fluxo através de rochas cristalinas ou vulcânicas.

A razão iônica  $rCl^-/rHCO_3^-$  mostrou que 83% e 80% dos poços no período chuvoso e de estiagem, respectivamente, contém águas com ausência de íon bicarbonato.

Excetuando, talvez, a sugestão de que as águas do aquífero Tucunaré são continentais, tudo indica que as demais conclusões não se aplicam ao caso de Macapá, onde as águas subterrâneas, oriundas, sobretudo, de infiltrações de águas de chuva, são muito diluídas e dificilmente podem ter sofrido influências de trocas iônicas com as rochas regionais, que, aliás, são sedimentares e não cristalinas. Na verdade, os valores mais altos, inclusive os anômalos dos constituintes iônicos maiores, seguramente resultam de contaminação pela ausência de esgotamento sanitário, que produz desvios muito fortes nos dados coletados. Além desse fato, em Macapá ocorre o fenômeno da ressaca que eleva os constituintes maiores, principalmente a razão  $rNa^+/rCl^-$ .

**Tabela 5.6** – Resultado das razões iônicas para as amostras coletadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá nas duas campanhas.

Poço	Razões Iônicas - Período chuvoso			Razões Iônicas - Período seco		
	$\frac{rMg^{2+}}{rCa^{2+}}$	$\frac{rNa^+}{rCl^-}$	$\frac{rCl^-}{rHCO_3^-}$	$\frac{rMg^{2+}}{rCa^{2+}}$	$\frac{rNa^+}{rCl^-}$	$\frac{rCl^-}{rHCO_3^-}$
MPA01	1,89	1,17	0,00	0,17	0,82	0,00
MPA02	0,53	1,71	0,00	1,20	0,99	0,00
MPA03	1,33	1,39	0,00	0,64	1,00	0,00
MPA04	1,16	1,70	0,00	0,20	1,09	0,00
MPA05	0,51	1,24	0,00	0,34	1,29	0,00
MPA06	0,43	1,37	0,00	1,48	1,35	0,00
MPA07	0,36	0,79	0,00	0,23	1,44	0,00
MPA08	0,39	1,00	0,00	0,23	1,59	0,00
MPA09	0,58	2,08	0,00	0,93	1,60	0,00
MPA10	0,55	1,18	0,00	1,56	1,61	0,00
MPA11	4,07	2,33	0,00	0,45	1,62	0,00
MPA12	5,03	1,17	0,00	0,56	1,81	0,00
MPA13	2,04	1,24	0,00	1,54	2,08	0,00
MPA14	0,11	1,20	0,00	0,55	2,10	0,00
MPA15	0,93	1,21	0,00	1,63	2,30	0,00
MPA16	0,18	1,35	0,00	0,41	2,57	0,00
MPA17	0,36	1,23	0,00	0,80	2,59	0,00
MPA18	0,19	1,75	0,00	0,68	2,83	0,00
MPA19	1,50	1,83	0,00	1,06	3,18	0,00
MPA20	4,45	2,90	0,40	1,16	1,60	0,00
MPA21	8,64	1,86	1,42	0,34	0,94	0,00
MPA22	1,34	3,07	2,47	0,84	3,28	0,00
MPA23	6,21	1,16	2,53	0,29	1,42	0,00
MPA24	0,46	1,68	3,12	0,69	2,54	0,00
MPA25	1,05	1,39	4,04	4,12	2,78	0,00
MPA26	2,07	1,52	0,00	0,35	1,59	0,18
MPA27	0,81	1,57	0,00	3,07	1,49	0,29
MPA28	0,49	1,22	0,00	0,12	0,83	0,50
MPA29	1,16	2,63	0,00	0,51	2,18	0,63
MPA30	1,27	0,83	0,00	0,35	1,56	2,55

### 5.1.7 - Índice de Langelier

O índice de Langelier, também conhecido como índice de saturação (IS), é utilizado para verificar se uma água está ou não em equilíbrio com a calcita (carbonato de cálcio sólido)  $CaCO_{3(s)}$ , dependendo de o seu valor ser positivo ou negativo.

O IS é definido como a diferença entre o pH real (medido) da água e o pH hipotético pHs (pH de saturação) que a água teria se estivesse em equilíbrio com a calcita  $CaCO_{3(s)}$ . A determinação do pH de saturação (pHs) é feita a partir dos parâmetros de temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD), dureza e alcalinidade total.

O IS pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$IS = pH - pHs$$

O pH de saturação é calculado pela seguinte equação:

$$pHs = 9,3 + A + B - C - D, \text{ sendo:}$$

$A = 0,1 \times \log(\text{STD}) - 1$	$B = -13,12 \times \log(T + 273) + 34,55$
$C = \log(\text{dureza}) - 0,4$	$D = \log(\text{alcalinidade})$

A classificação da tendência das águas de acordo com o IS é apresentada na **tabela 5.7**.

**Tabela 5.7** – Faixas do IS segundo Snoeyink & Jenkins (1980).

IS	Possível tendência da água
>0	Água supersaturada - tende a precipitar calcita $CaCO_{3(s)}$
0	Estável - água em equilíbrio com o $CaCO_{3(s)}$
<0	Água subsaturada - tende a dissolver a calcita $CaCO_{3(s)}$

Os valores de IS calculados com base nas amostras de água subterrânea coletadas no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá, no período chuvoso (abril de 2012) e no período seco (outubro de 2012), podem ser observados na **tabela 5.8**. Todas as amostras, em ambas as coletas, apresentaram resultados de IS negativos, o que sugere que as águas não possuem características incrustantes.

Os resultados mostram que no período chuvoso o IS variou de -6,25 a -0,92 e no período seco de -4,95 a -3,01, indicando águas subsaturadas em relação à calcita e com tendência a dissolver  $CaCO_{3(s)}$ . Isto ocorre porque as águas do aquífero Tucunaré são ácidas, variando de 5,3 no período chuvoso a 5,1 no período de estiagem, o que tende a dissolver a calcita, caso ela esteja presente.

**Tabela 5.8** – Resultado do Índice de Saturação (IS) para as amostras coletadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá nas duas campanhas.

Poço	IS (Abril de 2012)	IS (Outubro de 2012)
MPA01	-2,17	-4,50
MPA02	-4,11	-4,60
MPA03	-3,59	-3,82
MPA04	-3,76	-4,87
MPA05	-3,42	-4,78
MPA06	-3,13	-3,74
MPA07	-0,92	-4,58
MPA08	-3,87	-4,12
MPA09	-3,98	-3,79
MPA10	-3,48	-4,31
MPA11	-4,81	-4,63
MPA12	-4,15	-3,01
MPA13	-1,42	-3,81
MPA14	-3,95	-4,48
MPA15	-2,82	-4,58
MPA16	-1,48	-3,86
MPA17	-3,10	-4,25
MPA18	-2,95	-4,52
MPA19	-3,73	-4,32
MPA20	-3,78	-4,36
MPA21	-3,21	-4,95
MPA22	-2,76	-4,63
MPA23	-4,05	-4,25
MPA24	-3,76	-4,27
MPA25	-5,83	-4,35
MPA26	-6,25	-3,67
MPA27	-5,84	-4,10
MPA28	-4,78	-4,14
MPA29	-5,33	-3,78
MPA30	-5,04	-4,15

### 5.1.8 - Correlação entre Variáveis Hidrogeoquímicas

Alguns parâmetros físico-químicos analisados nas duas campanhas de amostragem foram submetidos a avaliações de correlação, por meio do *software Assistat* desenvolvido no Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG (Silva, 2012), o qual aplica o Teste t aos níveis de 5 e 1% de significância e fornece o coeficiente de correlação ( $\rho$ ).

Quanto ao nível de significância, conforme a **tabela 5.9** na primeira campanha e **tabela 5.10** na segunda campanha, as correlações são classificadas como:

- Não Significativas (“ns” ao nível superior a 5%)
- Significativas (“\*” ao nível de 5%)
- Muito Significativas (“\*\*\*” ao nível de 1%)

Quanto às correlações, vale informar que foram verificadas correlações positivas ( $0 < \rho < 1$ ) e correlações negativas ( $-1 < \rho < 0$ ). A qualidade das correlações foi classificada em 5 (cinco) categorias, de acordo com as seguintes faixas de valores de  $\rho$  :

- Correlação Muito Fraca: positiva ( $0 < \rho < 0,2$ ) ou negativa ( $-0,2 < \rho < 0$ )
- Correlação Fraca: positiva ( $0,2 < \rho < 0,4$ ) ou negativa ( $-0,4 < \rho < -0,2$ )
- Correlação Moderada: positiva ( $0,4 < \rho < 0,7$ ) ou negativa ( $-0,7 < \rho < -0,4$ )
- Correlação Forte: positiva ( $0,7 < \rho < 0,9$ ) ou negativa ( $-0,9 < \rho < -0,7$ )
- Correlação Muito Forte: positiva ( $\rho > 0,9$ ) ou negativa ( $\rho < -0,9$ )

### **Período Chuvoso**

De acordo com os resultados obtidos o panorama das correlações no período chuvoso (abril de 2012), conforme **tabela 5.9**, é o seguinte:

- A grande maioria das correlações (97/136) ou (71%) não são significativas e além disso são muito fracas (70/136) e fracas (27/136);
- Ao nível de 5% de significância existem (11/136) correlações, das quais (7/136) são fracas e (4/136) moderadas;
- Ao nível de 1% de significância existem apenas (28/136) correlações, sendo 13 moderadas, 12 fortes e 3 muito fortes.

**Tabela 5.9 – Resultado das correlações entre parâmetros químicos das águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – abril de 2012.**

Correlação - Abril de 2012			
Variável 1	Variável 2	Coefficiente de Correlação ( $\rho$ )	Significância
Na	K	0,7117	**
Na	Ca	0,3276	ns
Na	Mg	0,2416	ns
Na	Cl	0,9517	**
Na	SO <sub>4</sub>	0,3372	ns
Na	CE	0,8566	**
Na	STD	0,8572	**
Na	pH	-0,3556	ns
Na	Eh	-0,0044	ns
Na	Alcalinidade	0,0167	ns
Na	NO <sub>2</sub>	0,2227	ns
Na	NO <sub>3</sub>	0,7982	**
Na	NH <sub>3</sub>	0,4733	**
Na	Fe	-0,1207	ns
Na	CO <sub>3</sub>	-0,2226	ns
Na	HCO <sub>3</sub>	0,0666	ns
K	Ca	0,6954	**

**Tabela 5.9 – Resultado das correlações entre parâmetros químicos das águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – abril de 2012 (Continuação).**

Correlação - Abril de 2012			
Variável 1	Variável 2	Coefficiente de Correlação ( $\rho$ )	Significância
K	Mg	0,4757	**
K	Cl	0,7001	**
K	SO <sub>4</sub>	0,5463	**
K	CE	0,6908	**
K	STD	0,7934	**
K	pH	0,0327	ns
K	Eh	-0,1932	ns
K	Alcalinidade	-0,0967	ns
K	NO <sub>2</sub>	0,1354	ns
K	NO <sub>3</sub>	0,6644	**
K	NH <sub>3</sub>	0,3531	ns
K	Fe	0,0262	ns
K	CO <sub>3</sub>	-0,1325	ns
K	HCO <sub>3</sub>	-0,1379	ns
Ca	Mg	0,5185	**
Ca	Cl	0,3697	*
Ca	SO <sub>4</sub>	0,4137	*
Ca	CE	0,4636	*
Ca	STD	0,5367	**
Ca	pH	0,2627	ns
Ca	Eh	-0,292	ns
Ca	Alcalinidade	-0,1788	ns
Ca	NO <sub>2</sub>	0,1321	ns
Ca	NO <sub>3</sub>	0,469	**
Ca	NH <sub>3</sub>	0,3762	*
Ca	Fe	-0,033	ns
Ca	CO <sub>3</sub>	-0,1306	ns
Ca	HCO <sub>3</sub>	-0,2216	ns
Mg	Cl	0,2389	ns
Mg	SO <sub>4</sub>	0,2739	ns
Mg	CE	0,5747	**
Mg	STD	0,5393	**
Mg	pH	-0,13	ns
Mg	Eh	0,0944	ns
Mg	Alcalinidade	-0,2441	ns
Mg	NO <sub>2</sub>	0,1925	ns
Mg	NO <sub>3</sub>	0,5122	**
Mg	NH <sub>3</sub>	0,1184	ns
Mg	Fe	0,132	ns
Mg	CO <sub>3</sub>	-0,1935	ns
Mg	HCO <sub>3</sub>	-0,1542	ns
Cl	SO <sub>4</sub>	0,3562	ns
Cl	CE	0,8393	**
Cl	STD	0,832	**
Cl	pH	-0,3937	*
Cl	Eh	0,0304	ns
Cl	Alcalinidade	-0,0421	ns
Cl	NO <sub>2</sub>	0,2286	ns

**Tabela 5.9 – Resultado das correlações entre parâmetros químicos das águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – abril de 2012 (Continuação).**

Correlação - Abril de 2012			
Variável 1	Variável 2	Coefficiente de Correlação ( $\rho$ )	Significância
Cl	NO <sub>3</sub>	0,7554	**
Cl	NH <sub>3</sub>	0,6113	**
Cl	Fe	-0,0694	ns
Cl	CO <sub>3</sub>	-0,2286	ns
Cl	HCO <sub>3</sub>	-0,033	ns
SO <sub>4</sub>	CE	0,3159	ns
SO <sub>4</sub>	STD	0,3906	*
SO <sub>4</sub>	pH	-0,0051	ns
SO <sub>4</sub>	Eh	0,0273	ns
SO <sub>4</sub>	Alcalinidade	-0,1398	ns
SO <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	0,0987	ns
SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	0,2451	ns
SO <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	-0,0353	ns
SO <sub>4</sub>	Fe	-0,1047	ns
SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub>	-0,1034	ns
SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	-0,1674	ns
CE	STD	0,9614	**
CE	pH	-0,3914	*
CE	Eh	0,0751	ns
CE	Alcalinidade	-0,1162	ns
CE	NO <sub>2</sub>	0,2544	ns
CE	NO <sub>3</sub>	0,8483	**
CE	NH <sub>3</sub>	0,4498	*
CE	Fe	-0,08	ns
CE	CO <sub>3</sub>	-0,2544	ns
CE	HCO <sub>3</sub>	-0,0641	ns
STD	pH	-0,2151	ns
STD	Eh	-0,0087	ns
STD	Alcalinidade	-0,0161	ns
STD	NO <sub>2</sub>	0,2416	ns
STD	NO <sub>3</sub>	0,8581	**
STD	NH <sub>3</sub>	0,3894	*
STD	Fe	-0,0838	ns
STD	CO <sub>3</sub>	-0,2416	ns
STD	HCO <sub>3</sub>	-0,0132	ns
pH	Eh	-0,3825	*
pH	Alcalinidade	0,0896	ns
pH	NO <sub>2</sub>	-0,178	ns
pH	NO <sub>3</sub>	-0,1786	ns
pH	NH <sub>3</sub>	-0,2694	ns
pH	Fe	-0,2699	ns
pH	CO <sub>3</sub>	0,1766	ns
pH	HCO <sub>3</sub>	0,015	ns
Eh	Alcalinidade	-0,2232	ns
Eh	NO <sub>2</sub>	0,107	ns
Eh	NO <sub>3</sub>	-0,0711	ns
Eh	NH <sub>3</sub>	-0,1134	ns

**Tabela 5.9** – Resultado das correlações entre parâmetros químicos das águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – abril de 2012 (Continuação).

Correlação - Abril de 2012			
Variável 1	Variável 2	Coefficiente de Correlação ( $\rho$ )	Significância
Eh	Fe	0,1405	ns
Eh	CO <sub>3</sub>	-0,107	ns
Eh	HCO <sub>3</sub>	-0,1147	ns
Alcalinidade	NO <sub>2</sub>	-0,1091	ns
Alcalinidade	NO <sub>3</sub>	-0,0336	ns
Alcalinidade	NH <sub>3</sub>	-0,1369	ns
Alcalinidade	Fe	0,1252	ns
Alcalinidade	CO <sub>3</sub>	0,1076	ns
Alcalinidade	HCO <sub>3</sub>	0,8806	**
NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	0,1803	ns
NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	0,132	ns
NO <sub>2</sub>	Fe	0,0845	ns
NO <sub>2</sub>	CO <sub>3</sub>	-0,9999	**
NO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>	0,0775	ns
NO <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>	0,4553	*
NO <sub>3</sub>	Fe	-0,0998	ns
NO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	-0,1809	ns
NO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	-0,0093	ns
NH <sub>3</sub>	Fe	0,2161	ns
NH <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	-0,1281	ns
NH <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	-0,1735	ns
Fe	CO <sub>3</sub>	-0,0825	ns
Fe	HCO <sub>3</sub>	0,0755	ns
CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	-0,0776	ns

Legenda:

\*\* = significativo ao nível de 1% de significância ( $p < 0,01$ )

\* = significativo ao nível de 5% de significância ( $0,01 \leq p < 0,05$ )

ns = não significativo ( $p \geq 0,05$ )

### **Período de Estiagem**

Segundo os dados coletados no período seco (outubro de 2012), observa-se, como demonstra a **tabela 5.10**, que:

- Assim como na primeira campanha, também na segunda a maioria das correlações (95/136) ou nada menos que 70%, não são significativas e se enquadram como muito fracas (73) e fracas (22);
- Ao nível de 5% de significância existem (10/136) correlações, sendo 3 fracas, e 7 moderadas;
- Ao nível de 1% de significância, existem (31/136) correlações, das quais (10/136) são moderadas, (15/136) fortes e (6/136) muito fortes.

**Tabela 5.10** – Resultado das correlações entre parâmetros químicos das águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – outubro de 2012.

Correlação - Outubro de 2012			
Variável 1	Variável 2	Coefficiente de Correlação ( $\rho$ )	Significância
Na	K	0,6837	**
Na	Ca	0,3435	ns
Na	Mg	0,7388	**
Na	Cl	0,9189	**
Na	SO <sub>4</sub>	0,2539	ns
Na	CE	0,8789	**
Na	STD	0,8629	**
Na	pH	-0,0551	ns
Na	Eh	0,1798	ns
Na	Alcalinidade	-0,0298	ns
Na	NO <sub>2</sub>	0,0552	ns
Na	NO <sub>3</sub>	0,9714	**
Na	NH <sub>3</sub>	0,4117	*
Na	Fe	0,0648	ns
Na	CO <sub>3</sub>	0,2333	ns
Na	HCO <sub>3</sub>	-0,0865	ns
K	Ca	0,6395	**
K	Mg	0,8474	**
K	Cl	0,84	**
K	SO <sub>4</sub>	0,3291	ns
K	CE	0,7717	**
K	STD	0,7735	**
K	pH	-0,258	ns
K	Eh	0,282	ns
K	Alcalinidade	0,278	ns
K	NO <sub>2</sub>	0,1568	ns
K	NO <sub>3</sub>	0,7025	**
K	NH <sub>3</sub>	0,6829	**
K	Fe	0,0541	ns
K	CO <sub>3</sub>	0,2602	ns
K	HCO <sub>3</sub>	0,2182	ns
Ca	Mg	0,5013	**
Ca	Cl	0,463	*
Ca	SO <sub>4</sub>	-0,0294	ns
Ca	CE	0,3957	*
Ca	STD	0,4488	*
Ca	pH	-0,0691	ns
Ca	Eh	0,0026	ns
Ca	Alcalinidade	0,1007	ns
Ca	NO <sub>2</sub>	-0,0911	ns
Ca	NO <sub>3</sub>	0,4099	*
Ca	NH <sub>3</sub>	0,192	ns
Ca	Fe	0,2195	ns
Ca	CO <sub>3</sub>	0	ns
Ca	HCO <sub>3</sub>	0,1108	ns
Mg	Cl	0,8329	**
Mg	SO <sub>4</sub>	0,43	*
Mg	CE	0,8434	**

**Tabela 5.10** – Resultado das correlações entre parâmetros químicos das águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – outubro de 2012 (Continuação).

Correlação - Outubro de 2012			
Variável 1	Variável 2	Coefficiente de Correlação ( $\rho$ )	Significância
Mg	STD	0,8401	**
Mg	pH	-0,156	ns
Mg	Eh	0,1943	ns
Mg	Alcalinidade	-0,0456	ns
Mg	NO <sub>2</sub>	0,1064	ns
Mg	NO <sub>3</sub>	0,7844	**
Mg	NH <sub>3</sub>	0,4941	**
Mg	Fe	0,1185	ns
Mg	CO <sub>3</sub>	0,3182	ns
Mg	HCO <sub>3</sub>	-0,068	ns
Cl	SO <sub>4</sub>	0,1853	ns
Cl	CE	0,9002	**
Cl	STD	0,8889	**
Cl	pH	-0,1266	ns
Cl	Eh	0,1698	ns
Cl	Alcalinidade	0,0381	ns
Cl	NO <sub>2</sub>	0,1632	ns
Cl	NO <sub>3</sub>	0,9163	**
Cl	NH <sub>3</sub>	0,5746	**
Cl	Fe	0,0912	ns
Cl	CO <sub>3</sub>	0,3239	ns
Cl	HCO <sub>3</sub>	-0,0227	ns
SO <sub>4</sub>	CE	0,2755	ns
SO <sub>4</sub>	STD	0,2679	ns
SO <sub>4</sub>	pH	0,0037	ns
SO <sub>4</sub>	Eh	0,2686	ns
SO <sub>4</sub>	Alcalinidade	0,2076	ns
SO <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	-0,0978	ns
SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	0,2139	ns
SO <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	0,2036	ns
SO <sub>4</sub>	Fe	-0,0459	ns
SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub>	-0,0973	ns
SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	0,1751	ns
CE	STD	0,9722	**
CE	pH	-0,0718	ns
CE	Eh	0,1368	ns
CE	Alcalinidade	0,0383	ns
CE	NO <sub>2</sub>	0,0974	ns
CE	NO <sub>3</sub>	0,8965	**
CE	NH <sub>3</sub>	0,5407	**
CE	Fe	0,1883	ns
CE	CO <sub>3</sub>	0,2005	ns
CE	HCO <sub>3</sub>	0,0078	ns
STD	pH	-0,0667	ns
STD	Eh	0,1332	ns
STD	Alcalinidade	-0,0087	ns
STD	NO <sub>2</sub>	0,1488	ns

**Tabela 5.10** – Resultado das correlações entre parâmetros químicos das águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá – outubro de 2012 (Continuação).

Correlação - Outubro de 2012			
Variável 1	Variável 2	Coefficiente de Correlação ( $\rho$ )	Significância
STD	NO <sub>3</sub>	0,8784	**
STD	NH <sub>3</sub>	0,4704	**
STD	Fe	0,1613	ns
STD	CO <sub>3</sub>	0,1055	ns
STD	HCO <sub>3</sub>	-0,034	ns
pH	Eh	-0,6562	**
pH	Alcalinidade	-0,0517	ns
pH	NO <sub>2</sub>	-0,2851	ns
pH	NO <sub>3</sub>	-0,0834	ns
pH	NH <sub>3</sub>	-0,2487	ns
pH	Fe	0,1042	ns
pH	CO <sub>3</sub>	-0,1111	ns
pH	HCO <sub>3</sub>	0,0816	ns
Eh	Alcalinidade	0,0747	ns
Eh	NO <sub>2</sub>	0,0944	ns
Eh	NO <sub>3</sub>	0,157	ns
Eh	NH <sub>3</sub>	0,2092	ns
Eh	Fe	-0,5401	**
Eh	CO <sub>3</sub>	0,0909	ns
Eh	HCO <sub>3</sub>	-0,041	ns
Alcalinidade	NO <sub>2</sub>	-0,0732	ns
Alcalinidade	NO <sub>3</sub>	-0,0813	ns
Alcalinidade	NH <sub>3</sub>	0,4195	*
Alcalinidade	Fe	0,0626	ns
Alcalinidade	CO <sub>3</sub>	-0,0773	ns
Alcalinidade	HCO <sub>3</sub>	0,9141	**
NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	0,0367	ns
NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	0,1835	ns
NO <sub>2</sub>	Fe	-0,0906	ns
NO <sub>2</sub>	CO <sub>3</sub>	0	ns
NO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>	-0,078	ns
NO <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>	0,387	*
NO <sub>3</sub>	Fe	0,1321	ns
NO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	0,1667	ns
NO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	-0,1338	ns
NH <sub>3</sub>	Fe	-0,0842	ns
NH <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	0,4332	*
NH <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	0,3622	*
Fe	CO <sub>3</sub>	-0,0952	ns
Fe	HCO <sub>3</sub>	0,036	ns
CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	-0,0763	ns

Legenda:

\*\* = significativo ao nível de 1% de significância ( $p < 0,01$ )

\* = significativo ao nível de 5% de significância ( $0,01 \leq p < 0,05$ )

ns = não significativo ( $p \geq 0,05$ )

### **Discussão sobre as correlações**

Das 136 correlações apresentadas de parâmetros químicos em cada uma das campanhas, conforme **tabelas 5.9 e 5.10**, verifica-se que em termos médios 70% das mesmas são totalmente destituídas de significância. Correlações muito significativas, também chamadas de altamente significativas quando resultantes de Teste t ao nível de 1%, como é o caso, representam apenas 16% do total, ou seja, (22/136).

As correlações existentes entre Na (sódio), K (potássio), Ca (cálcio), Mg (magnésio), Cl (cloreto), CE (condutividade elétrica) e STD (sólidos totais dissolvidos) indicam influência de intrusão salina pelo fenômeno da ressaca, por conta da elevada presença de íons, e também do intemperismo químico, haja vista, que os seus teores foram encontrados em poucas quantidades, o que corrobora com a ideia de que esses elementos foram liberados há anos ao longo da interação água x rocha, e que se apresentam extremamente diluídos devido a elevada precipitação associada a constante renovação das águas na planície amazônica.

Os parâmetros Na (sódio), K (potássio), Cl (cloreto), CE (condutividade elétrica), STD (sólidos totais dissolvidos), NO<sub>3</sub> (nitrato), NH<sub>3</sub> (amônia) e SO<sub>4</sub> (sulfato), apresentaram correlação entre si, o que sugere poluição nas águas subterrâneas oriunda de atividade antrópica, principalmente lançamento de esgoto *in natura*, haja vista que tais constituintes representam uma medida indireta de concentração de poluentes. Além disso, as correlações altamente significativas envolvendo as variáveis, nitrato e amônia se devem principalmente ao contato das águas subterrâneas com as fossas negras, vazamento nas redes coletoras de esgoto e influência de rios próximos à área de captação dos poços. Tal justificativa é plausível na área de estudo, haja vista a ausência de esgotamento sanitário e a falta de proteção sanitária na instalação dos poços.

#### **5.1.9 - Modelagem Geoestatística**

Nas ciências da terra os dados são tipicamente distribuídos no espaço e/ou no tempo. O conhecimento do valor de um atributo (por exemplo, o teor de sódio), é de pouco ou nenhum interesse a menos que a data e o local da medida sejam conhecidos e possam ser incorporados à análise dos dados.

A interpretação dos dados hidrogeoquímicos obtidos através das análises realizadas pelo Laboratório da Bioagri Ambiental nas duas campanhas de amostragem sazonal levadas a efeito no ano de 2012, com intervalo de 6 (seis) meses, utilizará apenas estatísticas *univariadas*, sendo numa primeira etapa a *univariada temporal* e em seguida a *univariada espacial*, sendo essa última aplicada na elaboração dos mapas de zoneamento. Antes, porém, julga-se conveniente apresentar alguns conceitos geoestatísticos, segundo Goovaerts (1997), nos quais essa análise se baseia:

#### **Terminologia**

- **Atributo** - É uma propriedade física que pode ser um atributo *contínuo*, simbolizado por letras minúsculas, tais como, z ou s. Um exemplo é a concentração de uma substância dissolvida na água, medida numa

escala quantitativa de valores (teor de sulfato). O atributo também pode ser de *categoria*, caso em que somente assume um limitado número de estados, por exemplo, tipos de rocha (sedimentar, metamórfica, etc) ou usos do solo (agricultura, pecuária, etc).

- **Variável** - Simbolizada por letras maiúsculas, tais como  $Z$  ou  $S$ , é definida como o conjunto de possíveis valores ou estados que o atributo  $z$  ou  $s$  pode assumir numa região  $A$  (área de estudo) em um local com vetor de posição ou de coordenadas  $u$ . Nesse último caso, a variável é expressa por  $Z(u)$  ou  $S(u)$ .
- **Indivíduo** - O valor do atributo é medido em uma amostra física, por exemplo, uma amostra de água subterrânea coletada em um poço durante um estudo de campo. Na estatística univariada um atributo contínuo medido nessa amostra (teor de cálcio) é um indivíduo, interpretado como *um ponto*, sem levar em conta a sua localização no espaço.
- **População** - É definida como o conjunto das (infinitas) medidas do atributo de interesse, passíveis de serem realizadas na área de estudo. Já a coleção ou conjunto finito de valores (por exemplo, 30 valores) medidos do atributo (teor de cálcio) é designado conjunto amostral ou simplesmente *amostra*.
- **Parâmetro** - Parâmetros são quantidades constantes de um modelo, por exemplo, o parâmetro ou estatística "*média*" de uma função de distribuição lognormal que modela um histograma.

### ***Estatística Descritiva***

Feições importantes de uma distribuição de frequência são o seu valor central e as medidas de seu desvio ou espalhamento e simetria. O valor central, nas distribuições ditas Normais (ou simétricas) é a média aritmética. Nas distribuições muito assimétricas o valor central é a mediana, que é o valor correspondente a uma frequência acumulada de 50%, isto é, o valor que separa a distribuição em duas metades: uma de valores mais baixos e uma de valores mais altos em relação à média.

### **Distribuição de frequência**

Seja  $\{z(\alpha), \alpha = 1, \dots, n\}$  o conjunto de medidas do atributo contínuo  $z$  nos  $n$  indivíduos  $\alpha$ . Nesse contexto a posição real desses dados não é levada em conta. A distribuição de valores contínuos é tipicamente revelada por um histograma com a faixa de valores dos dados discretizada em certo número de classes de igual largura e a proporção relativa dos dados dentro de cada classe expressa pela altura das barras. Essas proporções relativas definem as frequências de classe e, portanto, o histograma reflete a distribuição de frequência dos  $z$ -valores para uma dada definição de classes.

Assim sendo, a modelagem dos histogramas de frequência dos conjuntos amostrais dos atributos medidos nas duas campanhas de coleta de água (período chuvoso e período seco), através de funções de distribuição de probabilidade permite avaliar com risco calculado os valores esperados de cada atributo de acordo com o período de coleta. Caso sejam constatadas diferenças, admite-se que elas seguramente serão indicativas de influências da sazonalidade. Detalhes complementares são fornecidos no texto que segue, visando justificar o procedimento adotado neste trabalho.

### **Descrição Espacial e Temporal Univariada**

Na estatística clássica os valores de dados observados são supostos aleatórios e não existe correlação entre eles. Na geoestatística admite-se que o campo das medidas (região  $A$ ) é *estatisticamente estacionário*, o que equivale a dizer que a diferença entre os valores medidos entre dois pontos só depende da distância entre eles, tendo-se como paradigma que valores de atributos em pontos mais próximos são mais semelhantes do que valores em pontos mais afastados.

Este é o paradigma da técnica de inferência conhecida por *krigagem*, que permite modelar a autocorrelação em função da distância. Assim, dentro de uma região  $A$  para cada posição  $\mathbf{u} \in A$ , o valor do atributo ambiental  $z(\mathbf{u})$  é modelado como uma variável aleatória (Deutsch & Journel, 1998; Felgueiras, 1999). Na modelagem geoestatística a variável aleatória  $Z(\mathbf{u})$  pode assumir diferentes valores para o atributo e, cada um deles, com uma probabilidade de ocorrência associada. Nas posições amostradas  $\mathbf{u}_\alpha, \alpha = 1, 2, \dots, n$  os valores  $z(\mathbf{u}_\alpha)$  são considerados determinísticos ou, ainda, podem ser considerados como variáveis aleatórias cujo valor medido tem uma probabilidade de 100% de ocorrer. Nas posições não amostradas a incerteza associada aos valores de  $Z(\mathbf{u})$  é modelada pela função de distribuição de probabilidade da variável aleatória  $Z(\mathbf{u})$ . Da mesma maneira os valores determinísticos  $z(\mathbf{u}_\alpha)_t$  medidos nas duas campanhas, nos tempos  $t_1$  (abril de 2012) e  $t_2$  (outubro de 2012), estão associados aos valores desconhecidos  $z(\mathbf{u}, t)$ , em uma data qualquer, cuja incerteza é modelada a partir dos respectivos histogramas de  $z(\mathbf{u}_\alpha, t)$  pela

função de distribuição de probabilidade da variável aleatória  $Z(\mathbf{u}, t)$ . Assim é possível comparar com o mesmo nível de risco os valores esperados em ambos os conjuntos de dados correspondentes, respectivamente, ao período chuvoso e ao período seco.

### **Modelagem dos Histogramas de Frequência**

Na **tabela 5.11** se encontram os parâmetros analisados e os respectivos limites de detecção. Alguns parâmetros analisados como, por exemplo, Cor, apresentaram nos resultados das 30 (trinta) coletas de hidrogeoquímica um alto percentual de valores inferiores aos Limites de Detecção (LD), em Macapá: no período chuvoso 87% (26/30) das análises apresentaram cor < 5 e no período seco 97% (29/30) das análises obtiveram cor < 5. Dessa forma, para fins de realização da estatística descritiva o resultado desconhecido < 5 foi substituído por um valor numérico próximo (por exemplo: 4,9), que atende matematicamente a condição apresentada na análise, embora o verdadeiro valor do parâmetro seja desconhecido.

**Tabela 5.11** – Parâmetros analisados, limites de detecção (LD) e valores mínimos adotados para estatística descritiva dos resultados das coletas no Aquífero Tucunaré nas duas campanhas.

Parâmetros analisados	Unidade	LD (mg/L)	Valor Numérico Adotado
Cor	uH	< 5	4,9
Turbidez	NTU	< 0,1	0,09
Condutividade elétrica	$\mu\text{S/cm}$	-	-
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	-	-
STD	mg/L	< 5	4,9
Alcalinidade Total	mg/L	< 5	4,9
pH	-	-	-
Eh	mV	-	-
Sódio	mg/L	< 0,01	0,009
Potássio	mg/L	< 0,001	0,0009
Cálcio	mg/L	< 0,01 < 0,001	0,009 0,0009
Magnésio	mg/L	-	-
Cloreto	mg/L	< 0,5	0,49
		< 1	0,9
		< 2	1,9
Sulfato	mg/L	< 0,5	0,49
		< 1	0,9
Bicarbonato	mg/L	< 0,5	0,49
Dureza	mg/L	< 5,0	4,9

**Tabela 5.11** – Parâmetros analisados, limites de detecção (LD) e valores mínimos adotados para estatística descritiva dos resultados das coletas no Aquífero Tucunaré nas duas campanhas (Continuação).

Parâmetros analisados	Unidade	LD (mg/L)	Valor Numérico Adotado
Nitrato	mg/L	< 0,1 < 0,2	0,09 0,19
Nitrito	mg/L	< 0,02 < 0,01 < 0,04	0,019 0,009 0,039
Amônia (Nitrogênio Amoniacal)	mg/L	< 0,1	0,09
Nitrogênio Orgânico	mg/L	< 0,1	0,09
Nitrogênio Total Kjeldahl	mg/L	< 0,1	0,09
Nitrogênio Total	mg/L	< 0,5	0,49
Ferro	mg/L	< 0,001 < 0,0001	0,0009 0,00009
Manganês	mg/L	< 0,001 < 0,0001	0,0009 0,00009
Índice de fenóis	mg/L	< 0,001	0,0009
Bário	mg/L	< 0,001	0,0009
Níquel	mg/L	< 0,001	0,0009
Zinco	mg/L	< 0,001	0,0009
Cádmio	mg/L	< 0,001	0,0009
Chumbo	mg/L	< 0,001	0,0009
Cobre	mg/L	< 0,001	0,0009
Cromo	mg/L	< 0,001	0,0009
Mercúrio	mg/L	< 0,0001	0,00009
Arsênio	mg/L	< 0,001	0,0009
Benzeno	mg/L	< 0,001	0,0009
Tolueno	mg/L	< 0,001	0,0009
Etilbenzeno	mg/L	< 0,001	0,0009
o-Xileno	mg/L	< 0,001	0,0009
m,p-Xilenos	mg/L	< 0,002	0,0019
E.Coli	Presente = 1 e Ausente = 0	-	-
C. Totais		-	-

Esse valor numérico (4,9) é determinista, mas para fins de modelagem geoestatística pode ser interpretado como um valor aleatório com 100% de probabilidade. Assim, se todos os 30 valores forem iguais a 4,9 eles podem ser interpretados como um conjunto amostral com distribuição normal e com a estatística descritiva da **tabela 5.12** e distribuição de probabilidade da **tabela 5.13**.

**Tabela 5.12** – Estatística descritiva de valores abaixo do limite de detecção da cor, substituídos por um valor numérico.

Cor	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
Cor-1	30	4,9	4,9-1,01E-15	4,9+1,01E-15	4,9	4,9	4,9	2,7E-15	4,9E-16	-1,05

**Tabela 5.13** – Distribuição de probabilidade para valores abaixo do limite de detecção da cor, substituídos por um valor numérico.

P(x≥a)	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Cor-1	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9

Além disso, outra dificuldade encontrada na aplicação da modelagem geoestatística foi o fato de alguns parâmetros apresentarem valores anômalos, que produzem altos desvios padrão e distorcem consideravelmente a distribuição dos dados, afetando a consistência dos resultados apresentados pelo modelo, como ocorre nos casos de cor, potencial redox e ferro.

## 5.2 – Interpretação dos Resultados Analíticos das Águas Subterrâneas do Aquífero Tucunaré

### 5.2.1 - Cor

A cor indica principalmente a presença de metais (Fe, Mn), ácidos húmicos (matéria oriunda da degradação de matéria de origem vegetal), plâncton (conjunto de plantas e animais microscópicos em suspensão nas águas) dentre outras substâncias dissolvidas na água.

Para consumo humano, segundo a Portaria do Ministério da Saúde - MS 2914/2011 o valor máximo permitido (VMP) para cor é 15 uH – Unidade Hazen (mgPt-Co/L). Os resultados obtidos em Macapá no período chuvoso mostraram em 87% (26/30) das amostras coletadas, valores de cor < 5,0, ou seja, inferiores ao LQ (limite de quantificação); enquanto que no período de estiagem, 97% (29/30) das amostras apresentaram resultados inferiores a 5.

A estatística descritiva da cor apresentada na **tabela 5.14** variou no ano de 2012, de 4,9 a 690 uH no período chuvoso, com média de 27,7 e mediana de 4,9 uH. No período seco a variação entre o mínimo e o máximo foi de 4,9 a 6,0 uH, com média de 4,9 e mediana de 4,9 uH.

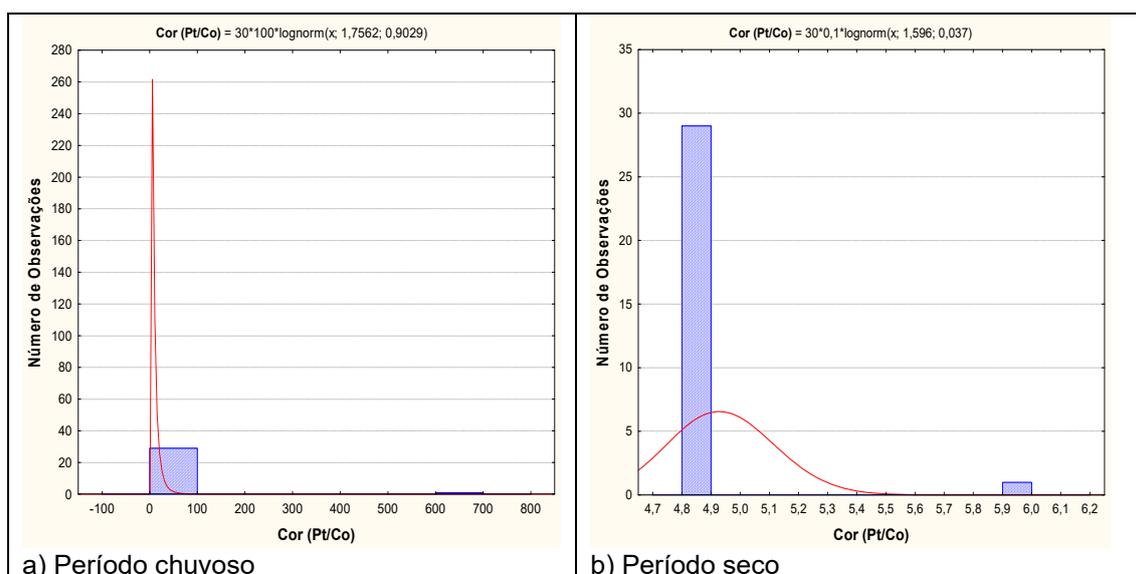
**Tabela 5.14** – Estatística descritiva da Cor do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Cor-1) - abril de 2012 e no período seco (Cor-2) - outubro de 2012.

Cor	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
Cor-1	30	27,7	-18,9	74,4	4,9	4,9	690,0	125,1	22,8	5,5
Cor-2	30	4,9	4,9	5,0	4,9	4,9	6,0	0,2	0,04	5,5

Dentre os quatro valores quantificáveis na primeira campanha, apenas o poço MPA29 ultrapassou o VMP de potabilidade da Portaria MS 2914/2011, ao passo que na segunda campanha o único valor quantificável ficou dentro dos padrões. Esse valor anômalo de 690 uH obtido no poço MPA29, provavelmente, se deve a contaminação por lançamento de esgoto *in natura*,

próximo ao local de instalação do poço, que se encontra em terreno alagado e baldio em uma zona de ressaca, como pode ser observado na **foto 5.2**.

Os histogramas de frequência modelados por uma Função de Distribuição de Probabilidade (fdp) lognormal, tão somente com a finalidade de estimar os valores não amostrados com risco calculado, apresentados na **figura 5.7** confirmam exatamente o que foi dito sobre a distribuição truncada pelo limite de quantificação, que exhibe respectivamente, 87 e 97% dos valores < 5,0, no período chuvoso e de estiagem, ou seja, inferiores ao LQ.



**Figura 5.7** – Histograma de frequência e curva normal de distribuição de probabilidade da Cor do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

O modelo de fdp usado para elaborar os histogramas permite concluir com risco calculado (**tabela 5.15**) que no período de estiagem o parâmetro cor tende a ser maior quando comparado ao período chuvoso. Entende-se que tal resultado não condiz com a realidade, pois a média e o desvio padrão da distribuição estão fortemente influenciados pela presença de valor anômalo de cor igual a 690 uH, quando a quase totalidade dos indivíduos das amostras, em ambas as campanhas, apresentaram valores abaixo do limite de detecção. Portanto, admite-se que o parâmetro cor das águas subterrâneas no aquífero Tucunaré, em Macapá, não sofre influência da sazonalidade, haja vista que isso é o comum na maioria das águas subterrâneas.

**Tabela 5.15** – Distribuição de probabilidade da Cor do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Cor-1) - abril de 2012 e no período seco (Cor-2) – outubro de 2012.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Cor-1	5,8	2,7	1,8	1,3	0,9	0,7
Cor-2	4,9	3,6	3,1	2,7	2,3	2,1
Razão	1,2	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3

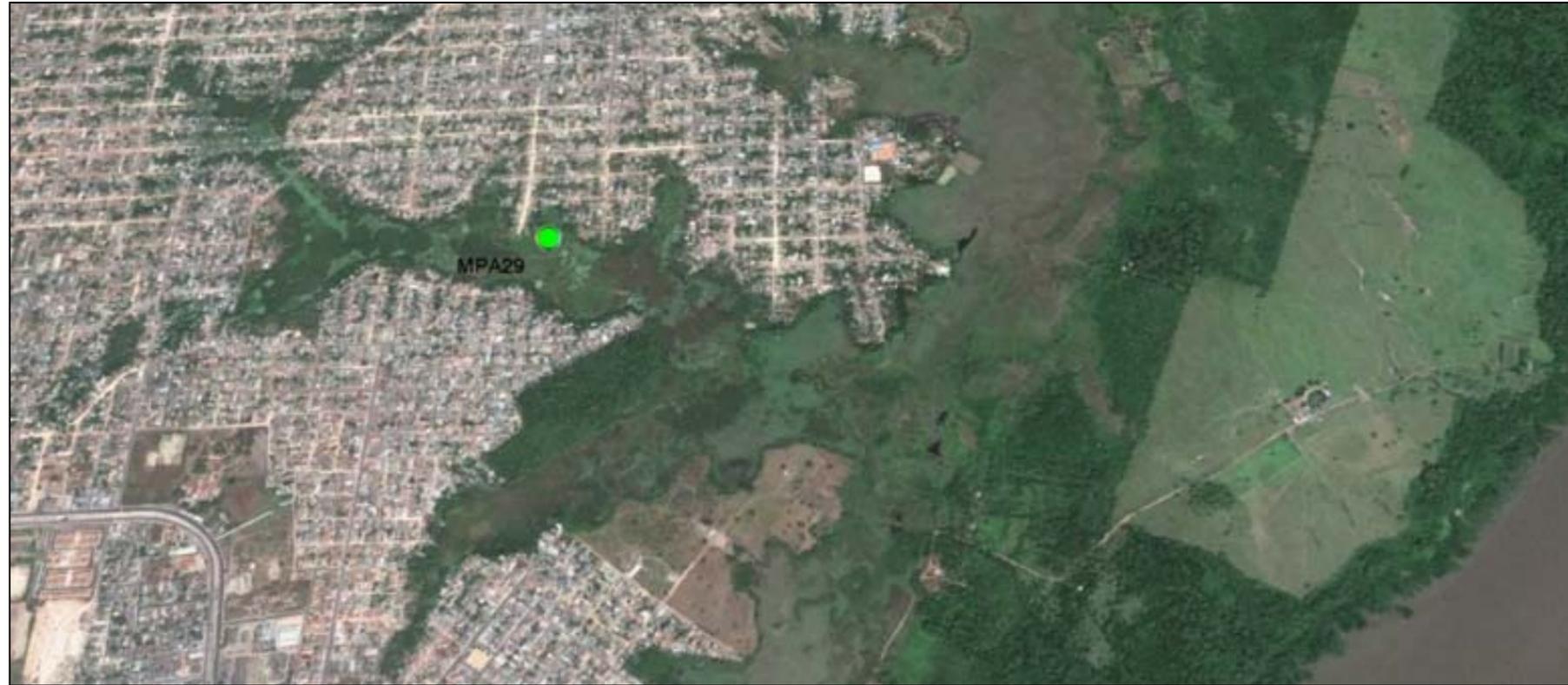


Foto 5.2 – Lançamento de esgoto *in natura*, em frente à residência situada a cerca de 85 m de distância do poço MPA29, na cidade de Macapá - AP.

### 5.2.2 - Turbidez

A turbidez está relacionada com a presença de argila, silte, substâncias orgânicas (por exemplo: húmus) ou inorgânicas (por exemplo: óxidos) finamente divididas, plâncton e algas, indicando o risco de entupimentos de filtros e tubulações. A água subterrânea nas condições em que circula no ambiente subterrâneo é praticamente isenta de turbidez. Valores altos de turbidez em águas subterrâneas coletadas por bombeamento, geralmente ocorrem em poços mal desenvolvidos e são devidos ao carreamento de partículas finas da formação geológica através dos filtros.

As unidades utilizadas para expressar a turbidez são: NTU (*Nefelometric Turbidity Unit*), FTU (*Formazin Turbidity Unit*) ou uT (Unidade de Turbidez), sendo essas unidades correspondentes 1:1 (Celligoi, 1999; Szikszay, 1993).

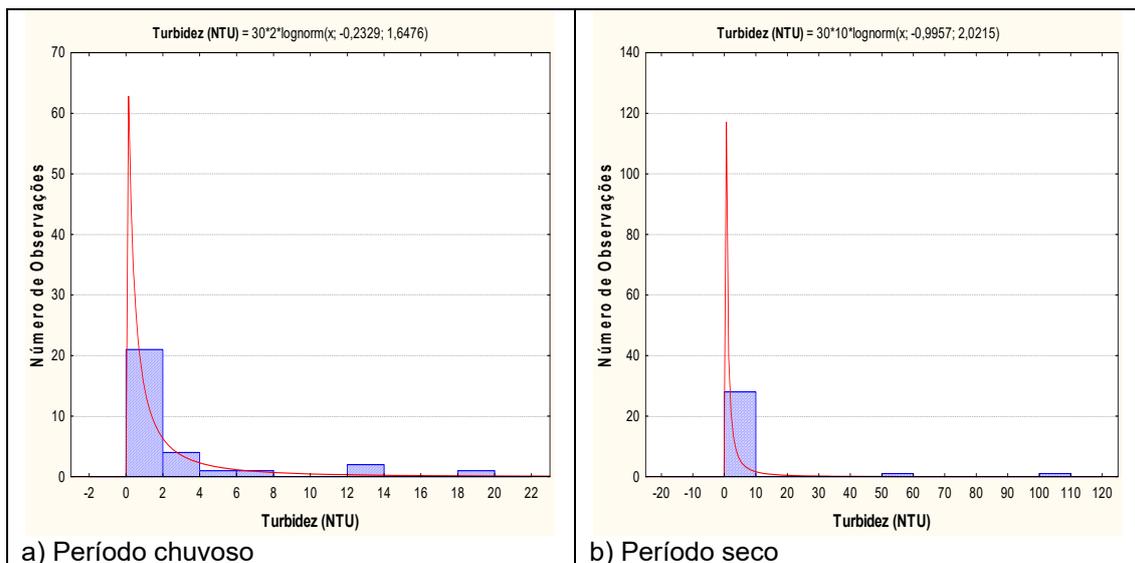
O VMP da turbidez para consumo humano, segundo a Portaria MS 2914/2011 é igual a 5 uT (unidade de Turbidez). Nas amostras de água do aquífero Tucunaré em Macapá foram detectados valores de turbidez (uT) em 77% (23/30) das análises do período chuvoso e em apenas 47% (14/30) das análises do período de estiagem. Nas demais amostras os valores ficaram abaixo do LQ (limite de quantificação), que é igual a 0,1.

Os valores detectados pela estatística descritiva (**tabela 5.16**) variaram de 0,09 a 19 uT, com mediana de 0,7 no período chuvoso; enquanto que no período seco, se distribuíram entre 0,09 a 106 uT, com mediana de 0,1 uT. Na primeira campanha 13% (4/30) dos poços apresentaram valores acima do VMP de potabilidade da Portaria MS 2914/2011, ao passo que na segunda campanha, apenas 10% (3/30) dos poços ultrapassam os padrões.

**Tabela 5.16** – Estatística descritiva da Turbidez do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Tu-1) - abril de 2012 e no período seco (Tu-2) - outubro de 2012.

Tu	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
Tu-1	30	2,7	1,0	4,5	0,71	0,09	19,0	4,7	0,9	2,5
Tu-2	30	6,3	-1,8	14,4	0,09	0,09	106,0	21,6	3,9	4,1

Os histogramas de frequência da turbidez nos dois períodos de amostragem (**figura 5.8**) foram modelados por funções de distribuição de probabilidade lognormal. Esse modelo de fdp permite concluir com risco calculado (**tabela 5.17**) que os valores de turbidez estimados para o período chuvoso apresentam um ligeiro aumento no período chuvoso, indicando que há alguma influência da sazonalidade, haja vista que a razão entre os valores das campanhas é superior a 1 (um). Isto, provavelmente, se deve ao fato de que no período chuvoso, as águas são mais ricas em sedimentos em suspensão.



**Figura 5.8** – Histograma de frequência e curva normal de distribuição de probabilidade da Turbidez do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

**Tabela 5.17** – Distribuição de probabilidade da Turbidez do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Tu-1) - abril de 2012 e no período seco (Tu-2) - outubro de 2012.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Tu-1	0,7922	0,1980	0,0959	0,0527	0,0269	0,0171
Tu-2	0,3695	0,0674	0,0277	0,0133	0,0058	0,0034
Razão	2,1	2,9	3,5	3,96	4,6	5,03

### **Zoneamento da Turbidez**

Considerando que os meios porosos granulares se constituem em filtros naturais e que a turbidez se deve essencialmente à presença de sólidos em suspensão, a elaboração do mapa de zoneamento da turbidez das águas do aquífero é do tipo pontual.

No período chuvoso (**figura 5.9a**) 23% (7/30) dos poços apresentaram valores de turbidez abaixo do limite de detecção de 0,1 uT; 13% (4/30) valores acima do VMP de 5 uT estabelecido pela Portaria MS 2914/2011; e os 64% (19/30) restantes são valores compreendidos entre 0,1 e 5,0 uT.

No período de estiagem (**figura 5.9b**) 53% (16/30) das análises obtiveram resultados de turbidez inferiores ao limite de detecção de 0,1 uT; 37% (11/30) valores compreendidos entre 0,1 e 5 uT; e apenas 10% (3/30) apresentaram valores de turbidez acima do VMP, o que é justificável pela redução de partículas em suspensão pela cessação do período de cheias.

Outro fator que justifica os elevados teores de turbidez nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá é a presença de ferro, haja vista

que a maioria das análises de ferro indicaram valores acima de 0,3 mg/L, ou seja, superiores ao VMP estabelecido pela Portaria MS 2914/2011.

As águas subterrâneas normalmente não apresentam problemas em relação a turbidez, porém, em alguns casos, águas ricas em íons Fe podem apresentar uma elevação de sua turbidez quando entram em contato com o oxigênio do ar (Narciso & Gomes, 2004), o que é plausível na área de estudo.

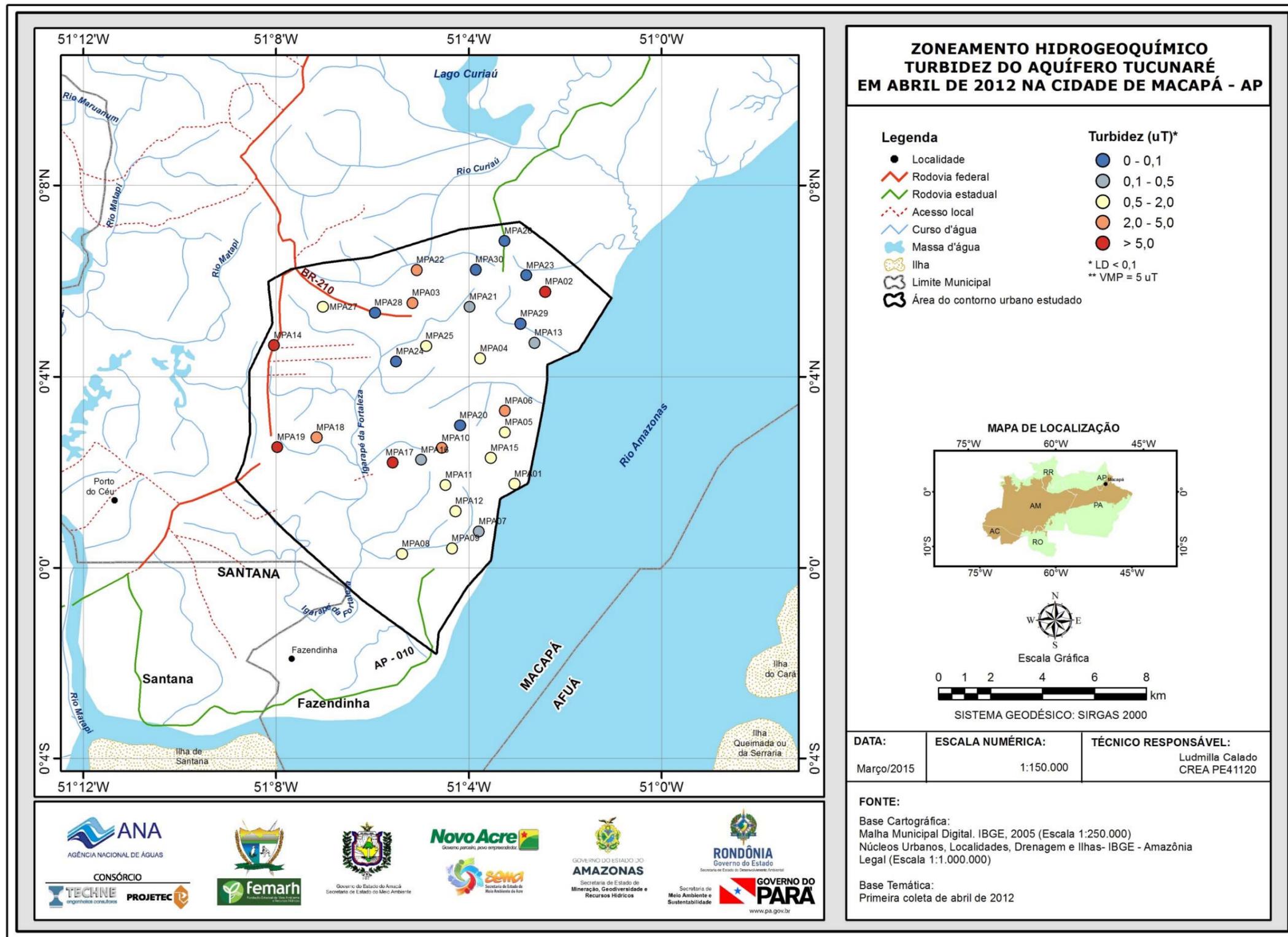


Figura 5.9a – Distribuição pontual dos valores de turbidez (uT) da água dos poços monitorados no Aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

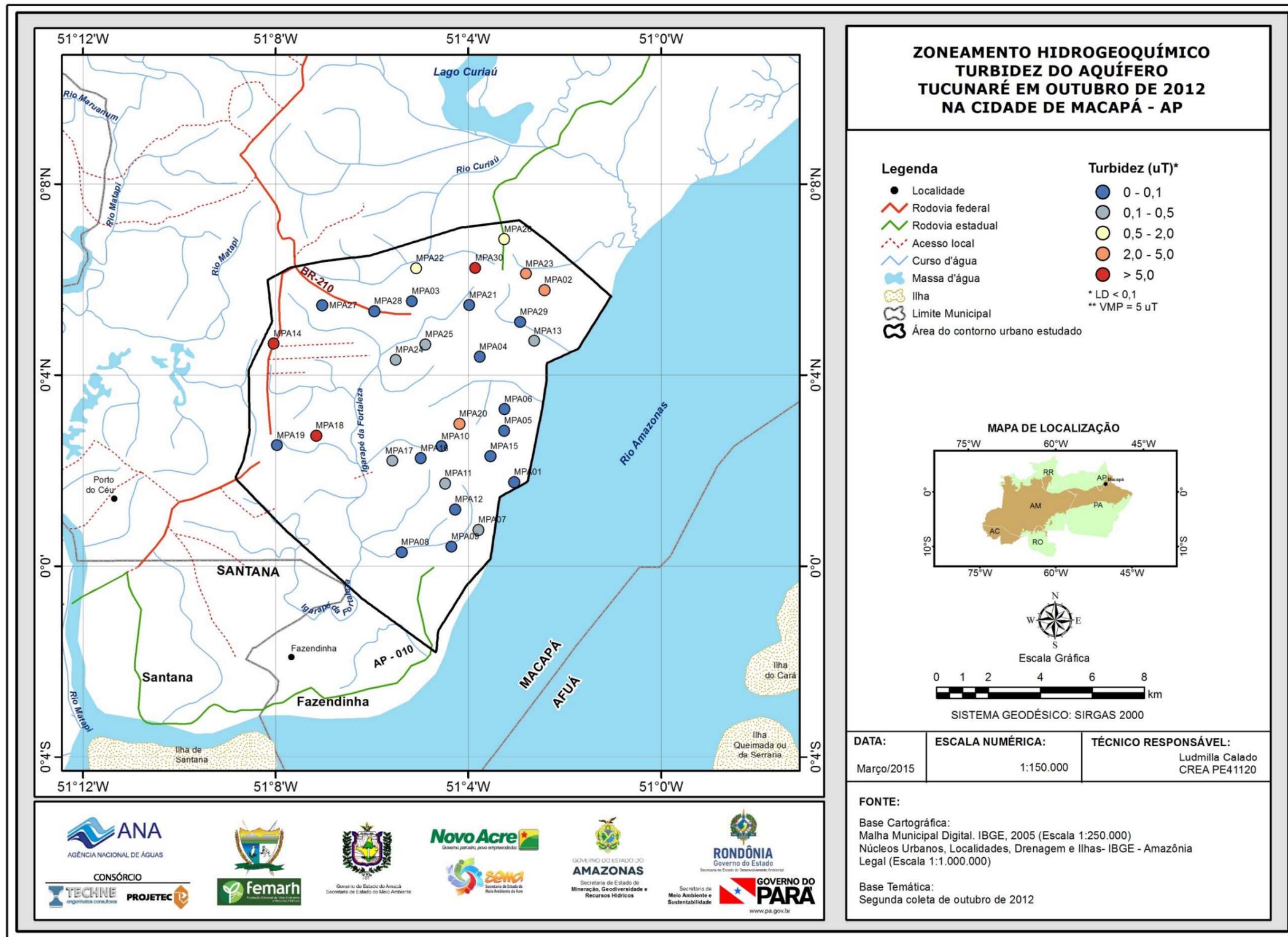


Figura 5.9b – Distribuição pontual dos valores de turbidez (uT) da água dos poços monitorados no Aquífero Tucunaré no período seco (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.3 – Condutividade Elétrica (CE)

A condutividade elétrica depende da quantidade de sais dissolvidos na água e, portanto, a sua medição permite estimar rapidamente a quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD) presentes na água, usando (por exemplo) uma relação do tipo  $STD = aCE$ , sendo "a" um coeficiente angular variável de aproximadamente 0,55 a 0,75.

A condutividade elétrica das águas do aquífero Tucunaré, de acordo com a estatística descritiva (**tabela 5.18**) variou no ano de 2012, de 46  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 274  $\mu\text{S}/\text{cm}$  no período chuvoso, com média de 141,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e mediana de 128,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . No período seco a variação entre o mínimo e o máximo foi de 11  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 236  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , com média de 83  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e mediana de 84,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Os valores de condutividade elétrica obtidos em Macapá, em sua maioria, são baixos, haja vista que, 73% e 97% dos poços, respectivamente, na primeira e segunda coleta apresentaram resultados inferiores a 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Isto é reflexo do clima da região amazônica, com alta incidência de chuvas, o que assegura a renovação constante das águas dos aquíferos e dos rios ali presentes.

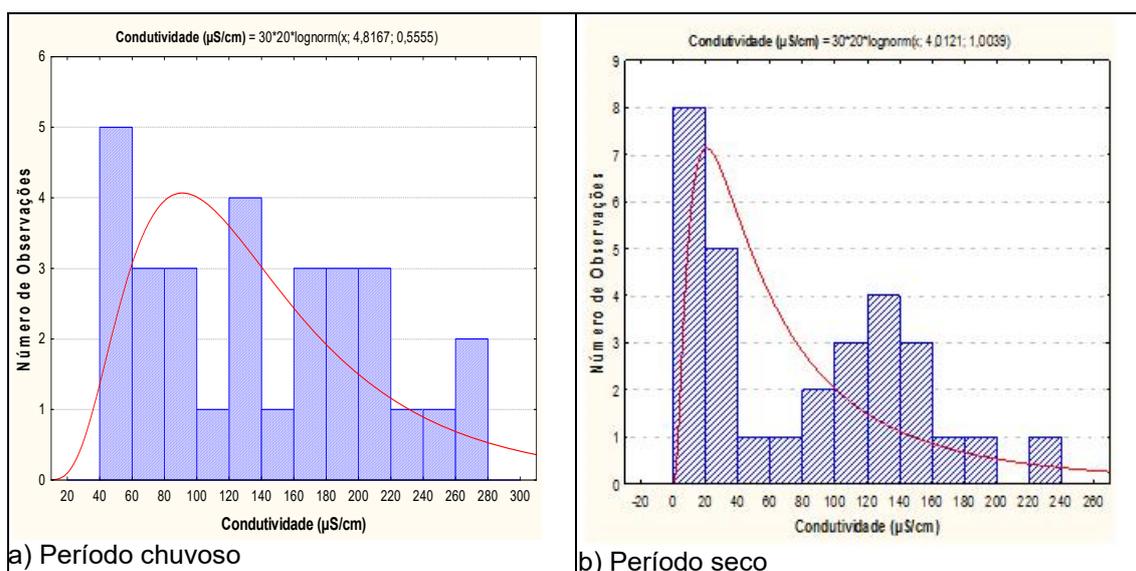
**Tabela 5.18** – Estatística descritiva da Condutividade Elétrica do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (CE-1) - abril de 2012 e no período seco (CE-2) - outubro de 2012.

CE	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
CE-1	30	141,9	115,3	168,4	128,5	46,0	274,0	71,2	13,0	0,3
CE-2	30	83,0	59,1	106,9	84,5	11,0	236,0	64,1	11,7	0,5

Os valores de CE acima de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  encontrados no período chuvoso em 27% (8/30) das amostras e 3% (1/30) no período seco são coerentes, pois segundo Esteves (1998), a condutividade elétrica depende da composição iônica dos corpos d'água, e pode ser influenciado, também pelo volume de chuvas, o que é bastante frequente na região estudada.

De acordo com Celligoi (1999), quanto à condutividade elétrica, as águas subterrâneas podem ser classificadas em água destilada, quando a CE varia de 0,5 a 2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; água potável, quando a CE varia de 50 a 1.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; e água poluída, quando a CE é  $> 10.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Nesse caso, as águas do aquífero Tucunaré, em Macapá, em ambos os períodos de coleta, podem ser classificadas como potável.

Os histogramas de frequência da condutividade elétrica ilustrados na **figura 5.10** nos dois períodos de amostragem foram modelados por funções de distribuição de probabilidade lognormal. Esse modelo de fdp permite concluir com risco calculado (**tabela 5.19**) que os valores de CE estimados apresentam alguma influência da sazonalidade, haja vista que os valores no período chuvoso são superiores ao período seco.



**Figura 5.10** – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade da Condutividade Elétrica (CE) do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

Tais resultados sugerem a influência do fenômeno da ressaca na área de estudo, pois no inverno, as águas do rio sob a influência da maré invadem a região, facilitando a intrusão de águas de origem salina, que possuem em sua constituição elevadas quantidades de íons, os quais elevam a condutividade elétrica. Aliado a isso, existe o fato de que no período chuvoso as águas encontram-se ricas em sólidos dissolvidos, o que também contribui para a elevação da CE.

Outro fator que também pode contribuir para a elevação da condutividade elétrica é a ausência de esgotamento sanitário na área de estudo, haja vista que em ambos os períodos de coleta, foi verificada correlação significativa, entre as variáveis CE,  $\text{NH}_3$  e  $\text{NO}_3$ , como pode ser observado no **item 5.1.8**, o que sugere contaminação das águas subterrâneas a partir da infiltração do esgoto *in natura*.

**Tabela 5.19** – Distribuição de probabilidade da Condutividade Elétrica do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (CE-1) - abril de 2012 e no período seco (CE-2) - outubro de 2012.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
CE-1	123,6	77,4	60,6	49,6	39,5	33,9
CE-2	55,3	23,7	15,3	10,6	7,0	5,3
Razão	2,2	3,3	4,0	4,7	5,6	6,3

### ***Zoneamento da Condutividade Elétrica***

De acordo com o zoneamento da condutividade elétrica apresentado na **figura 5.11a** e na **figura 5.11b** para o período chuvoso e de estiagem, respectivamente, é possível verificar que na primeira coleta os valores predominantes se enquadram na faixa de 100 a 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , cobrindo praticamente toda a área, enquanto que na segunda campanha, os valores mais altos estão na faixa entre 50 a 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Em ambas as coletas, os valores mais altos, superiores a 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  se restringem a pontos isolados, todavia em número bem maior no período chuvoso do que de estiagem, por conta da ressaca, como já anteriormente explicado.

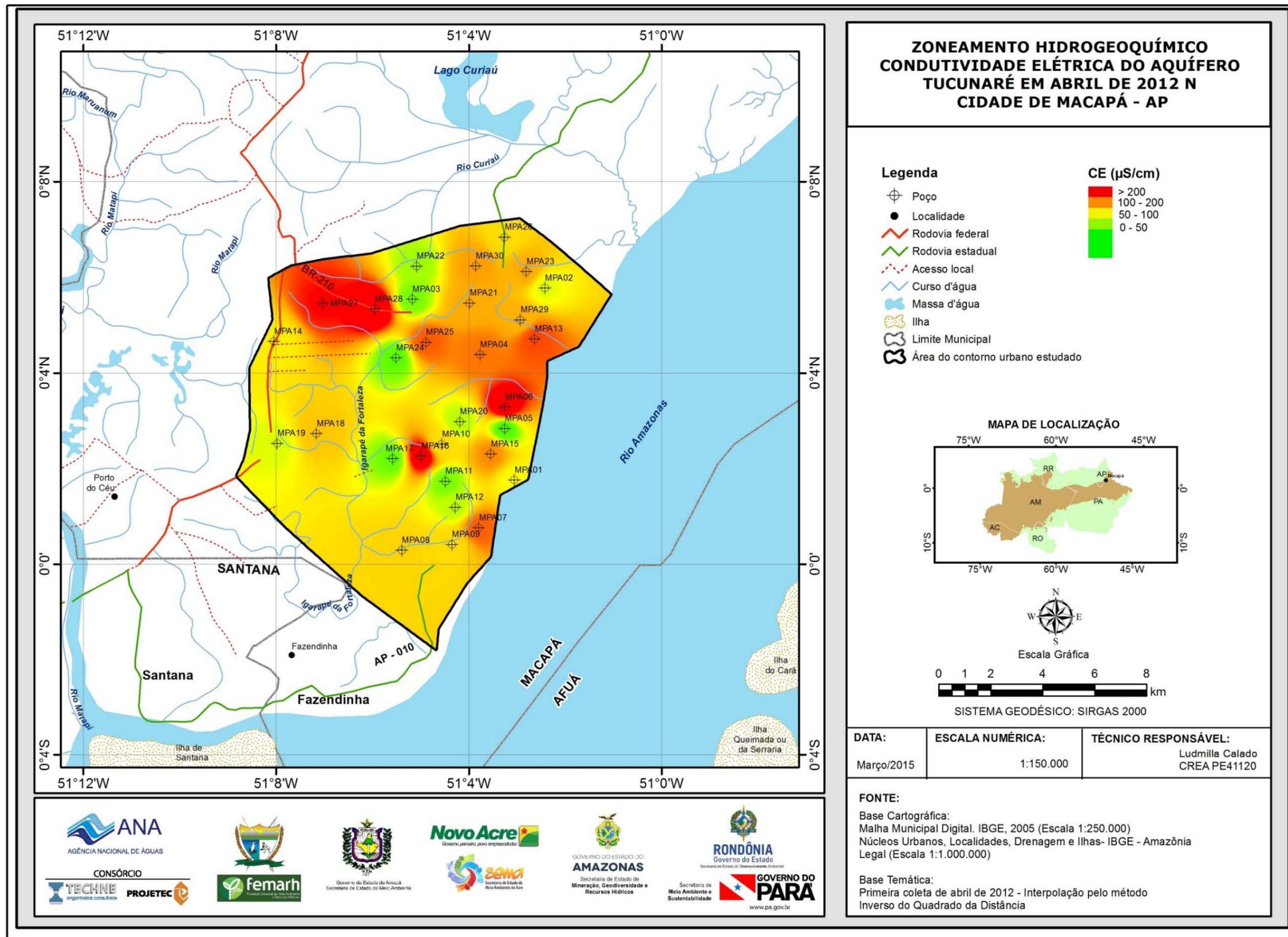


Figura 5.11a – Zoneamento da Condutividade elétrica (µS/cm) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

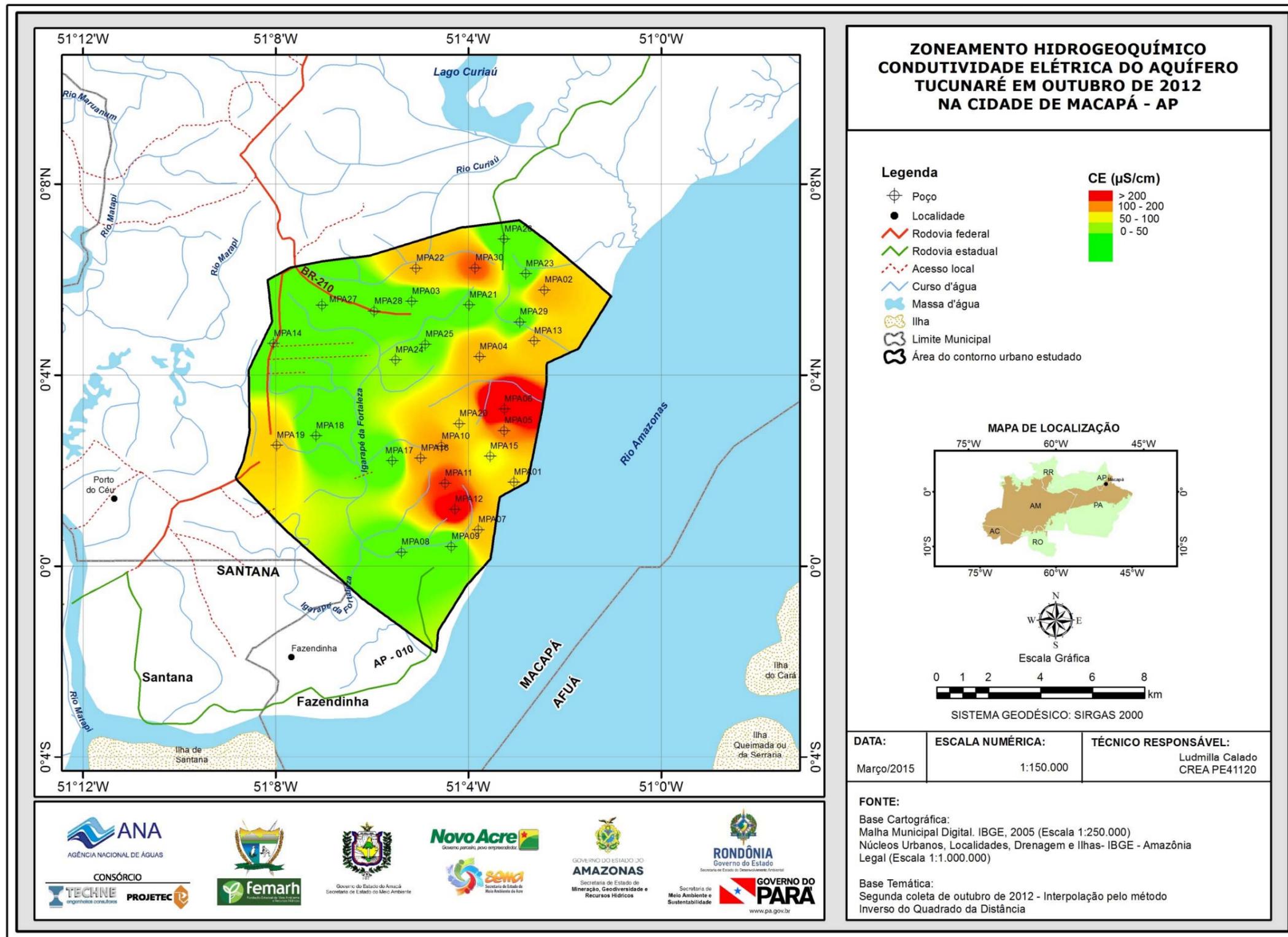


Figura 5.11b – Zoneamento da Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período seco (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

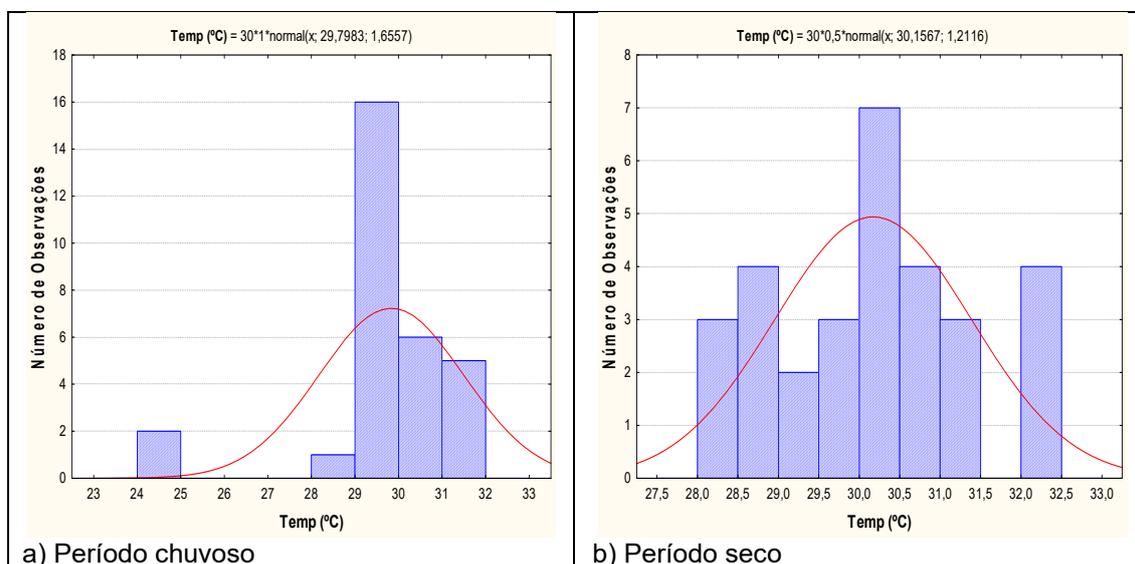
## 5.2.4 – Temperatura

A estatística descritiva da temperatura das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá (**tabela 5.20**) indica que no período chuvoso a temperatura das águas coletadas no aquífero variou de 24,4°C a 31,9°C, apresentando uma amplitude térmica de 7,5°C, com média de 29,8°C e mediana de 29,9°C. No período de estiagem as temperaturas foram mais altas, variando de 28,2°C a 32,3°C, porém, com uma amplitude térmica de apenas 4,1°C, apresentando média e mediana igual a 30,2°C. A média e a mediana, tanto no período chuvoso quanto no período seco, assumem valores muito próximos, em torno de 30°C caracterizando uma distribuição normal.

**Tabela 5.20** – Estatística descritiva da Temperatura (°C) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (T-1) - abril de 2012 e no período seco (T-2) - outubro de 2012.

T	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
T-1	30	29,8	29,2	30,4	29,9	24,4	31,9	1,7	0,3	-2,2
T-2	30	30,2	29,7	30,6	30,2	28,2	32,3	1,2	0,2	0,2

Os histogramas de frequência da temperatura das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, modelados por curvas normais de distribuição de probabilidade na amostragem do período chuvoso (abril de 2012) e do período de estiagem, em outubro de 2012, são mostrados na **figura 5.12**.



**Figura 5.12** – Histogramas de frequência e curvas normais de distribuição de probabilidade da Temperatura (°C) das águas do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

Os resultados da **tabela 5.21**, permitem concluir, que as temperaturas das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré são praticamente as mesmas, tanto no período chuvoso quanto no período de estiagem, e não indicam efeito da sazonalidade, haja vista que a razão entre os valores das campanhas é da ordem de 1 (um). A média relativamente alta de 30°C, possivelmente decorre da influência da temperatura ambiente sobre as águas subterrâneas, uma vez

que as águas do aquífero Tucunaré são pouco profundas e influenciadas pelas águas superficiais. De fato, medidas de temperatura da água do rio Amazonas em Macapá (Gonçalves, 2009), efetuadas em duas áreas distintas, indicaram na primeira, no período chuvoso, média de 29°C em abril e no período de estiagem, 30°C em novembro; na segunda área, a média foi de 30°C, sendo de 31,9°C em maio (período chuvoso) e de 27,3°C em novembro (período de estiagem).

**Tabela 5.21** – Distribuição de probabilidade da temperatura T(°C) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (T-1) - abril de 2012 e no período seco (T-2) - outubro de 2012.

P(x≥a)	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
T-1	29,8	28,4	27,7	27,1	26,4	25,9
T-2	30,2	29,1	28,6	28,2	27,7	27,3
Razão	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9

### ***Zoneamento da Temperatura***

A distribuição espacial da temperatura das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré na cidade de Macapá no período chuvoso de abril de 2012, ilustrada na **figura 5.13a**, é caracterizada em quase toda a área por valores na faixa de 24 a 29°C. No período seco, há um ligeiro aumento nos valores da temperatura, sendo verificado que a classe mais frequente é a de 30 a 31°C (**figura 5.13b**). Em ambas as coletas é possível verificar que as águas mais quentes, na faixa de 31 a 32°C ocorrem de modo disperso ao longo da área de estudo.

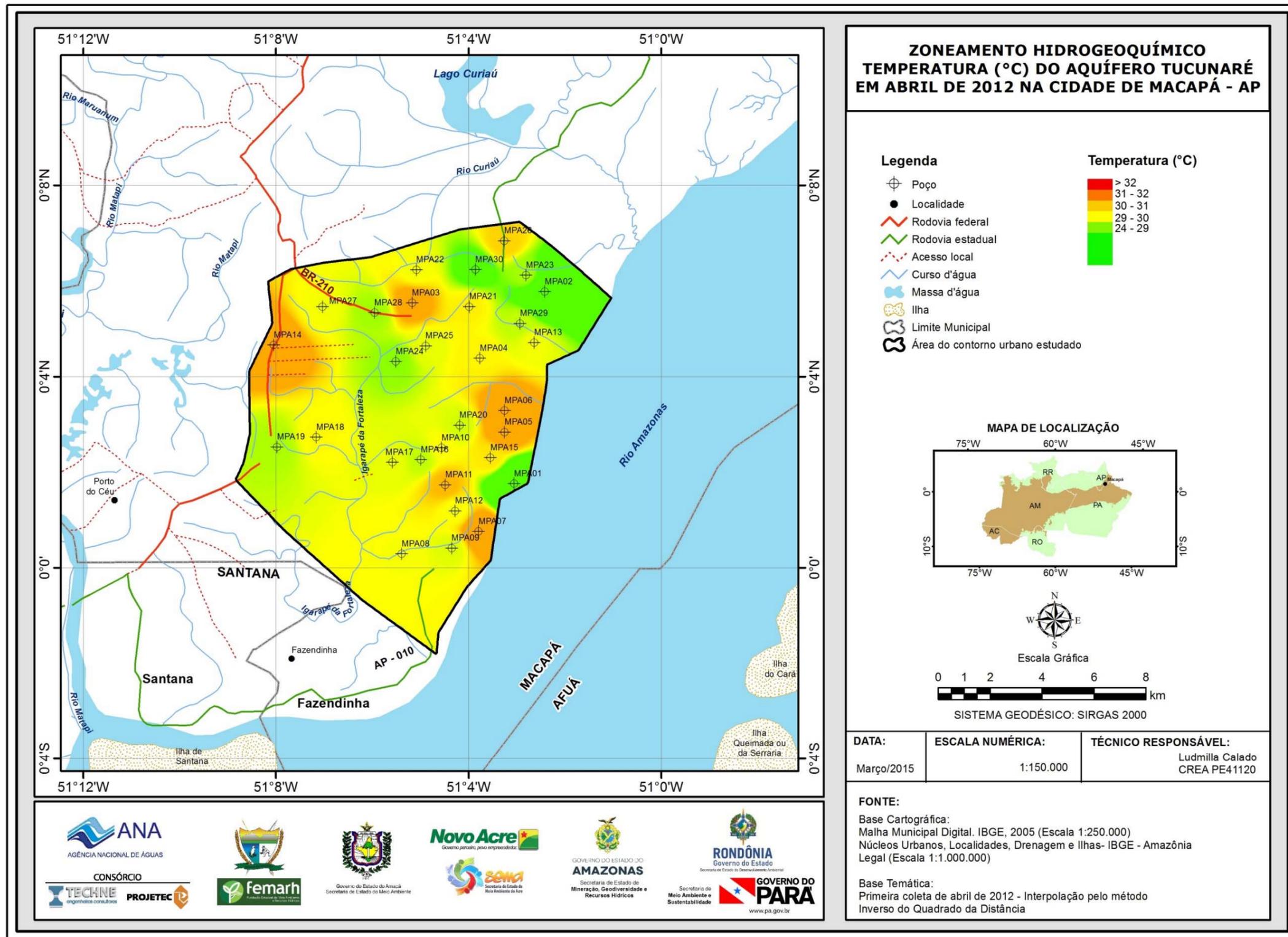


Figura 5.13a – Zoneamento da Temperatura (°C) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

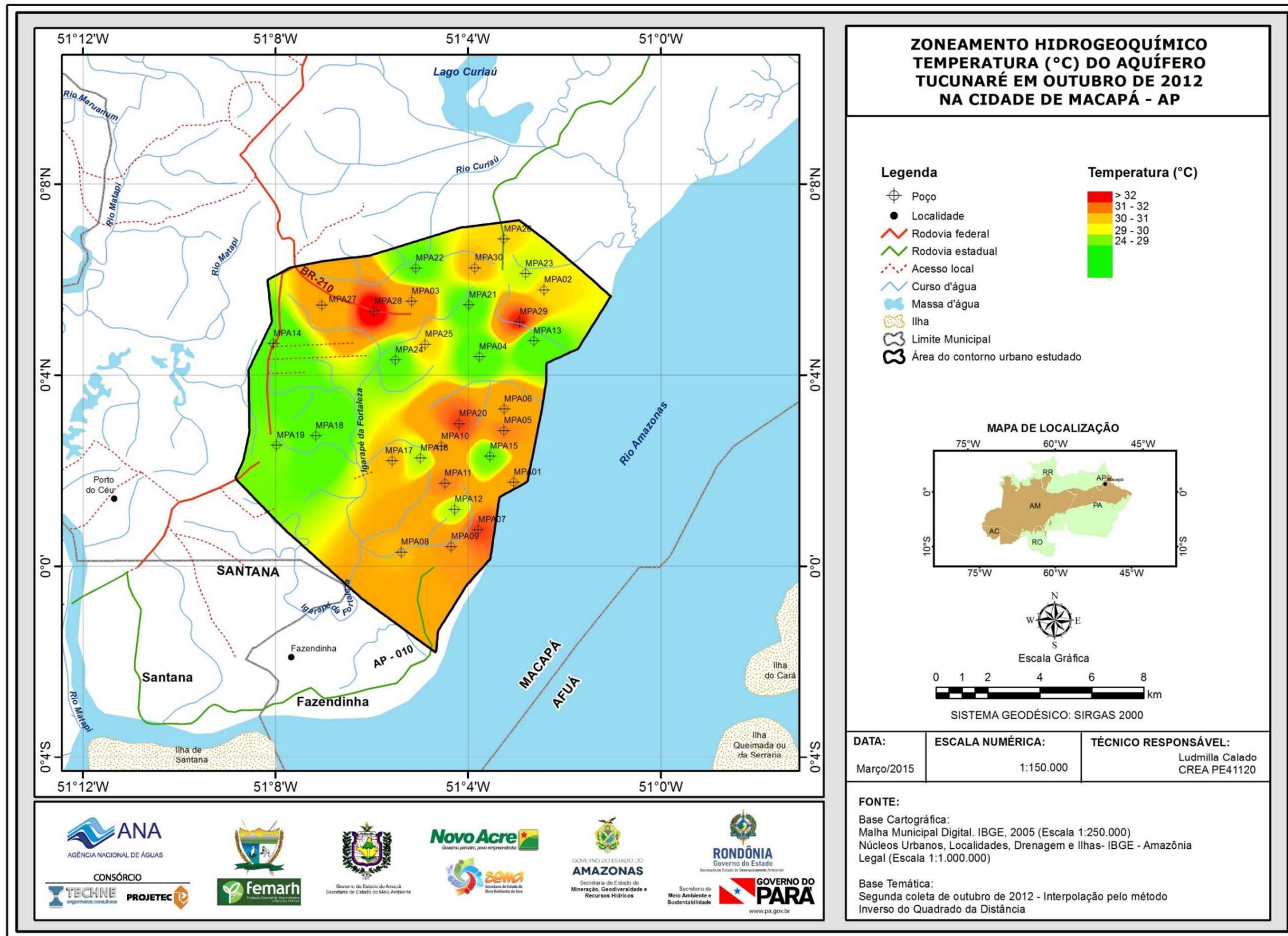


Figura 5.13b – Zoneamento da Temperatura (°C) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

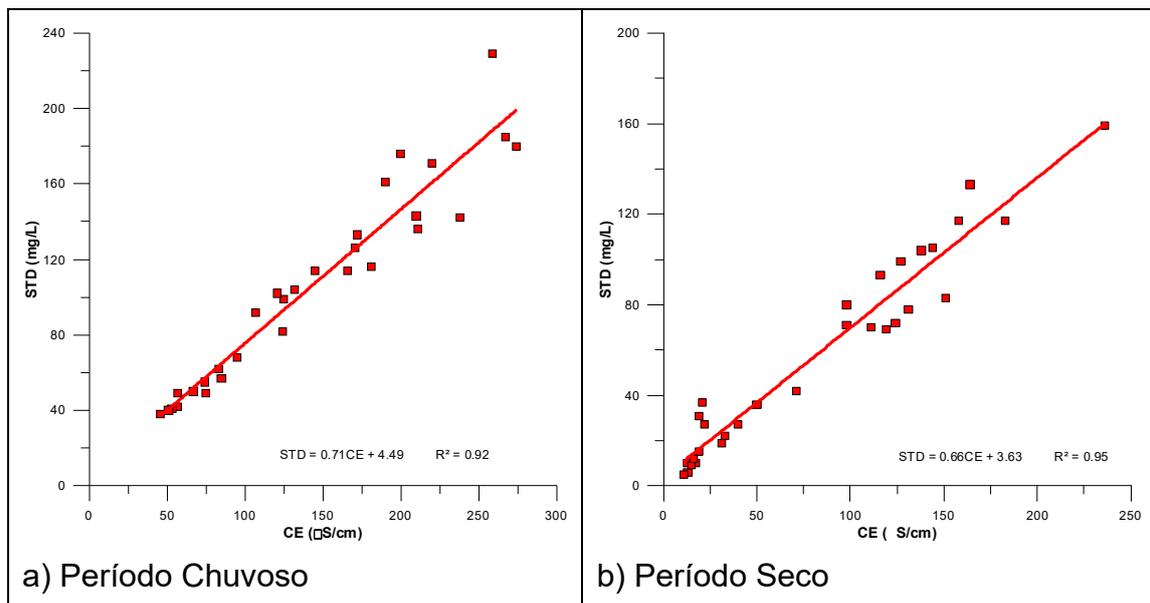
### 5.2.5 – Sólidos Totais Dissolvidos (STD)

Os sólidos totais dissolvidos correspondem à massa total dos constituintes minerais presentes na água, por unidade de volume. Na maioria das águas naturais, os sólidos totais dissolvidos (STD) se relacionam com a condutividade elétrica (CE) através de uma equação linear com coeficiente angular situado na faixa de 0,55 a 0,75. No caso do aquífero Tucunaré em Macapá, os dados desses parâmetros são apresentados na **tabela 5.22**.

**Tabela 5.22** – Valores de condutividade elétrica CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e sólidos totais dissolvidos STD (mg/L) no aquífero Tucunaré em Macapá – AP na primeira e na segunda campanha de amostragem.

Poço	Abril de 2012		Outubro de 2012	
	CE	STD	CE	STD
MPA01	95	68	98	80
MPA02	85	57	131	78
MPA03	57	42	19	15
MPA04	200	176	127	99
MPA05	46	38	151	83
MPA06	267	185	236	159
MPA07	210	143	116	93
MPA08	132	104	21	37
MPA09	125	99	13	6
MPA10	121	102	144	105
MPA11	57	49	164	133
MPA12	75	49	183	117
MPA13	220	171	119	69
MPA14	107	92	11	5
MPA15	190	161	71	42
MPA16	259	229	138	104
MPA17	53	41	19	31
MPA18	145	114	17	10
MPA19	83	62	111	70
MPA20	74	55	98	71
MPA21	172	133	22	27
MPA22	67	50	124	72
MPA23	171	126	31	19
MPA24	51	40	50	36
MPA25	211	136	40	27
MPA26	124	82	13	10
MPA27	238	142	15	9
MPA28	274	180	16	12
MPA29	166	114	33	22
MPA30	181	116	158	117

Na correlação linear estabelecida com os dados da **tabela 5.22** os coeficientes angulares encontrados são, respectivamente, iguais a 0,71 no período chuvoso e 0,66 no período seco, como ilustrado na **figura 5.14**.



**Figura 5.14** – Relações entre a condutividade elétrica e os sólidos totais dissolvidos no aquífero Tucunará em Macapá - AP, no período chuvoso (abril de 2012) e no período seco (outubro de 2012).

Os teores de STD nas águas subterrâneas do aquífero Tucunará na cidade de Macapá, segundo a estatística descritiva mostrada na **tabela 5.23**, variam de 38 mg/L a 229 mg/L, no período chuvoso, com média de 105,2 mg/L e mediana de 103 mg/L. No período de estiagem, o mínimo observado foi de 5 mg/L e o máximo de 159 mg/L, com média de 58,6 mg/L e mediana de 55,5 mg/L. Os valores de STD obtidos nas duas campanhas estão abaixo do VMP da Portaria MS 2914/2011, que recomenda o valor de 1.000 mg/L como padrão organoléptico de potabilidade. Em ambas as campanhas, todas as amostras apresentaram resultados de STD abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 396/2008, de 1.000.000  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano, em relação a esse parâmetro.

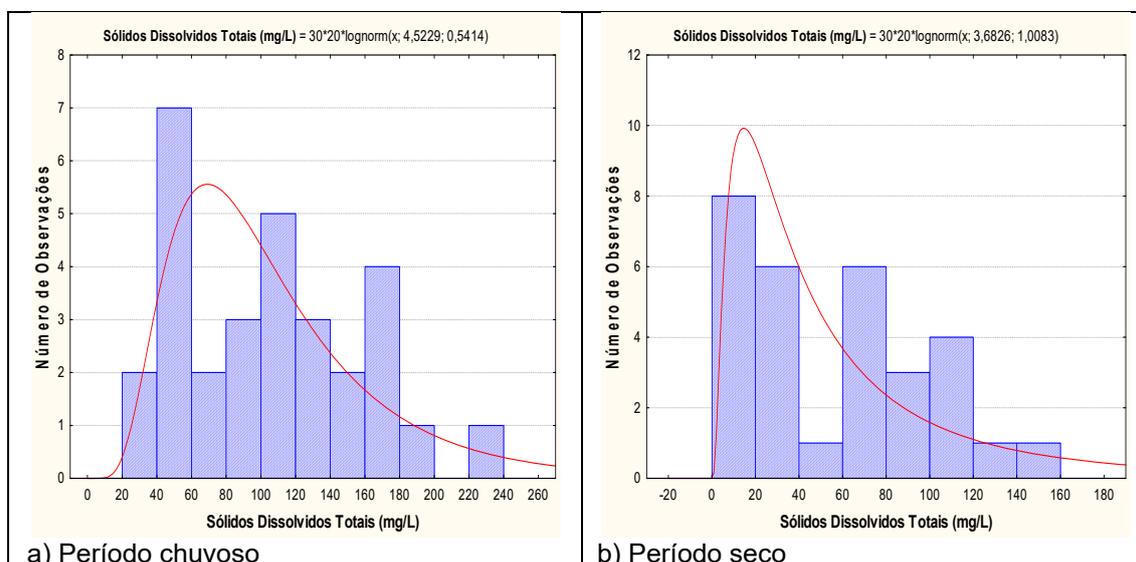
**Tabela 5.23** – Estatística descritiva dos teores de STD (mg/L) do Aquífero Tucunará no período chuvoso (STD-1) - abril de 2012 e no período seco (STD-2) - outubro de 2012.

STD	N	Média	Confiança 95%	Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria	
STD-1	30	105,2	85,6	124,8	103,0	38,0	229,0	52,5	9,6	0,5
STD-2	30	58,6	42,3	74,9	55,5	5,0	159,0	43,7	8,0	0,5

De modo geral, os valores de STD obtidos nas águas do aquífero Tucunará são baixos, o que pode ser justificado pela constante renovação das águas associada a elevada precipitação na região, típica da floresta amazônica.

As funções lognormais de distribuição de probabilidade que modelam os histogramas de frequência dos sólidos totais dissolvidos na primeira e na segunda campanha de amostragem de água na cidade de Macapá (**figura**

5.15) permitiram avaliar com risco calculado, que no período chuvoso a concentração de STD é maior do que no período de estiagem (tabela 5.24), indicando uma influência da sazonalidade, haja vista que o valor da razão entre as duas campanhas é superior a 1 (um).



**Figura 5.15** – Histograma de frequência e curva normal de distribuição de probabilidade dos Sólidos Totais Dissolvidos do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

**Tabela 5.24** – Distribuição de probabilidade dos Sólidos Dissolvidos Totais do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (STD-1) - abril de 2012 e no período seco (STD-2) - outubro de 2012.

P(x≥a)	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
STD-1	92,1	58,4	46,0	37,8	30,3	26,1
STD-2	39,7	17,0	10,9	7,6	5,0	3,8
Razão	2,3	3,4	4,2	5,0	6,0	6,9

Os resultados acima apresentados indicam que na época de estiagem as águas subterrâneas se apresentam mais diluídas e, portanto, com menores valores de STD. Na região de Macapá, tudo indica que isto se deve às influências de infiltrações de origem fluvial através do rio Amazonas, onde no pico do período de altas águas ocorre o fenômeno ressaca e inunda as "áreas de ressaca". Essas águas são mais ricas em constituintes sólidos dissolvidos do que as águas meteóricas. Do mês de maio em diante, com o decaimento do nível do rio Amazonas até o período de estiagem (outubro), as infiltrações tendem a se realizar, no trimestre maio-julho, a partir das precipitações, cujas águas são muito mais diluídas do que as águas superficiais.

Além do fenômeno da ressaca que ocorre em Macapá, outro fator que justifica os altos teores de STD encontrados, principalmente no período chuvoso, nas águas do aquífero Tucunaré, são as contaminações do lençol freático, resultantes da ausência de esgotamento sanitário, haja vista que a área de estudo está inserida em local bastante urbanizado. Essa situação é tão flagrante que se encontra constantemente noticiada na imprensa, como por exemplo, se lê na reportagem do Jornal - *O Estado de São Paulo*, em

03/09/2013, que "a cidade de Macapá possui 17% de sua população residente em áreas de ressaca, e apenas 3% da área do município é servida por rede de coleta de esgoto". Ainda segundo a notícia, "a maioria da população utiliza fossas sanitárias, que em muitos casos são cavadas ao lado de poços d'água, e como cerca de 60% das casas não possuem água encanada, essa realidade do saneamento básico transforma Macapá, capital do Amapá, com 407 mil habitantes, no retrato do descaso. Todos os dias, crianças lotam hospitais com verminoses, dor de barriga e doenças de pele".

### **Zoneamento dos Sólidos Totais Dissolvidos**

O zoneamento dos teores de sólidos totais dissolvidos (STD) nas águas do aquífero Tucunaré no período chuvoso de abril de 2012 na cidade de Macapá, ilustrado na **figura 5.16a** revela que o predomínio espacial é de águas nas faixas de 50 a 100 mg/L e de 100 a 150 mg/L. No período de estiagem em outubro de 2012 (**figura 5.16b**) as classes predominantes estão entre 0 a 50 mg/L e 50 a 100 mg/L. Valores abaixo e/ou acima desses limites ficam restritos a manchas isoladas na área de estudo.

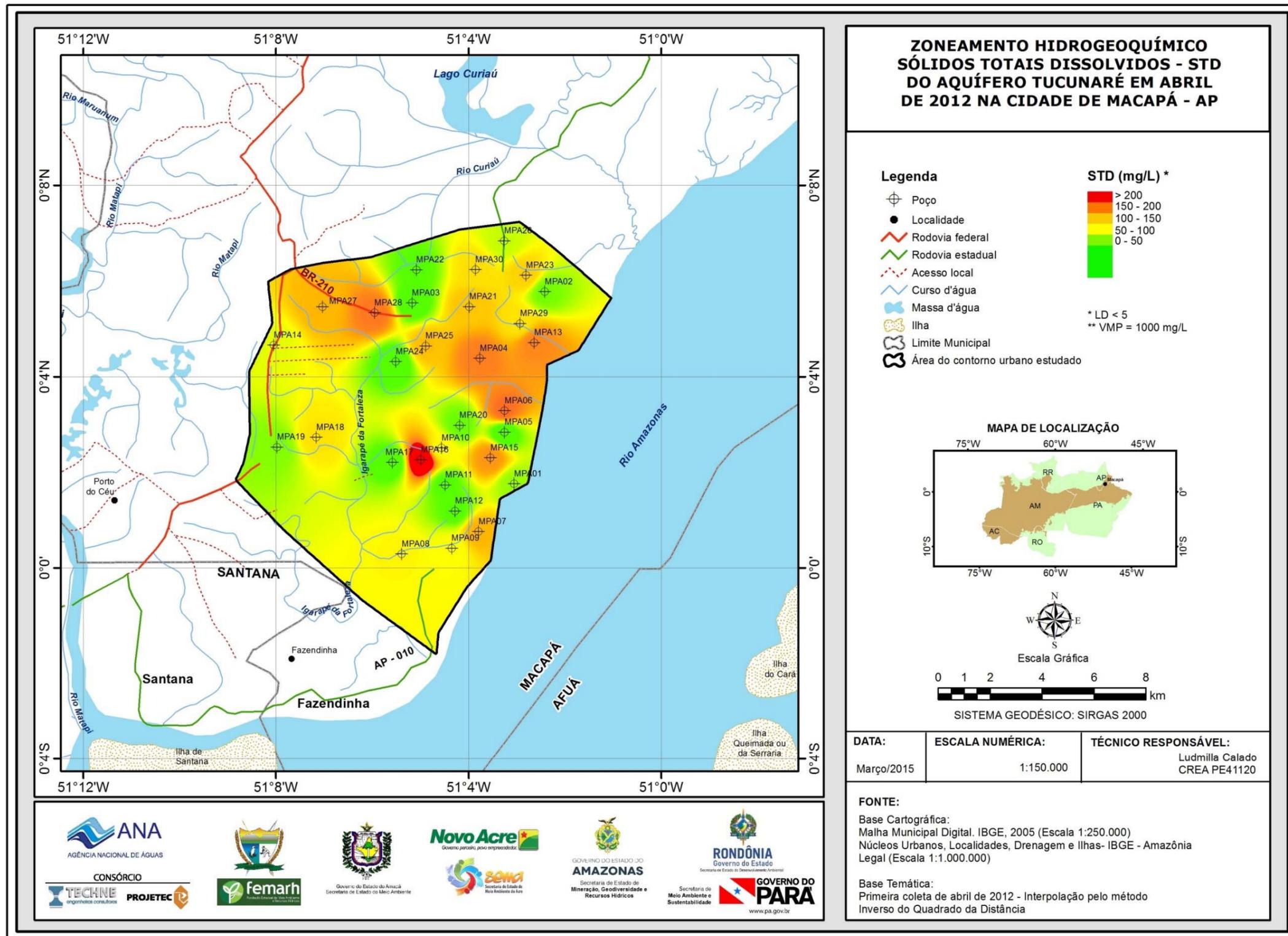


Figura 5.16a – Zoneamento de STD (mg/L) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

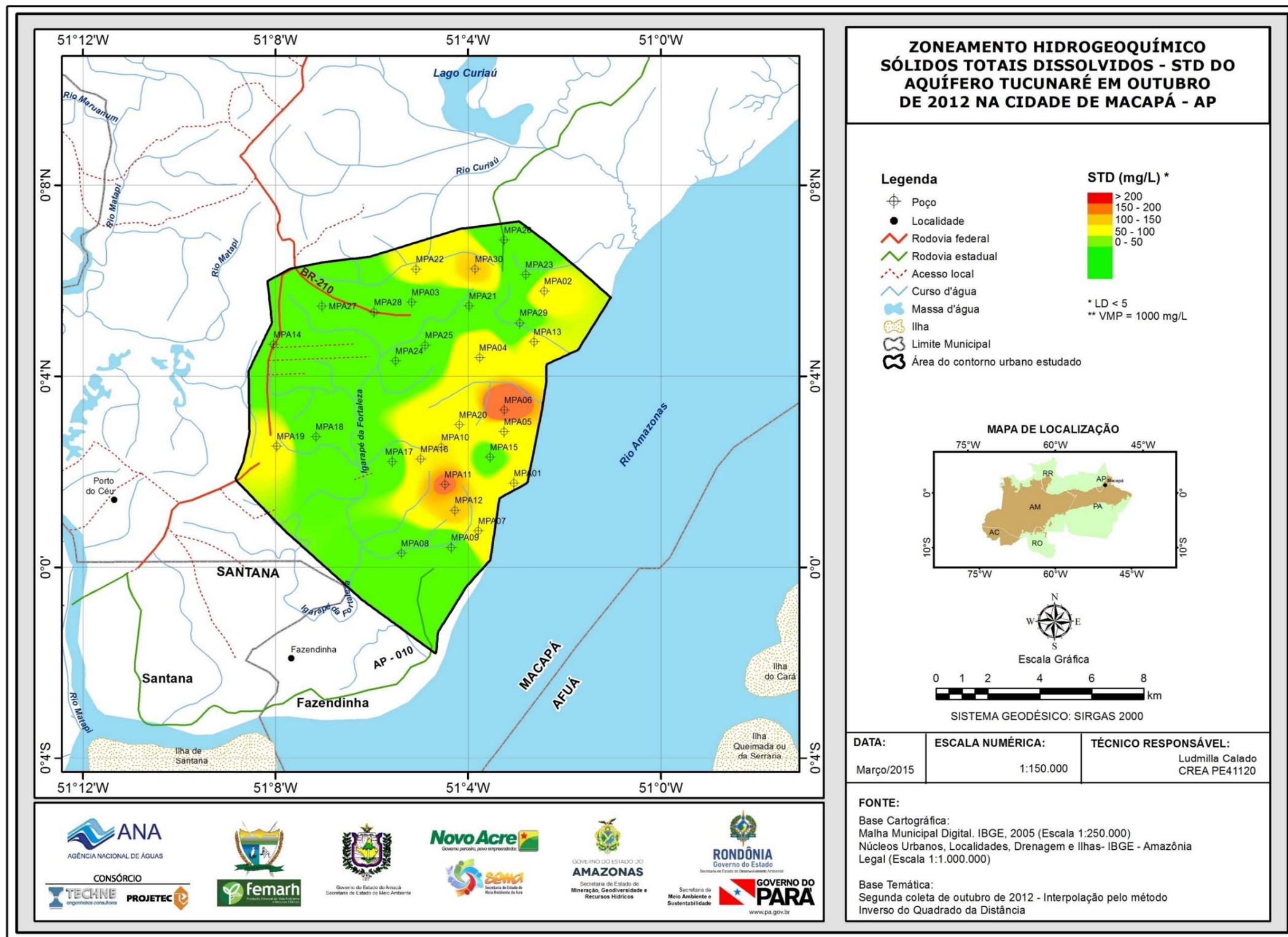


Figura 5.16b – Zoneamento de STD (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.6 – Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH é a medida da concentração do íon hidrogênio ou de sua atividade, e é definido como o logaritmo negativo da concentração de íons de hidrogênio.

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Na maior parte das águas naturais, o pH é controlado pelo sistema de equilíbrio do gás carbônico – bicarbonatos – carbonatos. Por causa da concentração iônica das águas, o pH se encontra na faixa de 0 a 14; a classificação da água quanto ao pH é feita utilizando o critério:

pH < 7 – água ácida;

pH = 7 – água neutra;

pH > 7 – água básica.

O pH caracteriza a água sob o aspecto de corrosão ou agressividade, propriedades que devem ser consideradas na caracterização das águas quanto ao uso. Em geral, águas de pH baixo, por serem ácidas, tendem a ser corrosivas ou agressivas a certos metais, às paredes de concreto e às superfícies de cimento-amianto, enquanto que águas de alto pH tendem a formar incrustações.

Segundo a Resolução CONAMA 396/2008 e a Portaria MS 2914/11 não há um limite máximo de pH definido para o consumo humano. Contudo, a Portaria MS 2914/11, no art. 39, § 1º, recomenda que, no sistema de distribuição, o pH da água seja mantido na faixa de 6,0 a 9,5 para atender aos padrões organolépticos de potabilidade. No caso específico de Macapá para os 30 poços cujas águas foram analisadas quimicamente, o pH é ácido no momento da coleta, mas tão logo sofre aeração no reservatório ou até mesmo dentro do próprio poço, tende a atingir a neutralidade e ao final normalmente se enquadra na faixa prescrita pela Portaria MS 2914/11.

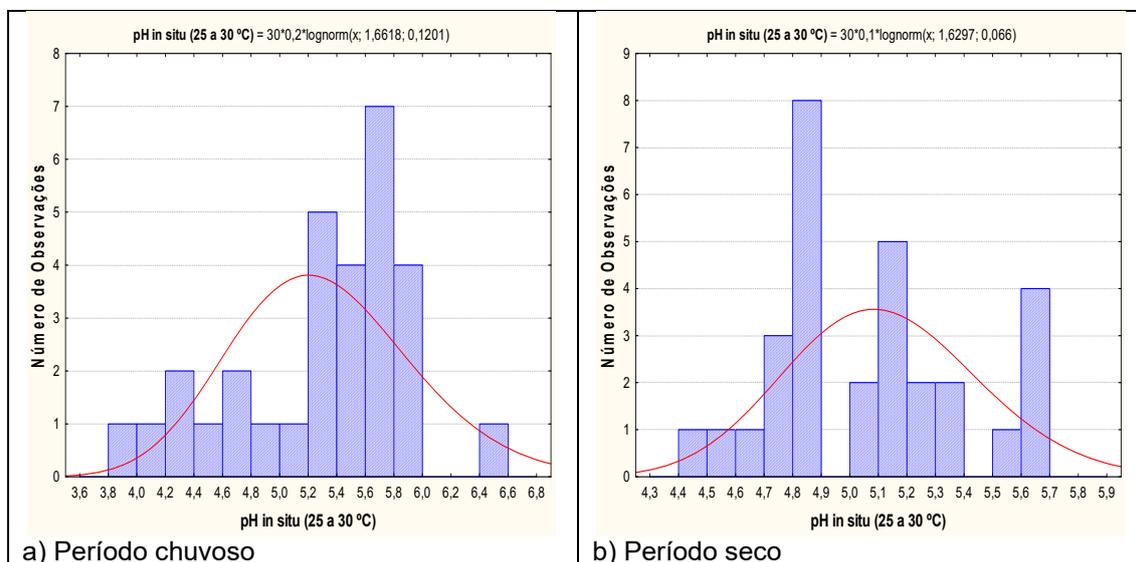
De acordo com a estatística descritiva (**tabela 5.25**), nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá, os valores de pH *in situ* encontrados no período chuvoso ficaram compreendidos entre 4,0 e 6,4, com média de 5,3 e mediana de 5,5. No período seco os valores oscilaram entre um mínimo de 4,5 e máximo de 5,7, com média e mediana igual a 5,1.

**Tabela 5.25** – Estatística descritiva do pH *in situ* no período chuvoso – abril de 2012 (pH-1) e no período seco – outubro de 2012 (pH-2).

pH	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
pH-1	30	5,3	5,1	5,5	5,5	4,0	6,4	0,6	0,1	-0,7
pH-2	30	5,1	5,0	5,2	5,1	4,5	5,7	0,3	0,1	0,4

A **figura 5.17** apresenta os histogramas de frequência e as respectivas curvas ajustadas a lei normal de distribuição de probabilidade para a primeira e segunda campanha de amostragem, realizadas respectivamente em abril e outubro de 2012.

Na **tabela 5.26** são indicados com risco calculado, os valores estimados do pH *in situ* no período chuvoso e no período seco. Os resultados mostram que em ambas as campanhas, as águas se caracterizam essencialmente como ácidas, e que não há influência da sazonalidade, haja vista que a razão dos valores medidos nas coletas são muito próximas ou iguais a 1 (um).



**Figura 5.17** – Histograma de frequência e curvas normais ajustadas de distribuição de probabilidade do pH *in situ* do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

Os resultados obtidos no aquífero Tucunaré, em Macapá se devem a alta pluviosidade da região amazônica, pois a água da chuva é o principal agente do intemperismo químico, que infiltra e percola as rochas. De acordo com Teixeira *et al.* (2000), isso ocorre, pois a água da chuva é rica em O<sub>2</sub>, que interage com o CO<sub>2</sub> da atmosfera e adquire caráter ácido, e em contato com o solo, onde a respiração das plantas pelas raízes e a oxidação da matéria orgânica enriquecem o ambiente em CO<sub>2</sub>, diminuem ainda mais o seu pH.

**Tabela 5.26** – Distribuição de probabilidade do pH *in situ* no período chuvoso – abril de 2012 (pH-1) e no período seco – outubro de 2012 (pH-2).

P(x≥a)	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
pH-1	5,3	4,8	4,5	4,3	4,1	4,0
pH-2	5,1	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4
Razão	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9

### **Zoneamento do pH**

A distribuição espacial dos valores de pH *in situ*, no período chuvoso (**figura 5.18a**) e período seco (**figura 5.18b**) mostram que em ambas as campanhas de amostragem, as águas se apresentaram predominantemente na faixa de pH de 4 a 5, seguido de 5 a 6. Acima e abaixo dessa faixa existem poucos valores que se distribuem pontualmente pela região. De modo geral, os valores de pH caracterizam as águas do aquífero Tucunaré como ácidas, cuja baixa concentração em espécies químicas é indicativa de serem elas provenientes de recargas recentes, condicionadas pelo clima da PHA.

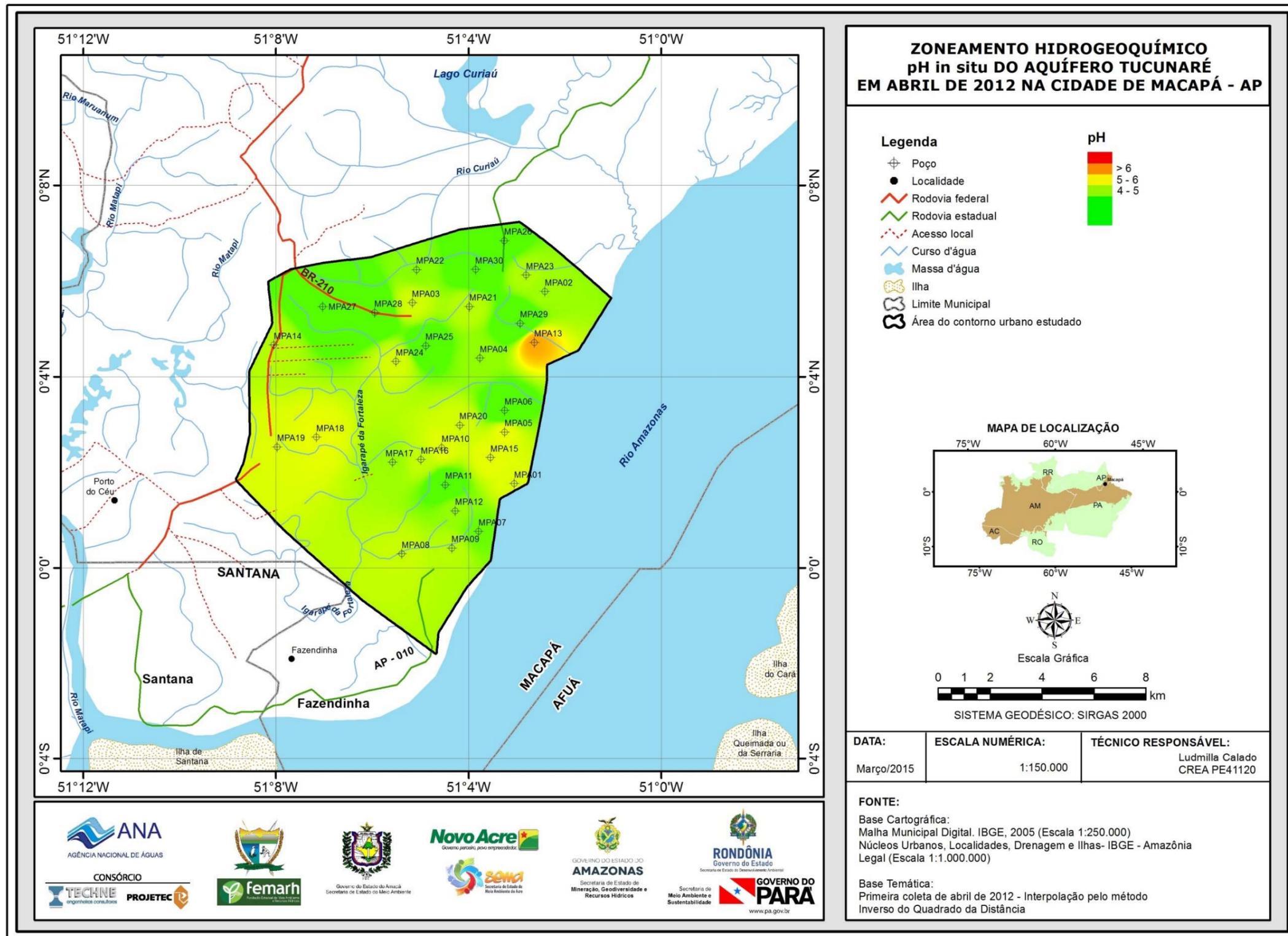


Figura 5.18a – Zoneamento do pH *in situ* das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

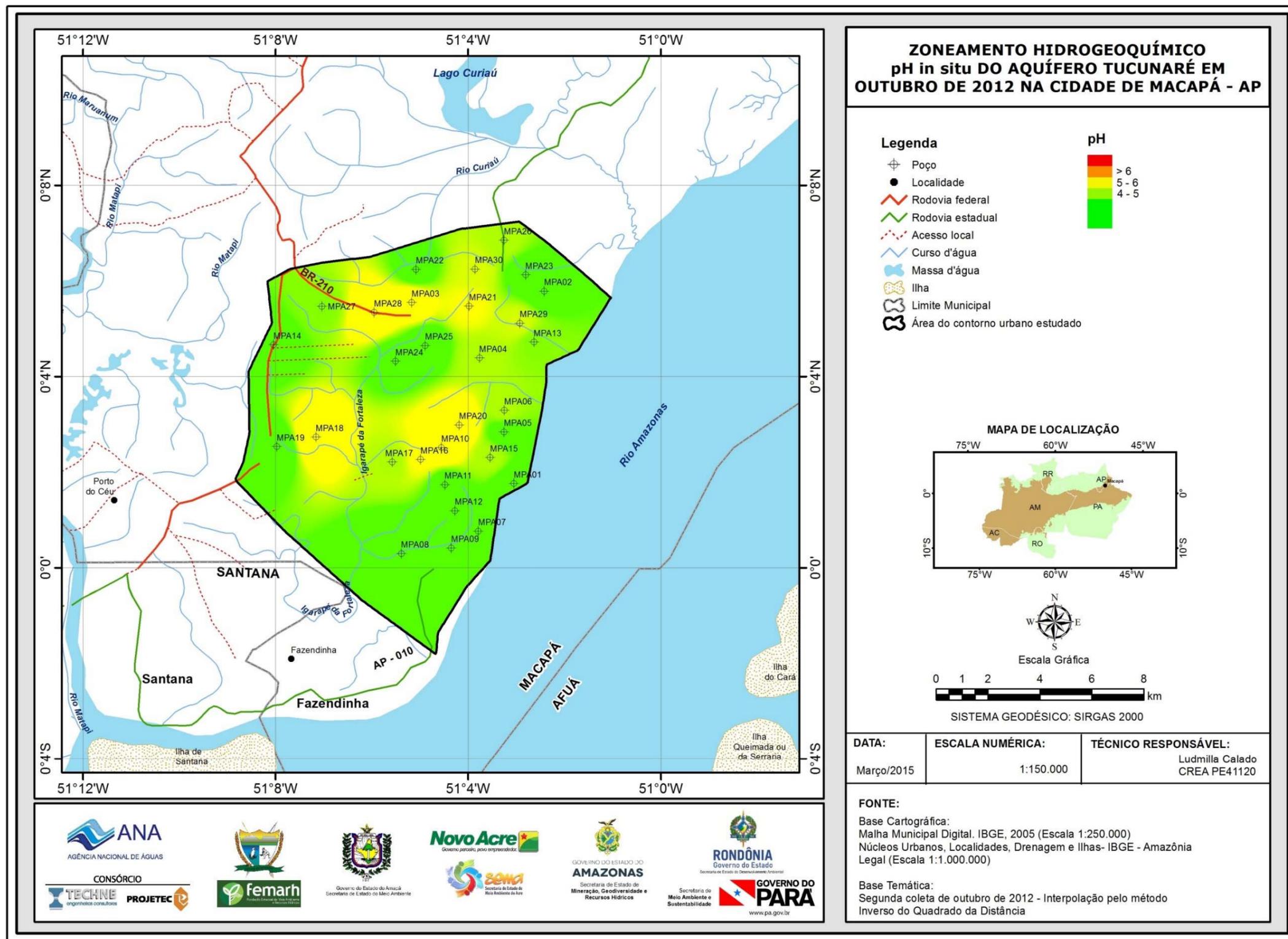


Figura 5.18b – Zoneamento do pH *in situ* das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.7 – Potencial Redox (Eh)

O equilíbrio de oxidação e redução de um meio é descrito através do conceito de atividade do elétron por pE (ou Eh) definido como:

$$pE = -\log a_{(e)} = -\log \{e\}$$

Valores baixos de Eh significam que há elétrons das substâncias dissolvidas na água, facilmente disponíveis, tornando o meio de natureza redutora. Valores altos de Eh significam que as substâncias dissolvidas predominantes são agentes oxidantes, ou seja, há poucos elétrons disponíveis para causar redução.

Em um diagrama de classificação das águas naturais sob diferentes condições Eh/pH (**figura 5.19**), a água da superfície ou da zona de aeração em contato com a atmosfera apresenta pE alto, onde o meio é oxidante e o ambiente aeróbico. Esse ambiente fica, portanto, na parte mais superior da zona de estabilidade da água. Nele se encontram: a água da chuva e a água dos oceanos. À medida que a água se afasta da superfície em direção ao subsolo, o pE diminui, caracterizando um aumento da atividade eletrônica do meio, até alcançar, na base da zona de estabilidade da água, um ambiente redutor e anaeróbico (Lenzi *et al.*, 2009). Nesse ambiente são encontradas as águas sem circulação em solos saturados; as águas estagnadas de lagos; as águas salgadas ricas em matéria orgânica. Nos aquíferos, a água subterrânea em movimento constitui um ambiente de transição entre esses dois extremos da zona de estabilidade da água (Merkel & Friedrich, 2008).

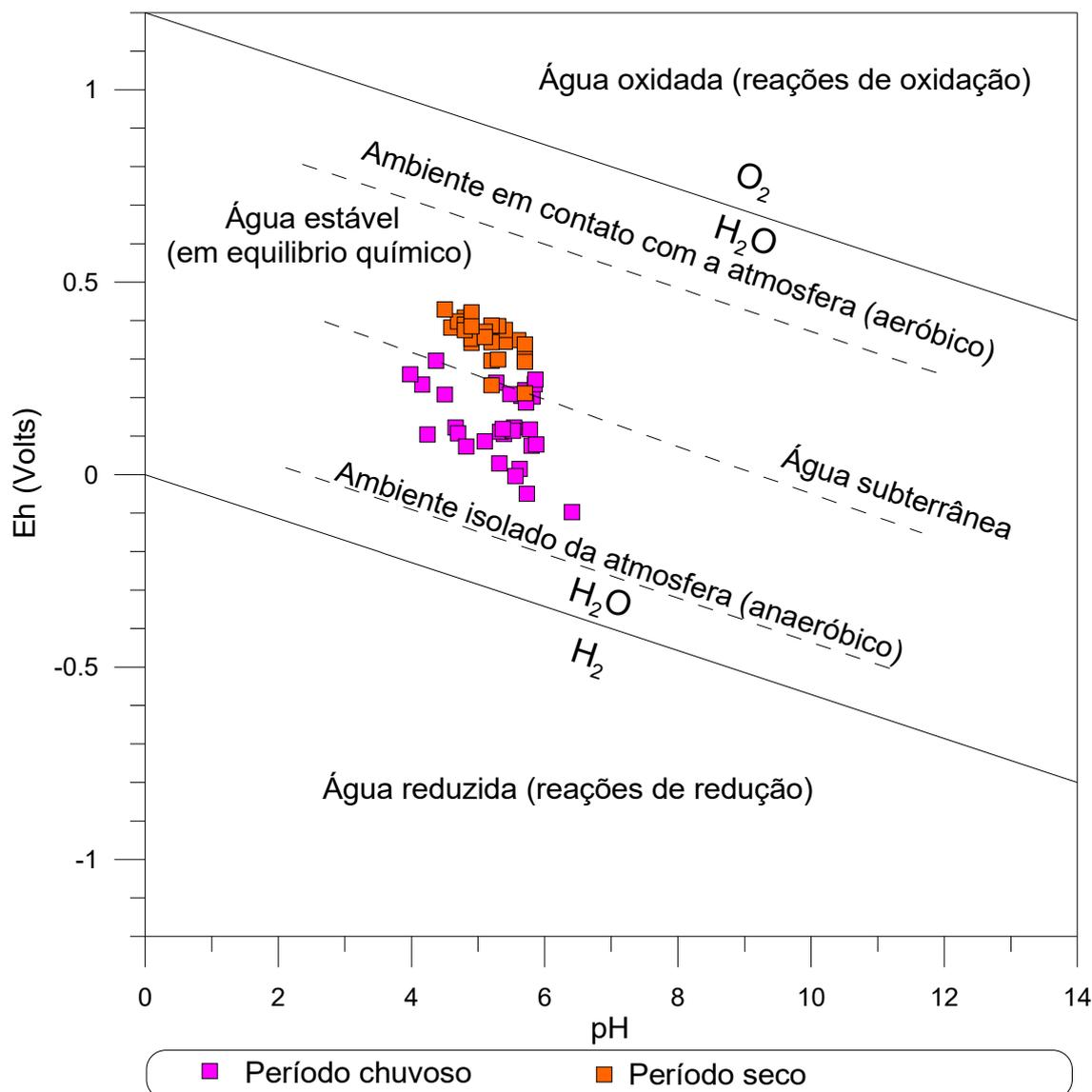
Segundo Merkel & Friedrich (2008), os diagramas pH-Eh podem ser utilizados como uma primeira aproximação para caracterizar as águas naturais. Todavia, é preciso que se esteja atento para as incertezas inerentes às medidas de Eh em campo, com equipamentos portáteis. Na prática essas medidas, independente do eletrodo de referência, são bastante problemáticas, pois são afetadas por contaminação e efeitos de memória em todos os tipos de eletrodos.

No aquífero Tucunaré em Macapá, os ajustes lineares entre pH e Eh (**figura 5.19**) feitos a partir dos dados medidos em campo foram:

No período chuvoso:  $Eh = -0,097 \text{ pH} + 0,637$  com  $R^2 = 0,27$

No do período seco:  $Eh = -0,099 \text{ pH} + 0,862$  com  $R^2 = 0,43$

Os baixíssimos coeficientes de determinação desses ajustes mostram que não existe correlação significativa entre pH e Eh de acordo com as medidas efetuadas em campo. Isto pode significar, para fins de modelagem termodinâmica, que a distribuição das espécies químicas não pode ser deduzida da concentração total de elementos via potencial redox medido.



**Figura 5.19** – Diagrama *pH versus Eh* (mV), de amostras de águas subterrâneas dos poços monitorados no aquífero Tucunaré na cidade de Macapá (*T in situ* variou de 25 a 32°C) nas duas campanhas de amostragem.

A estatística descritiva do Eh em Macapá, expressa na **tabela 5.27**, mostra que no período chuvoso os valores de Eh oscilaram entre -97,4 e 295,4 mV, com média de 132,2 mV e mediana igual a 118,1 mV. No período de estiagem os valores se apresentaram bem mais altos, oscilando entre 211 e 429 mV, com média de 356,3 mV e mediana de 373 mV.

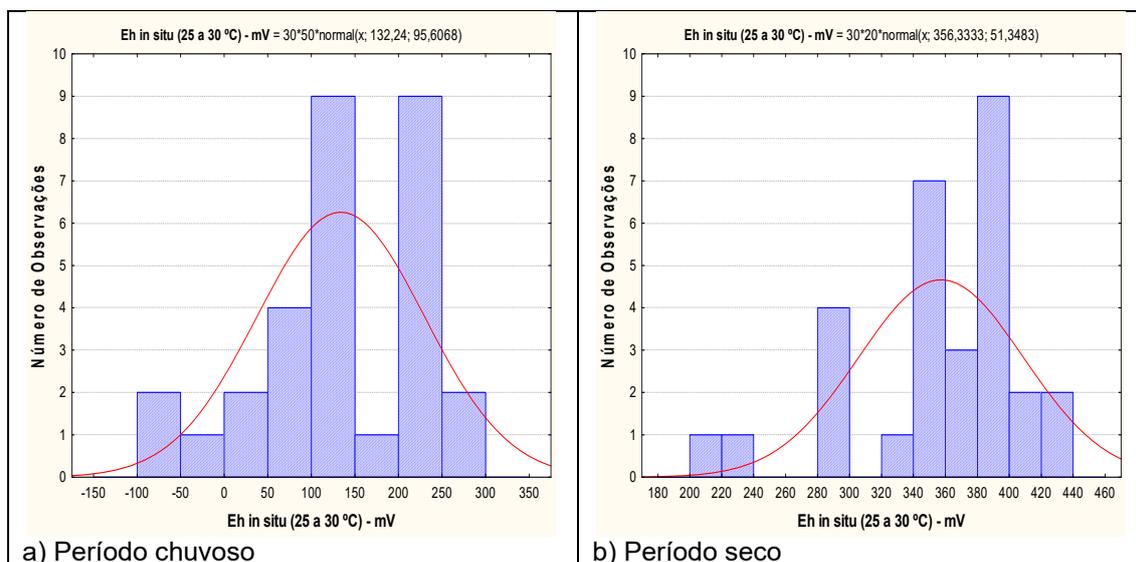
No período chuvoso, 90% (27/30) das amostras apresentaram resultados de Eh positivo, enquanto que no período de estiagem, 100% (30/30) das amostras obtiveram valores de Eh positivos, indicando que as águas do aquífero Tucunaré na cidade de Macapá se encontram em condições oxidantes.

**Tabela 5.27** – Estatística descritiva do Eh no período chuvoso – abril de 2012 (Eh-1) e no período seco – outubro de 2012 (Eh-2).

Eh (mV)	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
Eh-1	30	132,2	96,5	167,9	118,1	-97,4	295,4	95,6	17,5	-0,4
Eh-2	30	356,3	337,2	375,5	373,0	211,0	429,0	51,3	9,4	-1,2

De acordo com Bohn (1970) *in* Lima *et al.* (2005), o potencial redox ou atividade de elétrons influencia o estado de oxidação do hidrogênio, carbono, nitrogênio, oxigênio, enxofre, manganês, ferro, cobalto e cobre no sistema aquoso e representa uma medida quantitativa da tendência de um dado sistema oxidar ou reduzir substâncias ou elementos susceptíveis a esses fenômenos. Valores altos e positivos do potencial indicam uma baixa atividade de elétrons e, portanto, condições oxidantes; enquanto valores baixos e negativos do potencial, condições redutoras. Dessa forma, um sistema natural raramente alcançará o equilíbrio entre oxidação e redução, em razão da contínua adição de doadores de elétrons, isto é, compostos orgânicos oxidáveis, o que acarreta, no caso do aquífero Tucunaré, as diferenças de valores de Eh nas duas campanhas.

Os histogramas de frequência e as respectivas curvas de distribuição de probabilidade do Eh, modelados pela lei normal, são apresentados na **figura 5.20**.



**Figura 5.20** – Histograma de frequência e curva normal de distribuição de probabilidade do Eh do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

A estimativa dos valores da razão de Eh revelados pelo modelo estatístico (**tabela 5.28**), embora não apresentem uma tendência para um valor definido, mostram claramente que os valores do período chuvoso são muito menores do que os do período de estiagem, como atestam os valores inferiores a 1.

**Tabela 5.28** – Distribuição de probabilidade do Eh no período chuvoso – abril de 2012 (Eh-1) e no período seco – outubro de 2012 (Eh-2).

P(x≥a)	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Eh -1	132,2	51,8	9,7	-25,0	-64,1	-90,2
Eh -2	356,3	313,1	290,5	271,9	250,9	236,9
Razão	0,4	0,2	0,03	-0,09	-0,3	-0,4

Os resultados de Eh obtidos no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, são coerentes, pois de acordo com Costa & Ávila (2010), na zona não saturada há, geralmente, oxigênio suficiente na fase gasosa para garantir elevados valores de potencial redox (500 a 800 mV) na água. Apesar disso, condições redutoras ou parcialmente redutoras podem ocorrer em pequenos poros (micro-meios). Nos aquíferos perto da superfície as condições de oxidação prevalecem, assim, potenciais redox baixos nestes aquíferos podem indicar contaminação antropogênica. No caso de Macapá os valores de Eh mais elevados na estiagem são consistentes com a ideia acima apresentada, pois a zona de aeração, que no período chuvoso se encontra quase totalmente saturada por águas de infiltração em movimento, volta a ter espaços vazios preenchidos por oxigênio, o que consequentemente eleva o valor de Eh.

#### **Zoneamento do Eh**

Com base nos resultados obtidos, é possível verificar que os valores de Eh, no período chuvoso (**figura 5.21a**), são predominantemente baixos e positivos, quando comparados ao período de estiagem (**figura 5.21b**), ou seja, valores altos e positivos. Tais resultados indicam que no período de estiagem, as águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá estão com uma baixa atividade de elétrons e, portanto, condições oxidantes.

Na primeira coleta observa-se que os valores negativos de Eh se restringem a pontos isolados, o que reflete pouquíssimas condições redutoras.

Os valores positivos de Eh estão predominantemente distribuídos nas faixas de 0 a 100 e de 100 a 200 mV para a primeira campanha e de 300 a 400 mV, na segunda campanha de amostragem.

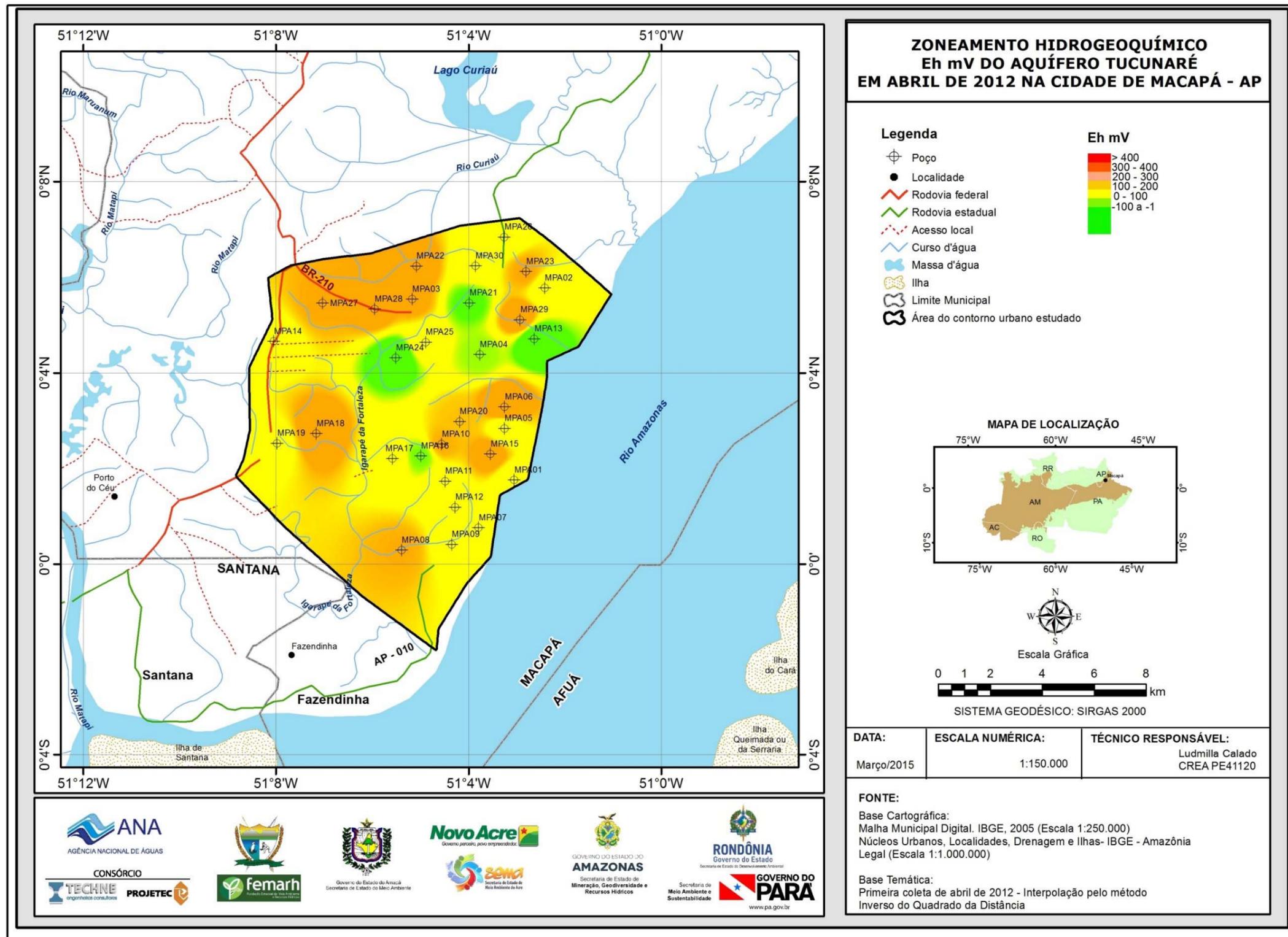


Figura 5.21a – Zoneamento do Eh (mV) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

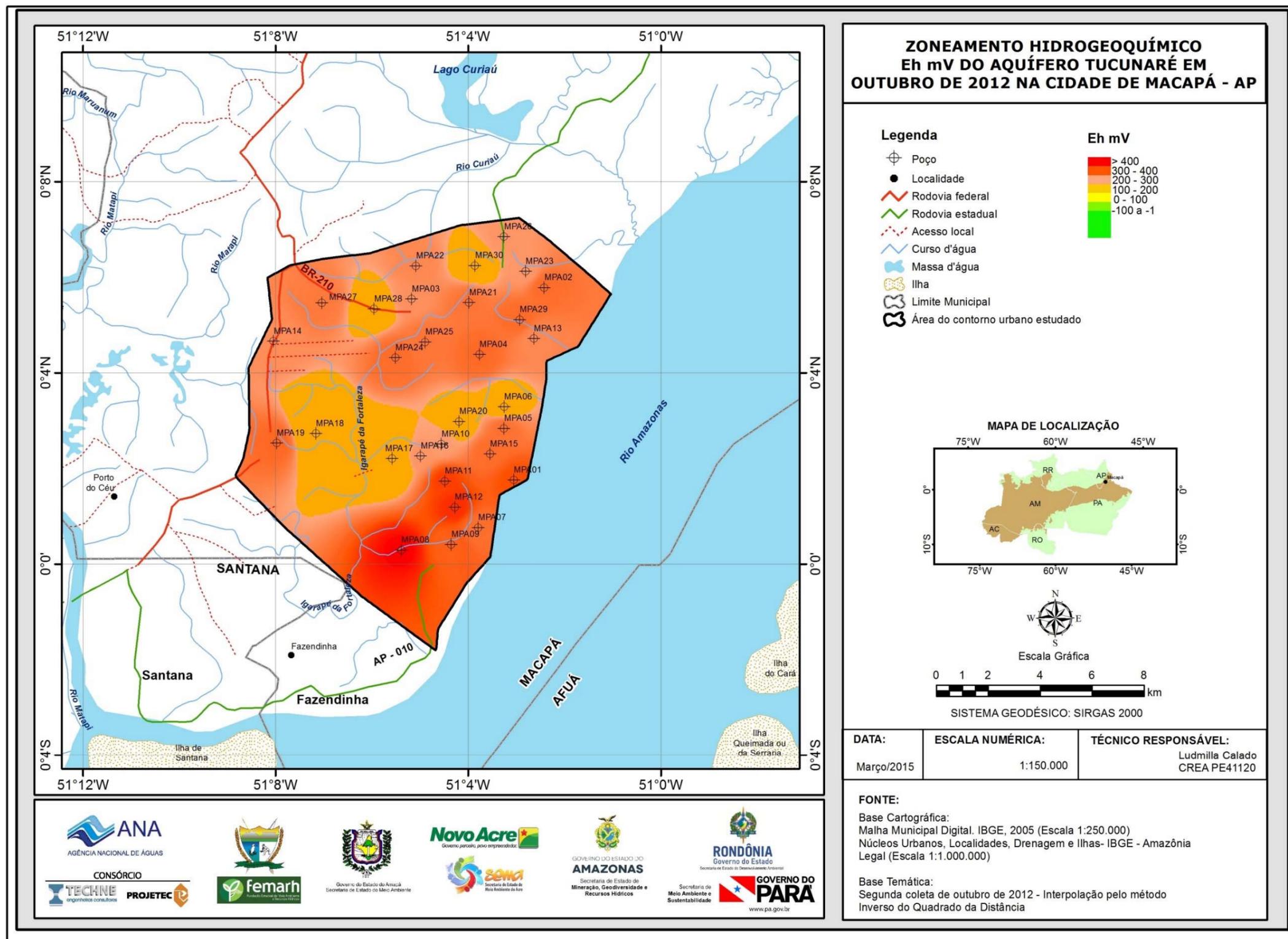


Figura 5.21b – Zoneamento do Eh (mV) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

## 5.2.8 – Cátions

### 5.2.8.1 - Sódio

O íon sódio ( $\text{Na}^+$ ) apresenta solubilidade muito elevada, sendo muito difícil de precipitar. Em água doce, a concentração de sódio varia de 1 a 150 mg/L; nas salmouras naturais pode chegar a 100.000 mg/L. Concentrações de sódio elevadas nas águas podem ser prejudiciais às plantas por reduzir a permeabilidade do solo, principalmente se as concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  forem baixas.

A estatística descritiva (**tabela 5.29**) indica que os teores de sódio nas águas do aquífero Tucunaré em Macapá variam entre 2 e 39,4 mg/L no período chuvoso, com média de 15,7 mg/L e mediana de 13,2 mg/L; no período de estiagem os teores estão compreendidos entre 0,8 e 28,6 mg/L, com média de 10,1 mg/L e mediana igual a 6,1. De acordo com a Portaria MS 2914/2011, todos os valores de sódio encontrados nas duas campanhas, estão abaixo do VMP de 200 mg/L, padrão definido como de potabilidade para humanos.

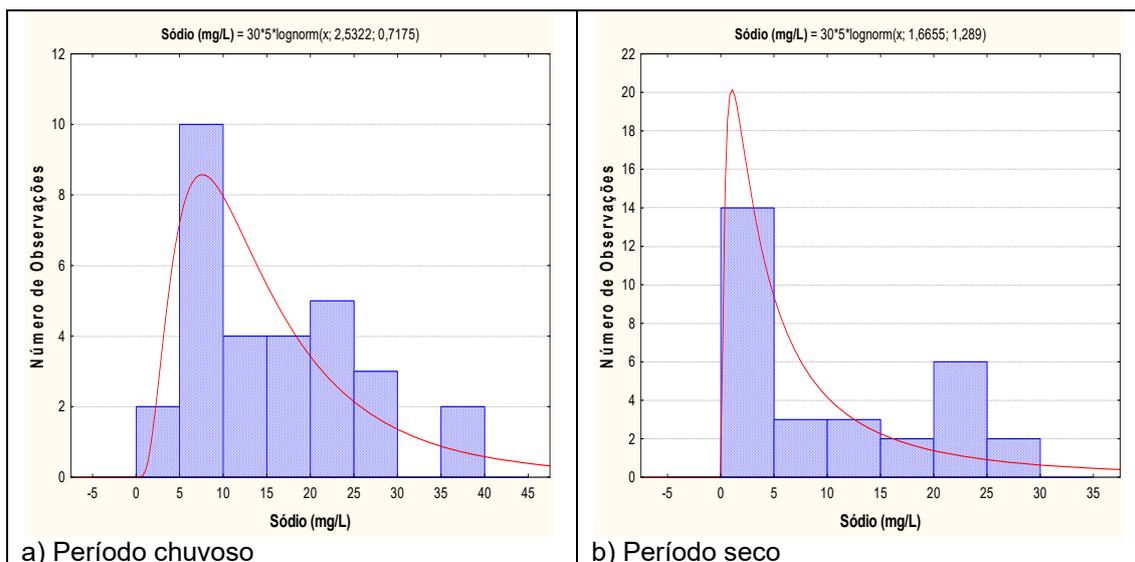
**Tabela 5.29** – Estatística descritiva do Sódio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Na-1) - abril de 2012 e no período seco (Na-2) - outubro de 2012.

Na	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
Na-1	30	15,7	12,0	19,4	13,2	2,0	39,4	10,0	1,8	0,8
Na-2	30	10,1	6,5	13,7	6,1	0,8	28,6	9,6	1,8	0,6

Em ambas as campanhas, todas as amostras apresentaram resultados abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 396/2008, de 200 e 300 mg/L, indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano e recreação, respectivamente.

O modelo de distribuição de probabilidade lognormal ajustado aos histogramas da **figura 5.22** permitiu estimar com risco calculado, os valores para o período chuvoso e para o período de estiagem.

Os resultados da **tabela 5.30** mostram que os teores de sódio são maiores no período chuvoso, indicando que existe influência da sazonalidade no tocante às concentrações de sódio na cidade de Macapá, haja vista que o valor da razão entre as duas campanhas é superior a 1 (um). A justificativa provável é de que a ocorrência do fenômeno ressaca favorece a intrusão de águas marinhas, através das "áreas de ressaca" na região (**item 2.6**), que se constituem em planícies aluviais, as quais são periodicamente inundadas pelo rio Amazonas, o que pode resultar em níveis mais elevados de sódio.



**Figura 5.22** – Histogramas de frequência e curvas aproximadas de distribuição de probabilidade lognormal do Sódio do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

**Tabela 5.30** – Distribuição de probabilidade do Sódio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Na-1) - abril de 2012 e no período seco (Na-2) - outubro de 2012.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Na-1	12,581	6,922	5,065	3,913	2,927	2,412
Na-2	5,288	1,787	1,014	0,635	0,375	0,264
Razão	2,4	3,9	5,0	6,2	7,8	9,1

### Zoneamento do Sódio

A distribuição dos teores de sódio nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré na cidade de Macapá no período chuvoso de abril de 2012 revela um predomínio de valores compreendidos no intervalo de 10 a 20 mg/L (**figura 5.23a**). No período seco, de outubro de 2012 (**figura 5.23b**), as classes predominantes de sódio estão entre 0 a 5 mg/L e 10 a 20 mg/L. Em ambas as campanhas de amostragem, os teores acima ou abaixo dessas classes representam alguns pontos distribuídos em manchas isoladas ao longo da área de estudo.

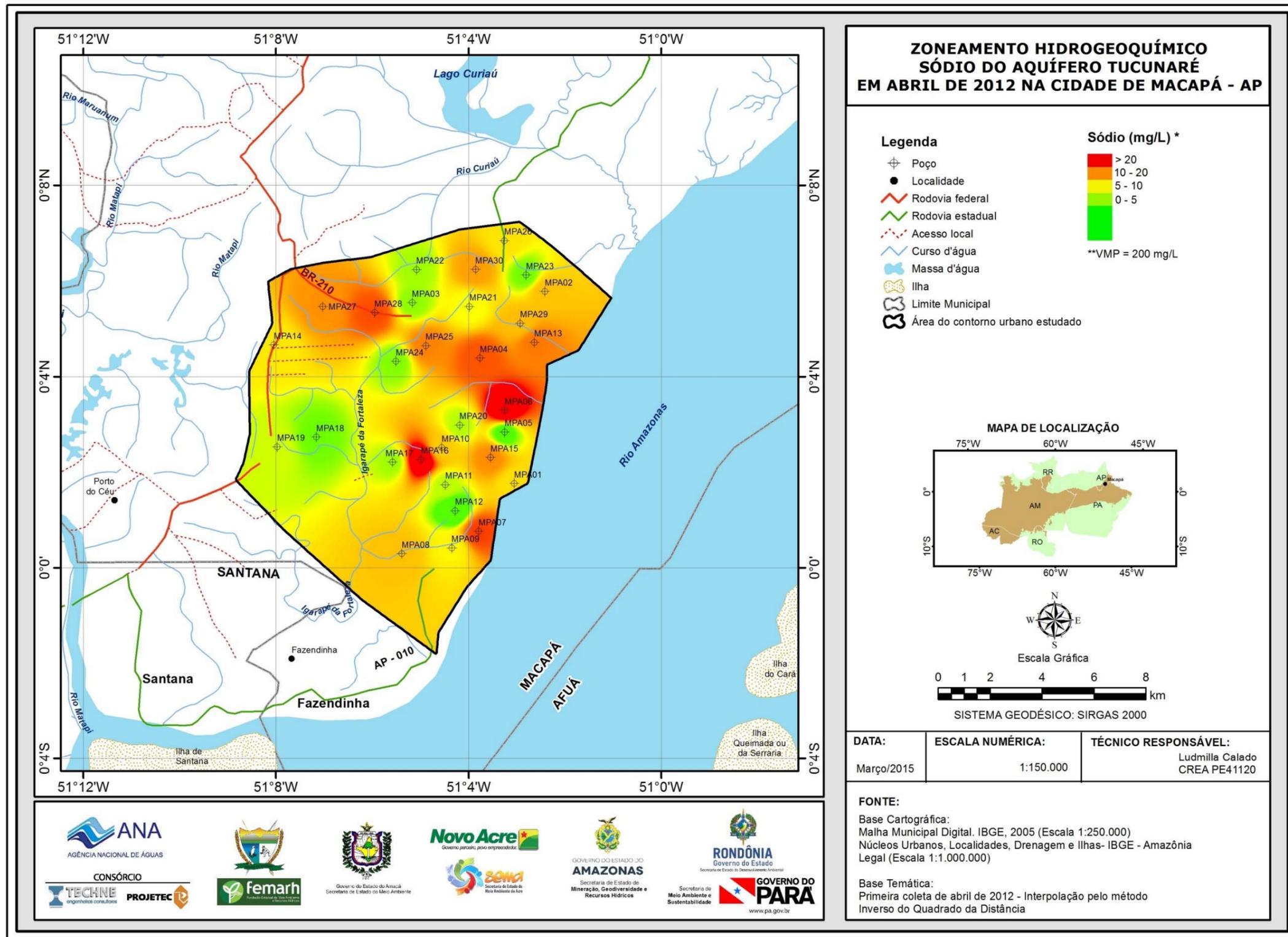


Figura 5.23a – Zoneamento de Sódio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

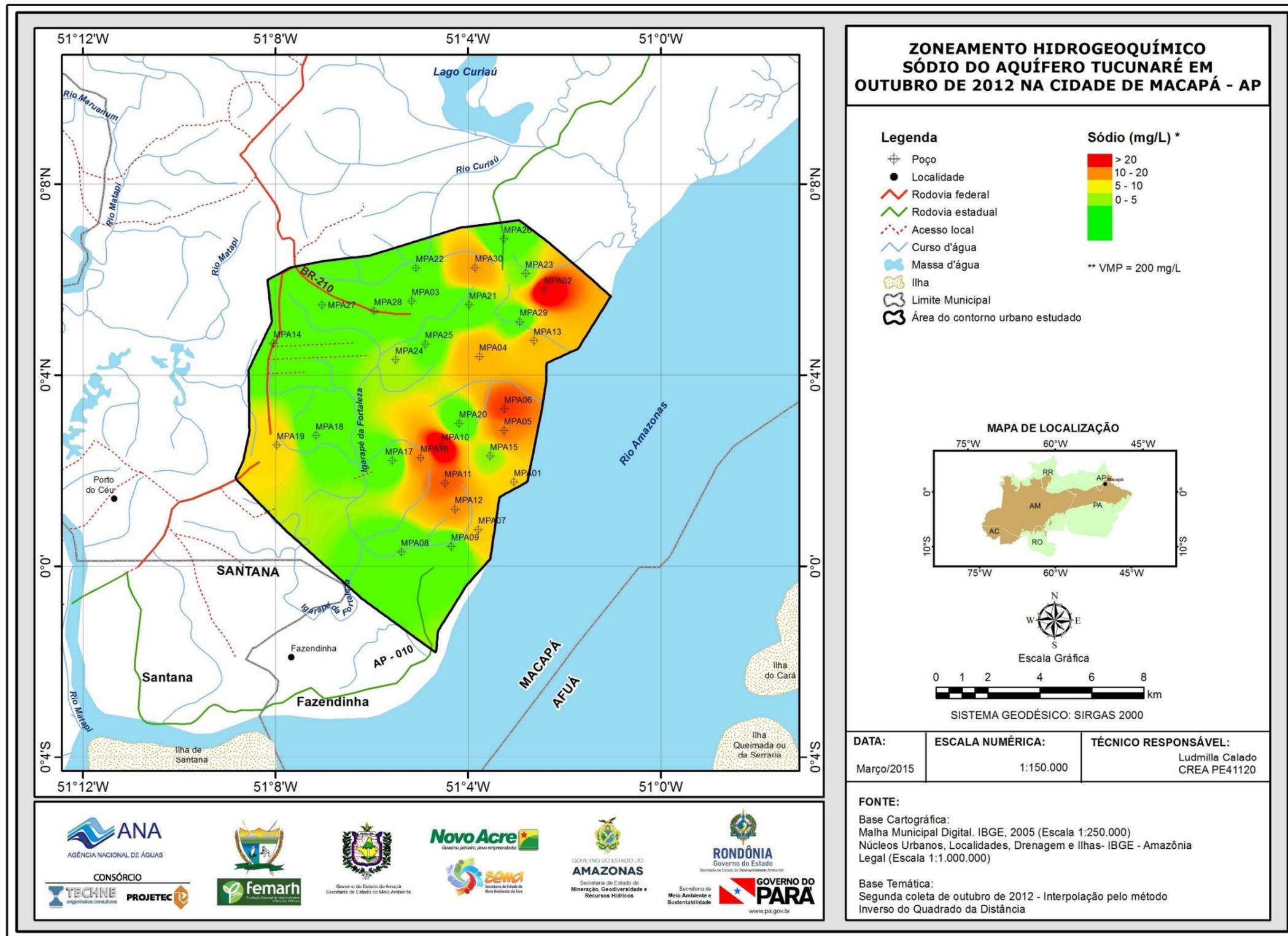


Figura 5.23b – Zoneamento de Sódio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.8.2 - Potássio

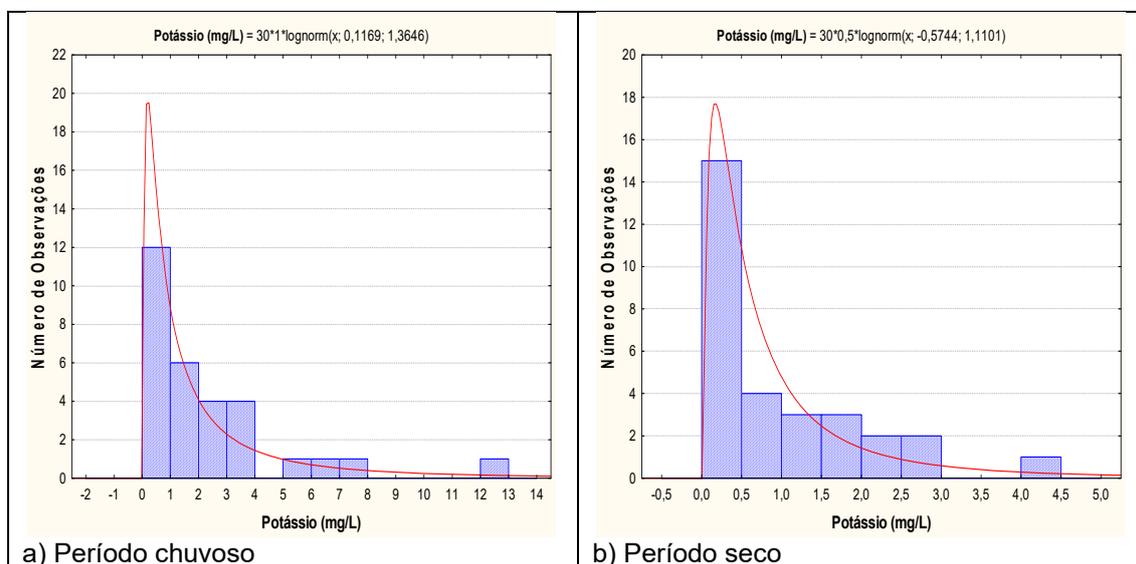
A **tabela 5.31** mostra a estatística descritiva dos teores de potássio no aquífero Tucunaré em Macapá. No período chuvoso as concentrações de potássio medidas nos 30 poços oscilaram entre 0,02 e 12,5 mg/L com média de 2,3 mg/L e mediana de 1,3 mg/L. No período de estiagem, a variação foi de 0,1 a 4,1 mg/L, com média de 1,0 mg/L e mediana de 0,5 mg/L.

**Tabela 5.31** – Estatística descritiva do Potássio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (K-1) - abril de 2012 e no período seco (K-2) - outubro de 2012.

K	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
K-1	30	2,3	1,3	3,3	1,3	0,02	12,5	2,8	0,5	2,2
K-2	30	1,0	0,6	1,4	0,5	0,12	4,1	1,0	0,2	1,4

Segundo Pereira *et al.* (2008) o potássio nas águas subterrâneas, ocorre em pequena quantidade, normalmente valores de até 10 mg/L, pois é facilmente absorvido pelo solo através dos compostos do húmus, por intermédio de argilas ou de zeólitos naturais. Na área de estudo, os valores mínimo e máximo de potássio encontrados em ambas as campanhas foi de 0,02 e 12,5 mg/L, respectivamente.

A modelagem dos histogramas de frequência da **figura 5.24** por funções de distribuição de probabilidade permitiu avaliar com risco calculado os valores estimados das concentrações de potássio para o período chuvoso e para o período de estiagem.



**Figura 5.24** – Histogramas de frequência e curvas lognormal de distribuição de probabilidade do Potássio do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

Os valores apresentados na **tabela 5.32** mostram que os teores de potássio são um pouco maiores no período chuvoso, indicando que existe influência da sazonalidade no tocante às concentrações de potássio na cidade de Macapá.

De acordo com Celligoi (1999), o potássio tem pouca mobilidade geoquímica nas águas doces e é raramente encontrado em concentrações iguais ou maiores que o sódio. Essa afirmação é plausível na área de estudo, haja vista que as águas do aquífero Tucunaré são predominantemente doces, onde os teores de STD em ambas as campanhas são inferiores a 1.000 mg/L, assim como, todos os teores de potássio estão abaixo dos valores de sódio encontrados.

Os baixos teores de potássio também podem ser justificados pela alta pluviosidade na região amazônica, a qual favorece a constante renovação das águas, e conseqüentemente a diluição dos elementos ali presentes.

**Tabela 5.32** – Distribuição de probabilidade do Potássio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (K-1) - abril de 2012 e no período seco (K-2) - outubro de 2012.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
K-1	1,124	0,356	0,196	0,119	0,068	0,047
K-2	0,563	0,223	0,137	0,092	0,059	0,043
Razão	2,0	1,6	1,4	1,3	1,15	1,09

### **Zoneamento do Potássio**

Mediante análise da distribuição espacial das concentrações de potássio nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá, no período chuvoso de abril de 2012, verificou-se um predomínio em duas faixas de valores, de 0,5 a 2 e de 2 a 4 mg/L (**figura 5.25a**). No período seco, de outubro de 2012 (**figura 5.25b**), os teores de potássio ficaram quase todos restritos a faixa de 0 a 0,5 e de 0,5 a 2 mg/L. Em ambas as campanhas as concentrações de potássio acima de 4 mg/L se encontram dispersas em manchas pontuais.

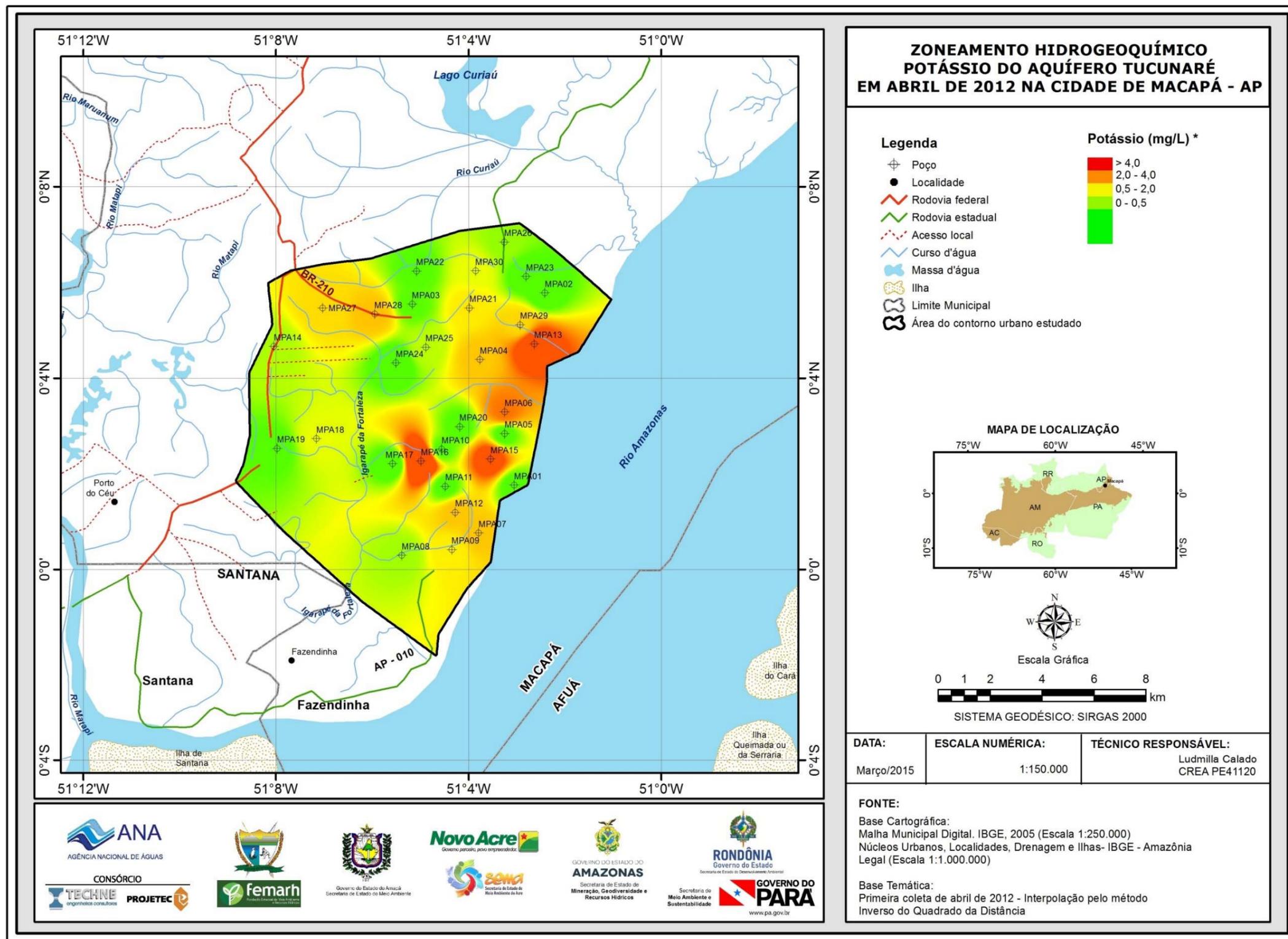


Figura 5.25a – Zoneamento de Potássio (mg/L) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

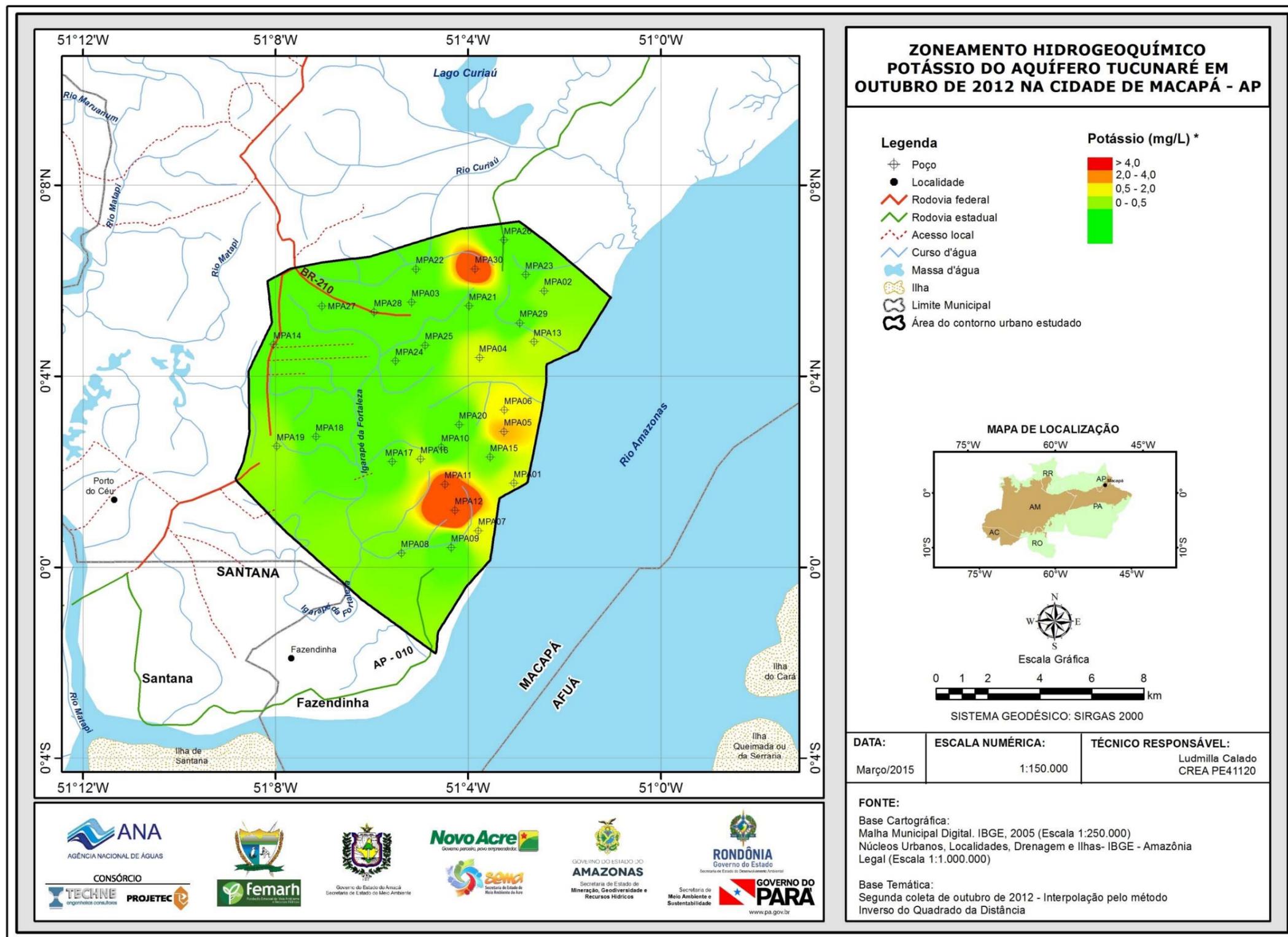


Figura 5.25b – Zoneamento de Potássio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.8.3 - Cálcio

Em águas subterrâneas em contato com rochas carbonatadas, os íons de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) são provenientes da dissolução da calcita, dolomita e gipsita. Eles são desde moderadamente solúveis a muito solúveis e são muito fáceis de precipitar como carbonato de cálcio.

Em águas doces, as concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  variam de 10 a 250 mg/L; elevadas concentrações de cálcio podem provocar formação de pedras nos rins, a hipercalcemia. No uso industrial, em sistemas de refrigeração, elevadas concentrações produzem entupimento através da produção de incrustações, o cálcio contribui para o aumento da dureza na água.

De modo geral, os teores de cálcio na área de estudo são baixos, o que é justificável, pois o clima chuvoso da região Amazônica, onde os índices pluviométricos anuais são superiores a 2.500 mm, favorece a constante renovação das águas superficiais e subterrâneas. A abundância de água, associada com a exuberante cobertura vegetal e as altas temperaturas, são os principais condicionantes do intemperismo químico que ao longo do tempo geológico quebrou a estrutura química dos minerais componentes das rochas e dos sedimentares deixando os terrenos lixiviados e lateritizados.

Mediante análise dos resultados físico-químicos é possível verificar que os teores de cálcio no período chuvoso são ligeiramente superiores aos do período seco. A justificativa provável é de que a ocorrência do fenômeno ressaca favorece a intrusão de águas marinhas, através das "áreas de ressaca" na região (**item 2.6**).

A **tabela 5.33** mostra a estatística descritiva dos teores de cálcio medidos no aquífero Tucunaré em Macapá. No período chuvoso os valores medidos estão compreendidos entre 0,03 e 10,6 mg/L, com média de 1,6 mg/L e mediana de 0,9 mg/L. Na estiagem, as concentrações de cálcio variam de 0,1 a 4,9 mg/L, sendo a média igual a 1,0 mg/L e a mediana de 0,7 mg/L. Todavia, o modelo geoestatístico proposto sugere (**tabela 5.34**) que nessa estatística descritiva existe uma inconsistência dos dados para cálcio, que no período chuvoso apresentam 5/30 valores (17%) inferiores ao valor mínimo medido no período seco, o que não é de esperar em face da sazonalidade. Em virtude desses valores o modelo conduz a um resultado oposto ao esperado.

**Tabela 5.33** – Estatística descritiva do Cálcio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Ca-1) - abril de 2012 e no período seco (Ca-2) - outubro de 2012 (valores inconsistentes para o período chuvoso).

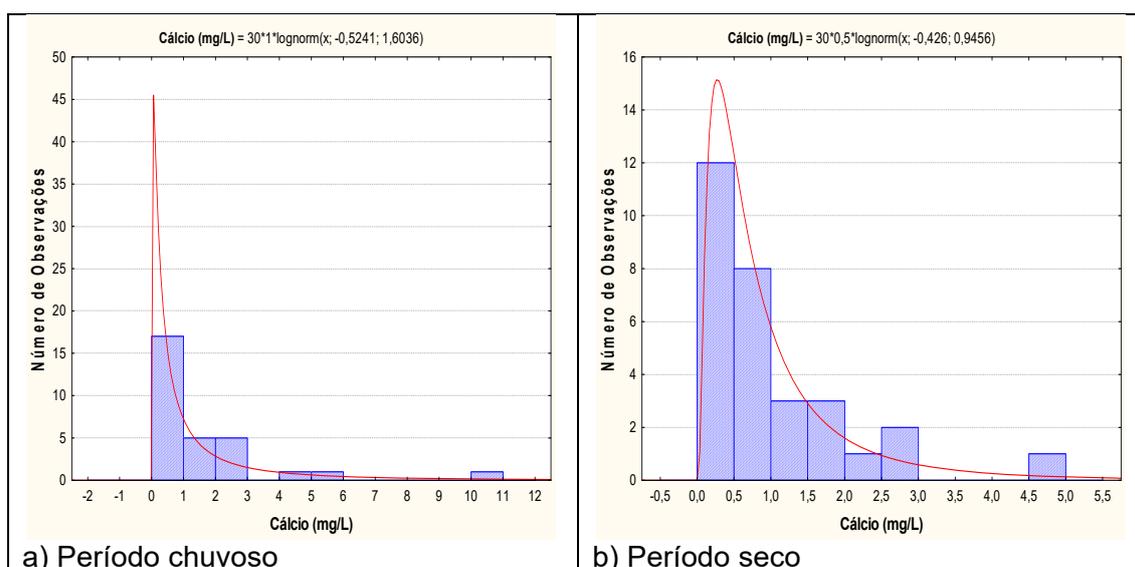
Ca	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
Ca-1	30	1,6	0,7	2,4	0,9	0,03	10,6	2,2	0,4	2,8
Ca-2	30	1,0	0,6	1,4	0,7	0,1	4,9	1,0	0,2	2,2

Tanto isso é plausível que a inversão desses 5 (cinco) valores do período chuvoso para o período de estiagem, resulta na estatística descrita na **tabela 5.33b**.

**Tabela 5.33b** – Estatística descritiva do Cálcio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Ca-1) - abril de 2012 e no período seco (Ca-2) - outubro de 2012 (valores consistentes para o período chuvoso).

Ca	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
Ca-1	30	1,7	0,9	2,5	1,1	0,10	10,6	2,1	0,4	2,9
Ca-2	30	0,8	0,4	1,2	0,4	0,03	4,9	1,1	0,2	2,4

Os histogramas de frequência modelados pela lei lognormal de distribuição de probabilidade (**figura 5.26**) com os dados inconsistentes, permitiram estimar com nível de risco calculado, os teores de cálcio para o período chuvoso e para o período de estiagem.



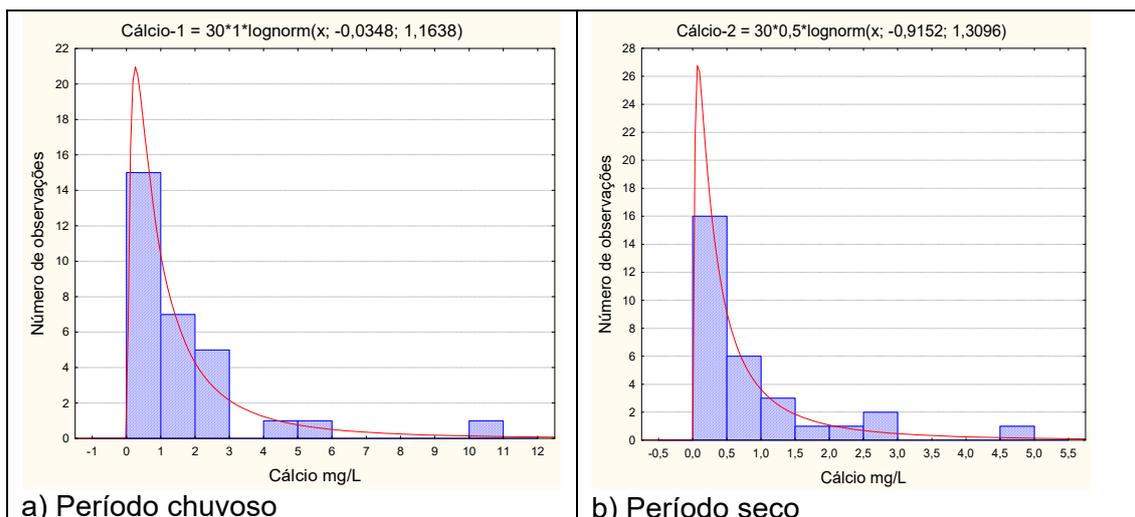
**Figura 5.26** – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade do Cálcio do Aquífero Tucunaré em Macapá no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012 (histogramas com dados inconsistentes).

Como mostra a **tabela 5.34**, com os dados inconsistentes o efeito da sazonalidade para o cálcio seria o inverso do esperado, ou seja, haveria mais cálcio no período seco.

**Tabela 5.34** – Distribuição de probabilidade do Cálcio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Ca-1) - abril de 2012 e no período seco (Ca-2) - outubro de 2012, com dados inconsistentes.

P(x≥a)	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Ca-1	0,592	0,154	0,076	0,042	0,022	0,014
Ca-2	0,653	0,295	0,194	0,138	0,094	0,072
Razão	0,9	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2

Já com os histogramas de frequência (**figura 5.26b**) modelados pela lei lognormal de distribuição de probabilidade com os dados consistentes, foi possível obter com nível de risco calculado, os teores de cálcio para o período chuvoso e para o período de estiagem (**tabela 5.34b**).



**Figura 5.26b** – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade do Cálcio do Aquífero Tucunará em Macapá no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012 (histogramas com dados consistentes).

Como mostra a **tabela 5.34b**, com os dados consistentes o efeito da sazonalidade para o cálcio é o esperado, ou seja, ocorrência de mais cálcio no período chuvoso.

**Tabela 5.34b** – Distribuição de probabilidade do Cálcio do Aquífero Tucunará no período chuvoso (Ca-1) - abril de 2012 e no período seco (Ca-2) - outubro de 2012, com dados consistentes.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Ca-1	0,965	0,362	0,217	0,142	0,088	0,064
Ca-2	0,400	0,133	0,074	0,046	0,027	0,019
Razão	2,4	2,7	2,9	3,1	3,3	3,4

### **Zoneamento do Cálcio**

A distribuição espacial das concentrações de cálcio nas águas subterrâneas do aquífero Tucunará, no período chuvoso (**figura 5.27a**) e no período de estiagem (**figura 5.27b**), revela um predomínio de teores de cálcio abaixo de 1,5 mg/L, seguido da faixa de 1,5 a 3,0 mg/L. Os teores de cálcio acima desses valores são pontuais distribuídos ao longo da área de estudo.

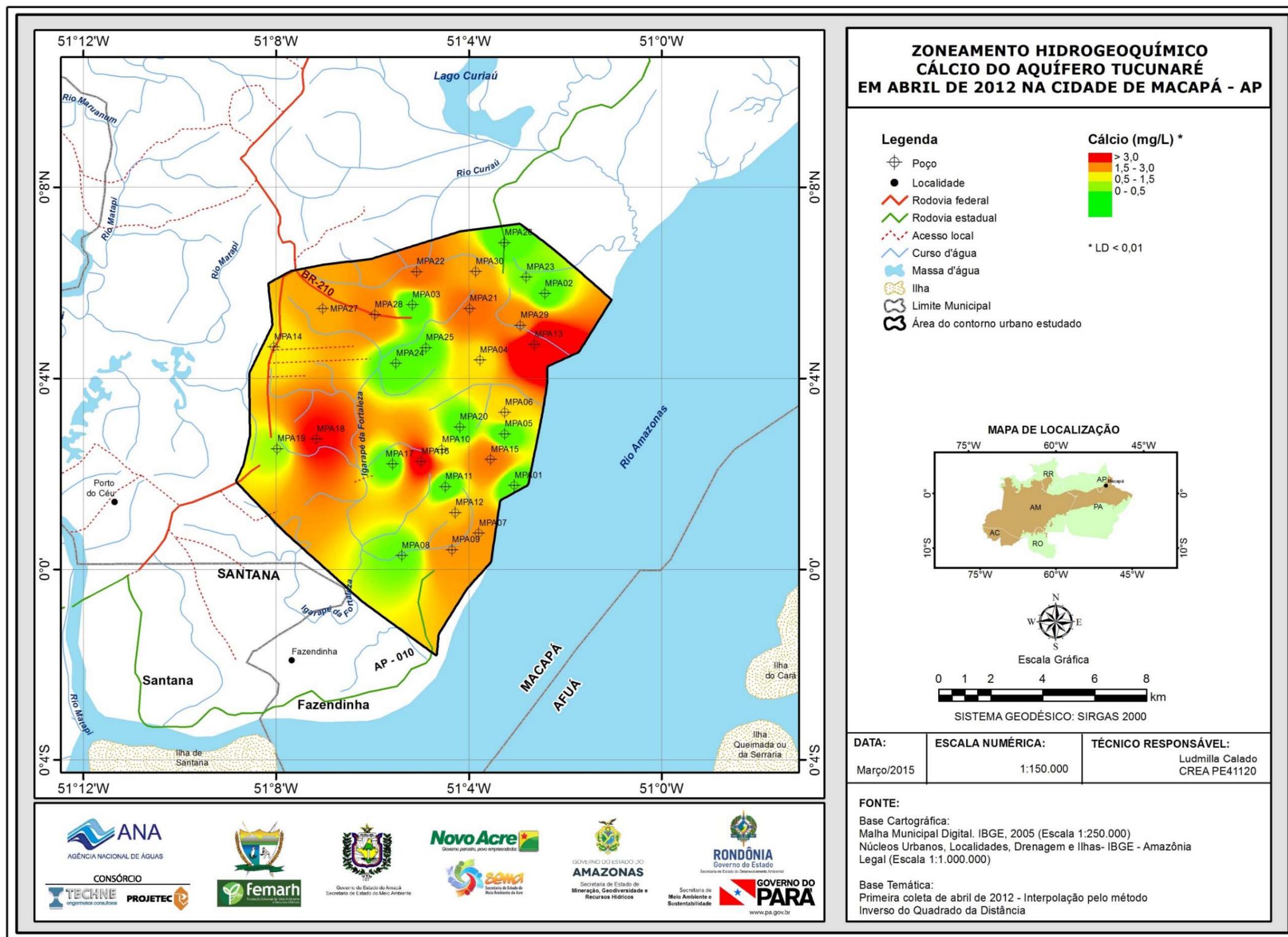


Figura 5.27a – Zoneamento de Cálcio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

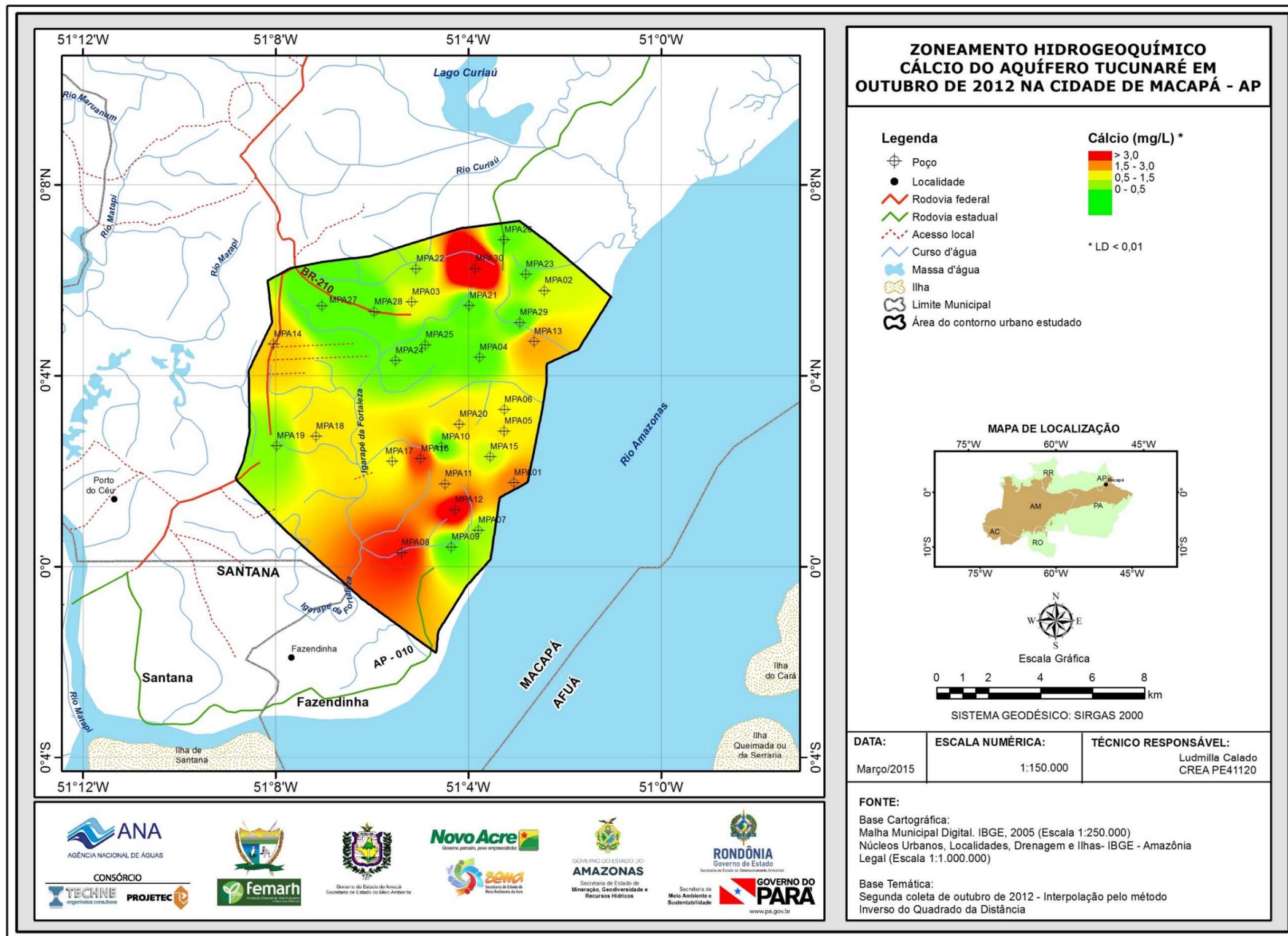


Figura 5.27b – Zoneamento de Cálcio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

#### 5.2.8.4 - Magnésio

Devido à sua solubilidade, o magnésio é geralmente encontrado em águas naturais, mas em concentrações menores do que a do cálcio, de 1 a 40 mg/L; o íon magnésio ( $Mg^{2+}$ ) tem propriedades similares às do íon cálcio, porém ele é mais solúvel e difícil de precipitar. Águas armazenadas em rochas ricas em magnésio têm concentrações que podem atingir 100 mg/L; concentrações maiores que 100 mg/L são raramente encontradas, exceto em águas do mar e salmouras.

O excesso de magnésio reduz a frequência cardíaca em pessoas com problemas do coração; no entanto, em dosagens adequadas, trata a tensão pré-menstrual e a hipertensão, previne cálculos renais e biliares e ajuda os músculos a trabalhar; o magnésio também contribui para a dureza da água.

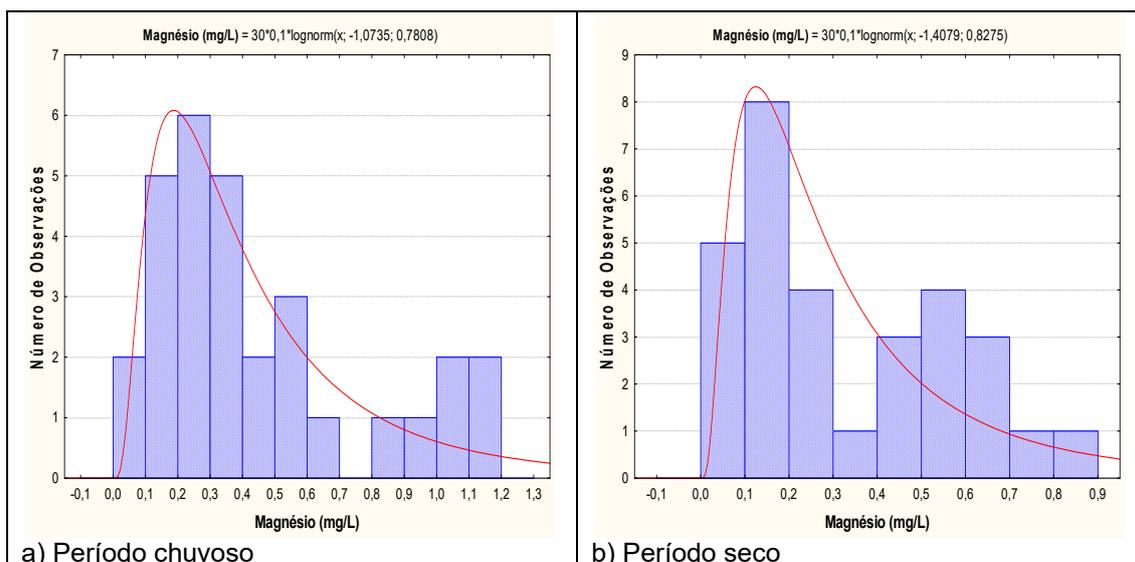
A estatística descritiva na **tabela 5.35** mostra que os teores de magnésio coletados nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá, variam de 0,07 a 1,15 mg/L no período chuvoso, com média de 0,5 mg/L e mediana de 0,3 mg/L. No período de estiagem o valor mínimo foi de 0,06 mg/L e o máximo de 0,8 mg/L, com média de 0,3 mg/L e mediana igual a 0,2 mg/L.

**Tabela 5.35** – Estatística descritiva do Magnésio do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Mg-1) - abril de 2012 e no período seco (Mg-2) - outubro de 2012.

Mg	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
Mg-1	30	0,5	0,3	0,6	0,3	0,07	1,15	0,3	0,1	1,0
Mg-2	30	0,3	0,2	0,4	0,2	0,06	0,8	0,2	0,0	0,6

Em suma, os teores de magnésio encontrados nas águas do aquífero Tucunaré em Macapá são muito baixos. Segundo Celligoi (1999), o magnésio possui grande solubilidade, porém é encontrado em menores quantidades nas águas doces, mais provavelmente pela sua baixa abundância geoquímica (17.600 mg/Kg nas rochas ígneas), o que é plausível na área de estudo, haja vista que as águas são predominantemente doces.

Os histogramas de frequência dos valores amostrados no período chuvoso (abril de 2012) e período de estiagem (outubro de 2012) são apresentados na **figura 5.28**. Modelados por uma lei lognormal de distribuição lognormal de probabilidade, esses histogramas permitem avaliar com risco calculado, os teores de magnésio nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, de acordo com a sazonalidade.



**Figura 5.28** – Histogramas de frequência e curvas ajustadas de distribuição lognormal de probabilidade de ocorrência de Magnésio no Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

Os valores apresentados na **tabela 5.36** mostram que os teores de magnésio (mg/L) no período chuvoso são ligeiramente maiores quando comparados ao período seco, e a razão entre os dois períodos é superior a 1 (um), o que configura alguma influência da sazonalidade. Esse comportamento sugere uma influência marinha, através de recarga fluvial sobre as águas subterrâneas, no caso de Macapá, por se tratar de uma região litorânea, afetada pelo fenômeno da ressaca no período chuvoso de janeiro a maio.

**Tabela 5.36** – Distribuição de probabilidade dos teores de Magnésio (mg/L) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Mg-1) - abril de 2012 e no período seco (Mg-2) - outubro de 2012.

P(x≥a)	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Mg-1	0,342	0,177	0,126	0,095	0,069	0,056
Mg-2	0,245	0,122	0,085	0,063	0,045	0,036
Razão	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6

### **Zoneamento do Magnésio**

A distribuição espacial das concentrações de magnésio nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, no período chuvoso (**figura 5.29a**) e no período de estiagem (**figura 5.29b**) apresentam o mesmo comportamento, com teores predominantes em duas faixas de classes, de 0 a 0,5 mg/L e de 0,5 a 1,0 mg/L. Na primeira campanha, os maiores teores, superiores a 1 mg/L, ficam restritos a pontos isolados.

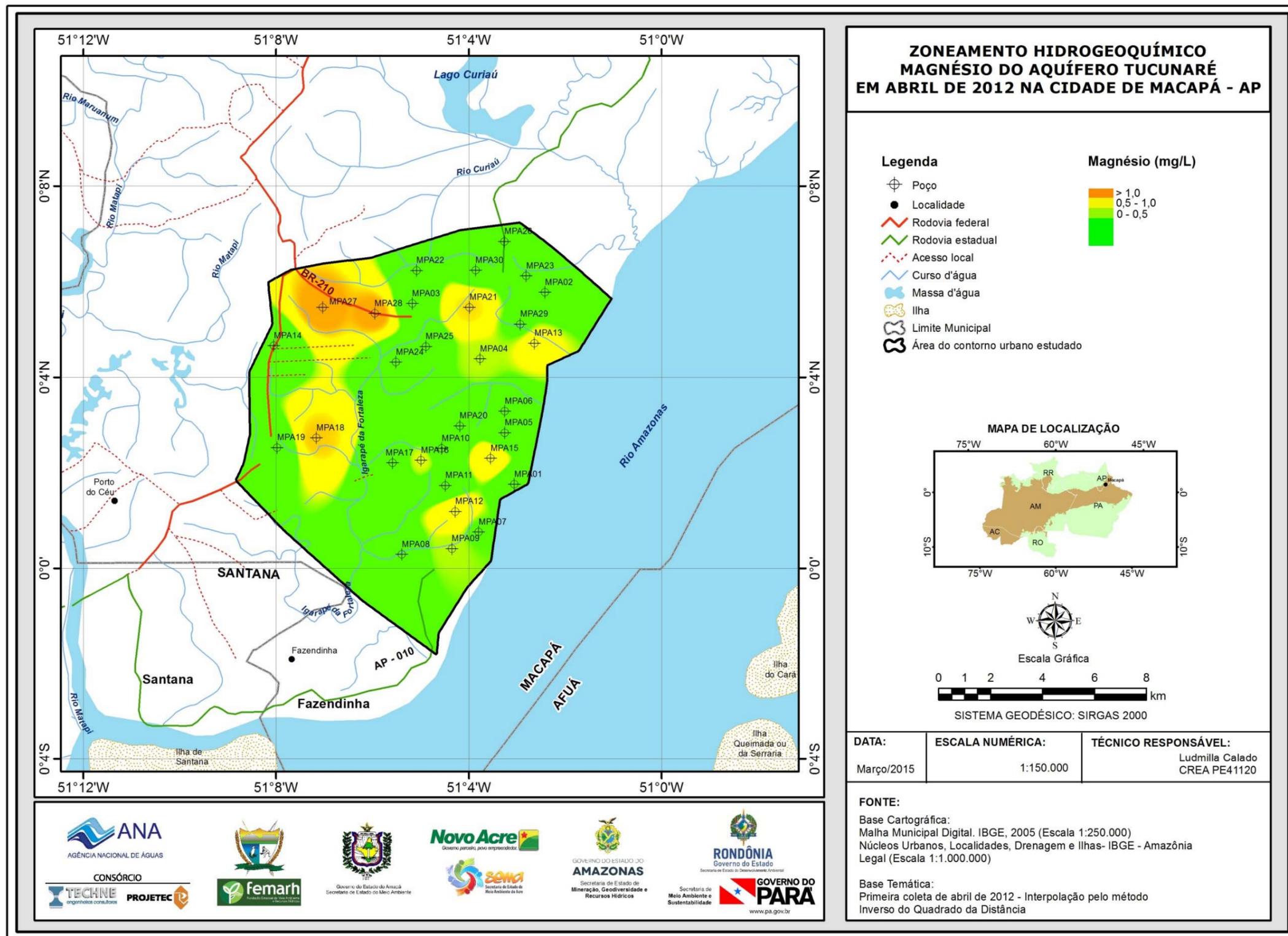


Figura 5.29a – Zoneamento de Magnésio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

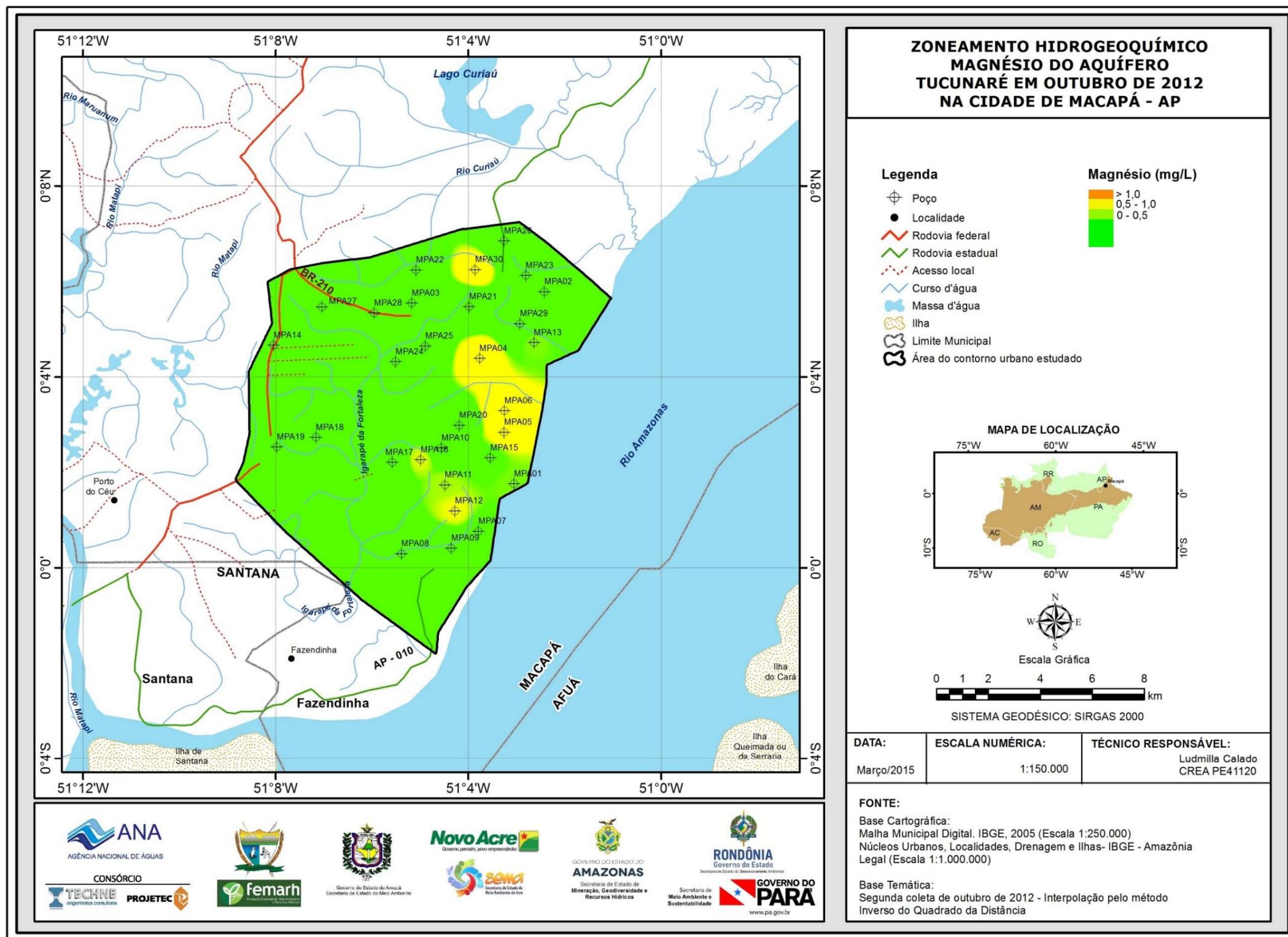


Figura 5.29b – Zoneamento de Magnésio (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

## 5.2.9 - Ânions

### 5.2.9.1 - Cloreto

Os cloretos ( $\text{Cl}^-$ ) são muito solúveis, são estáveis em solução e de difícil precipitação; não sofrem oxidação nem redução em águas naturais e estão, em geral, associados aos íons de sódio, na proporção molar 1:1, principalmente em águas salinas.

De acordo com CETESB (2009), o cloreto é o ânion  $\text{Cl}^-$  que se apresenta nas águas subterrâneas, oriundo da percolação da água através de solos e rochas. A sua concentração em águas de abastecimento público constitui um padrão de aceitação, já que provoca sabor “salgado” na água em altas concentrações. Por tal motivo, a Portaria MS 2914/11 estabelece como valor máximo permitido (VMP) de padrão organoléptico de potabilidade para consumo humano, o valor de 250 mg/L. Para Celligoi (1999), a presença de cloreto em águas subterrâneas pode ser atribuída à dissolução de depósitos salinos, descargas de efluentes de indústrias químicas, intrusões salinas, etc. Os íons cloreto são altamente móveis e não são retidos em rochas permeáveis. Em argilitos, cristais de NaCl ou soluções de NaCl podem ser contidos em poros. Os íons cloreto são presentes em baixas concentrações (<10 mg/L). Altas concentrações podem indicar poluição antrópica.

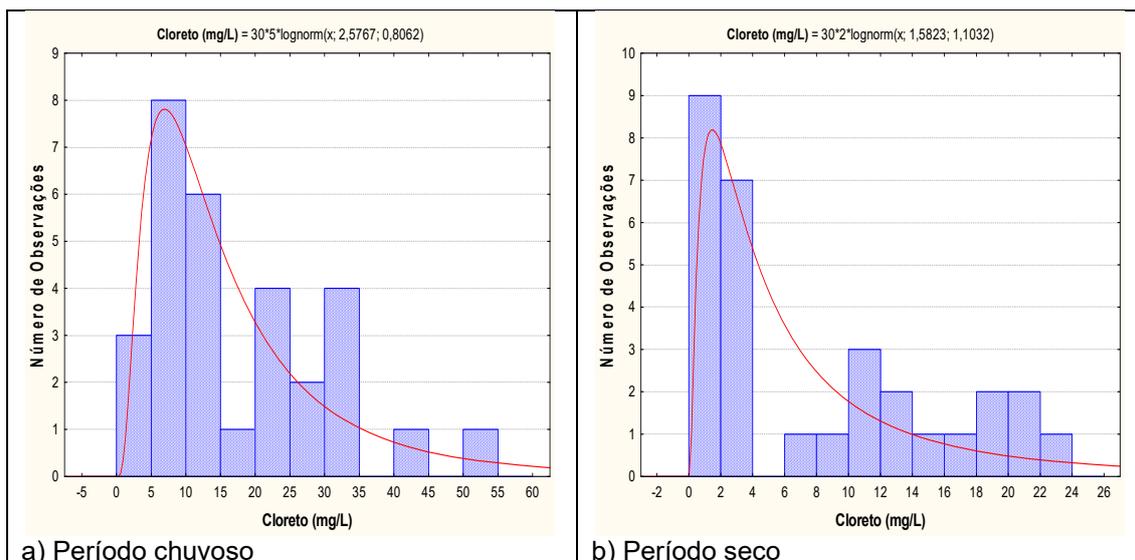
A **tabela 5.37** mostra a estatística descritiva dos teores de cloreto nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá. No período chuvoso (abril de 2012) os valores de cloreto variaram de 2,1 a 51,6 mg/L, com média de 17,4 mg/L e mediana igual a 12,4 mg/L. No período de estiagem (outubro de 2012), a variação entre o mínimo e o máximo foi de 0,8 a 23,4 mg/L, com média de 8,2 mg/L e mediana de 3,8 mg/L. Todos os poços amostrados em ambas as campanhas apresentaram resultados de cloreto inferiores ao VMP estabelecido pelo Portaria MS 2914/11.

**Tabela 5.37** – Estatística descritiva do Cloreto do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Cl-1) - abril de 2012 e no período seco (Cl-2) - outubro de 2012.

Cl	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
Cl-1	30	17,4	12,7	22,2	12,4	2,1	51,6	12,7	2,3	1,0
Cl-2	30	8,2	5,4	11,0	3,8	0,8	23,4	7,5	1,4	0,7

Em ambas as coletas, todas as amostras apresentaram teores de cloreto inferiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008, de 250 mg/L para consumo humano; 100 a 700 mg/L para irrigação; e de 400 mg/L para recreação, indicando que as águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá pode ser empregada para tais usos.

Na **figura 5.30** se encontram os histogramas de frequência dos teores de cloreto amostrados nas duas campanhas e as respectivas curvas fornecidas pelo modelo de distribuição de probabilidade lognormal aplicado para estimativa, com risco calculado, dos teores de cloreto no aquífero Tucunaré, em Macapá, no período chuvoso e de estiagem.



**Figura 5.30** – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade do Cloreto do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

Na **tabela 5.38** encontram-se os teores de cloreto com probabilidade de ocorrência no período chuvoso e no período seco no aquífero Tucunaré em Macapá. Nota-se que os valores no período chuvoso são superiores aos do período seco e que a razão entre as duas campanhas é superior a 1 (um), indicando alguma influência da sazonalidade. Isto provavelmente se deve a ocorrência do fenômeno ressaca, onde ocorre uma intrusão de águas fluviais com uma maior presença de cloreto, o qual forma compostos muito estáveis e possui uma tendência de se enriquecer, junto com o sódio, a partir das zonas de recarga das águas subterrâneas.

Além disso, é importante destacar que teores de cloreto mais elevados, sugerem influência antrópica, pois segundo Hindi (2001), a presença de nitrato, cloreto e sódio podem ser indicativos de contaminação nas águas subterrâneas por efluentes domésticos. E como a área de estudo é muito plana e periodicamente afetada por inundações, pode ocorrer o transbordamento de fossas sépticas, cujos dejetos se misturam às águas superficiais, de modo que pode haver infiltração de água contaminada, no período chuvoso.

**Tabela 5.38** – Distribuição de probabilidade do Cloreto do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (CI-1) - abril de 2012 e no período seco (CI-2) - outubro de 2012.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
CI-1	13,154	6,674	4,681	3,493	2,512	2,016
CI-2	4,866	1,923	1,184	0,793	0,505	0,374
Razão	2,7	3,5	4,0	4,4	5,0	5,4

### **Zoneamento do Cloreto**

No período chuvoso (abril de 2012), o zoneamento de cloreto no aquífero Tucunaré em Macapá, apresentado na **figura 5.31a** mostra que cerca de 40 a 50% da área de estudo apresenta teores na faixa de 0 a 10 mg/L, enquanto que na porção restante da área as concentrações variam de 20 a mais de 30mg/L.

No período de estiagem (outubro de 2012), **figura 5.31b** ocorre um predomínio de águas na faixa de 0 a 10 mg/L, em cerca de 60 a 70% a área de estudo, na porção oeste. Secundariamente, no setor leste, ocorrem valores na faixa de 20 a 30 mg/L, em cerca de 30 a 40% da área. Valores acima de 30 mg/L não se observam nesse período.

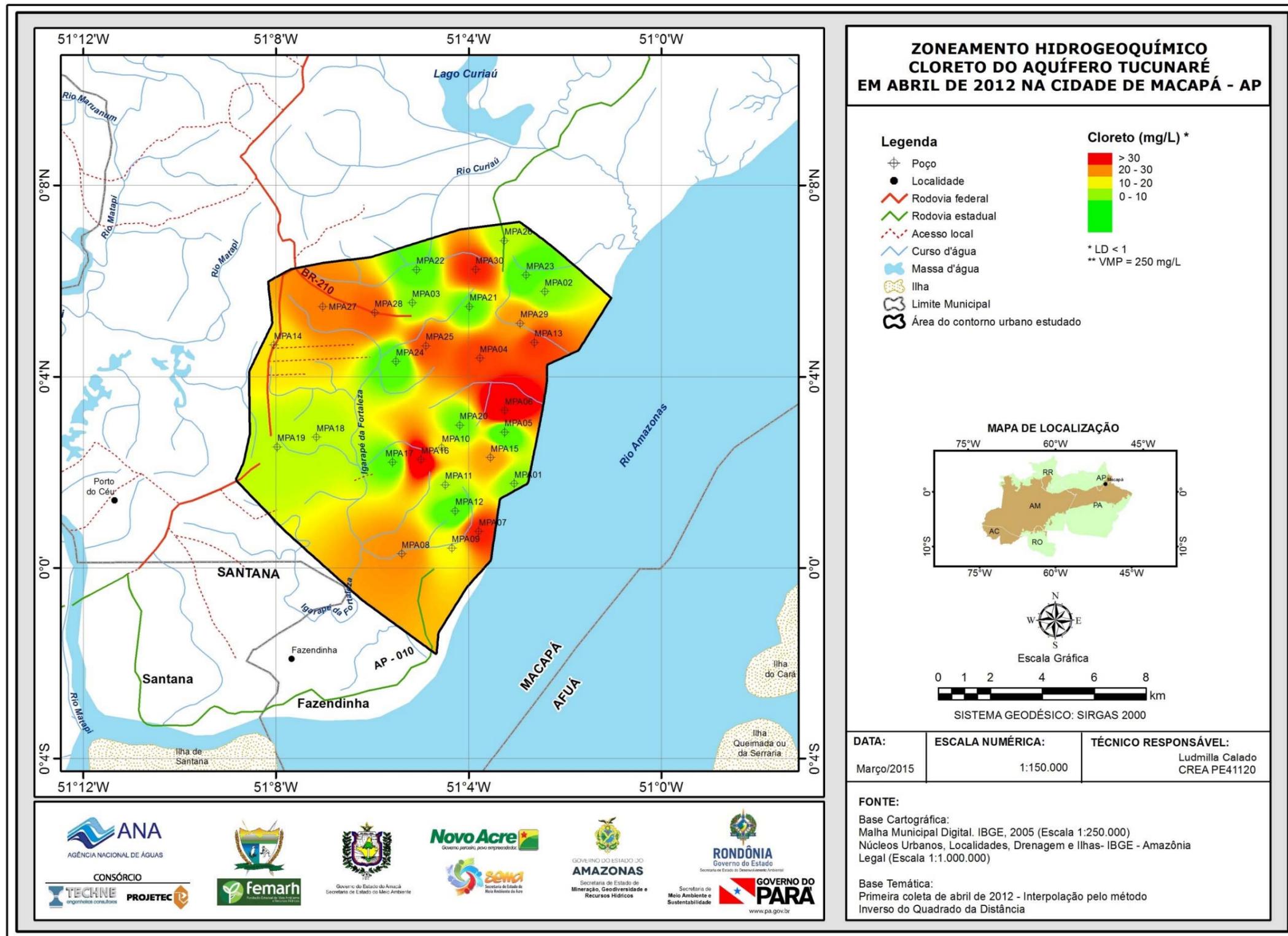


Figura 5.31a – Zoneamento de Cloreto (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

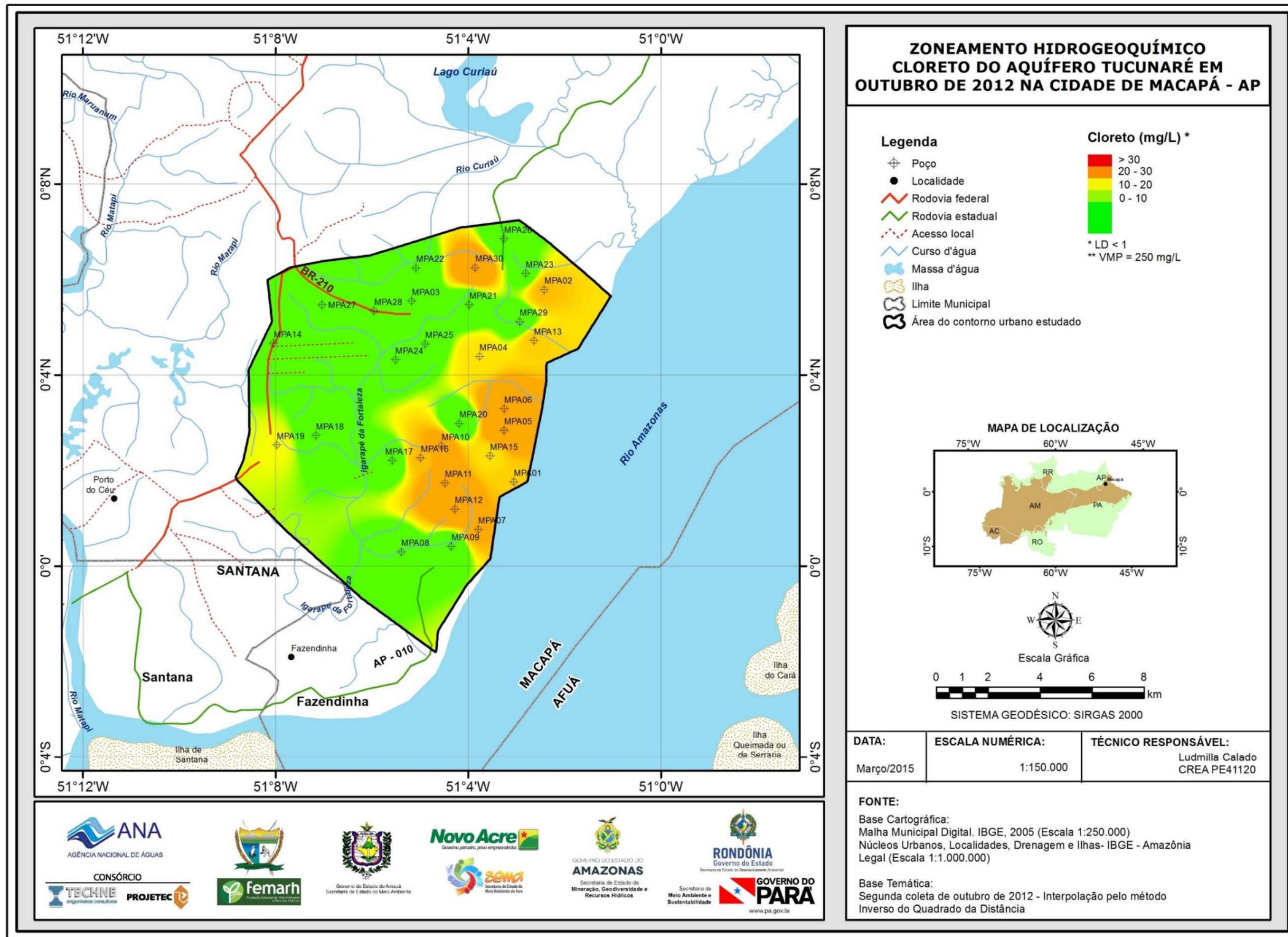


Figura 5.31b – Zoneamento de Cloreto (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.9.2 - Sulfato

O enxofre pode se apresentar de diversas formas, tais como sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), sulfito ( $\text{SO}_3^{2-}$ ), sulfeto ( $\text{S}^{2-}$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4^{2-}$ ), enxofre molecular ( $\text{S}^0$ ) e associado a metais, como sulfeto de ferro ( $\text{FeS}$ ). Dentre essas várias formas, o sulfato e o sulfeto de hidrogênio são as mais frequentes. O sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) é um dos íons mais abundantes na natureza. Em águas naturais, a fonte de sulfato ocorre através da dissolução de solos e rochas e pela oxidação de sulfeto (Parron *et al.*, 2011; CETESB, 2009).

Segundo Celligoi (1999), o enxofre ocorre principalmente em gases magmáticos. A maior parte do elemento nas rochas ocorre em minerais como o gipso ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) e anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). Consideráveis quantidades de sulfato são adicionadas ao ciclo hidrológico com as precipitações da atmosfera. Vêm do "spray" do mar, da poeira dos continentes e da oxidação de gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), bem como das substâncias orgânicas do solo. Nas águas subterrâneas circulantes em rochas ígneas, a concentração de sulfato é baixa ( $< 30 \text{ mg/L}$ ).

Em águas para consumo humano, a Portaria do Ministério da Saúde 2914/2011 recomenda que as concentrações de sulfato não excedam  $250 \text{ mg/L}$ , pois acima deste valor, a sua ingestão provoca efeito laxativo.

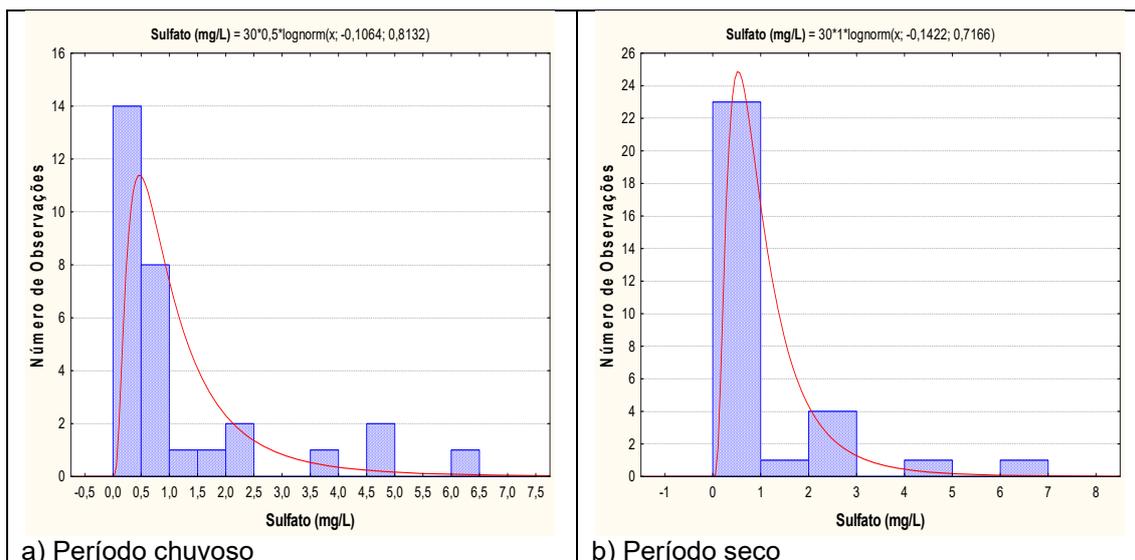
A estatística descritiva apresentada na **tabela 5.39** indica que os teores de sulfato nas águas subterrâneas, do aquífero Tucunaré, no período chuvoso variam de  $0,49$  a  $6,4 \text{ mg/L}$  apresentando média de  $1,4 \text{ mg/L}$  e mediana de  $0,5 \text{ mg/L}$ . No período seco, os teores variaram de  $0,49$  a  $6,8 \text{ mg/L}$ , com média de  $1,2 \text{ mg/L}$  e mediana igual a  $0,7 \text{ mg/L}$ . Na primeira campanha, 47% ( $14/30$ ) dos poços apresentaram teores de sulfato abaixo do limite de detecção de  $0,5 \text{ mg/L}$ , enquanto que na segunda campanha foram 40% ( $12/30$ ).

**Tabela 5.39** – Estatística descritiva do Sulfato do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (S-1) - abril de 2012 e no período seco (S-2) - outubro de 2012.

Sulfato	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
S-1	30	1,4	0,8	1,9	0,5	0,49	6,4	1,6	0,3	2,2
S-2	30	1,2	0,7	1,7	0,7	0,49	6,8	1,4	0,3	2,9

Em ambas as coletas, todas as amostras apresentaram teores de sulfato inferiores aos limites estabelecidos pela Portaria MS 2914/2011, assim como, dentro dos padrões definidos pela Resolução CONAMA 396/2008, para consumo humano ( $250.000 \mu\text{g.L}^{-1}$ ), dessedentação animal ( $1.000.000 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) e recreação ( $400.000 \mu\text{g.L}^{-1}$ ).

Os histogramas da **figura 5.32**, representativos dos pontos amostrados nas campanhas de abril e outubro de 2012, foram modelados por uma função de distribuição de probabilidade lognormal. Essa função permitiu estimar com risco calculado que não há influência de sazonalidade no que diz respeito aos teores de sulfato, haja vista que não houve diferença significativa para a razão entre os dois períodos de coleta, conforme pode ser observado na **tabela 5.40**.



**Figura 5.32** – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade do Sulfato Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

A presença de sulfatos nas águas do aquífero Tucunaré, em ambas as campanhas, se deve provavelmente ao contato dos poços com as fossas sanitárias, as quais em muitos casos são cavadas muito próximas, o que favorece a infiltração do esgoto *in natura* e conseqüentemente a contaminação das águas subterrâneas. Fazzio *et al.* (2009) descrevem que o crescente aumento da população urbana tem ocasionado um somatório de contaminantes lançados nas águas subterrâneas, oriundos das mais diversas fontes, relacionadas com o espaço urbano, tais como, fossas sépticas, cemitérios, vazamentos em postos de combustível, lixões, agrotóxicos, poços profundos mal instalados ou abandonados, lançamento de resíduos domésticos e industriais, dentre outros.

**Tabela 5.40** – Distribuição de probabilidade do Sulfato do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (S-1) - abril de 2012 e no período seco (S-2) - outubro de 2012.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
S-1	0,899	0,453	0,317	0,236	0,169	0,136
S-2	0,867	0,475	0,346	0,267	0,199	0,164
Razão	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8

### Zoneamento do Sulfato

A distribuição espacial dos teores de sulfato no aquífero Tucunaré em Macapá, no período chuvoso (**figura 5.33a**) e no período seco (**figura 5.33b**), revela a existência de duas classes predominantes: de 0 a 0,5 mg/L, com valores abaixo do limite de detecção, ou seja, <0,5 mg/L, o que representa, respectivamente, 47% (14/30) e 40% (12/30) dos valores da primeira e segunda campanha; e de 0,5 a 1 mg/L, o que corresponde, por sua vez, a 27% (8/30) e 37% (11/30) das amostras na primeira e segunda coleta.

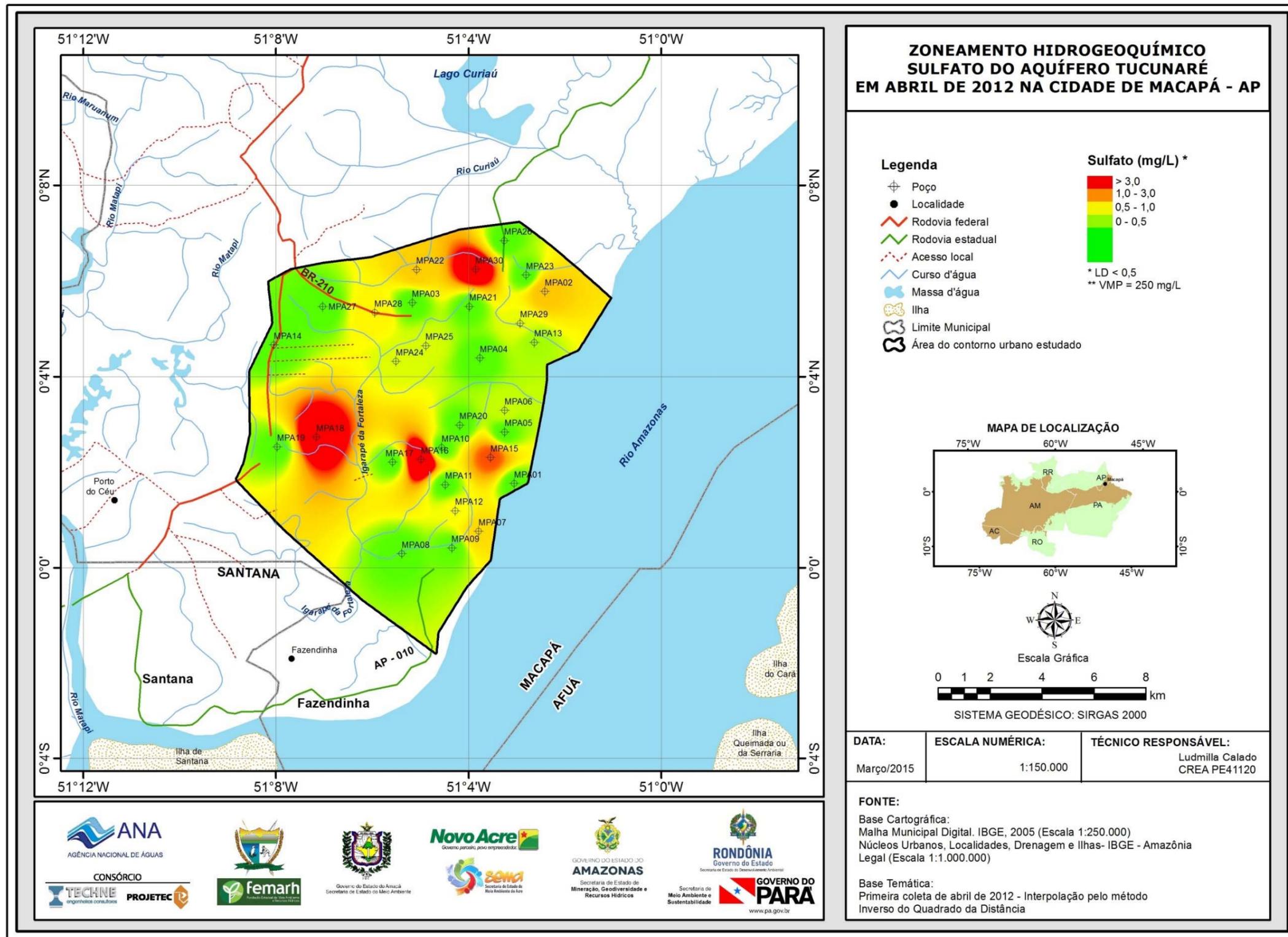


Figura 5.33a – Zoneamento de Sulfato (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

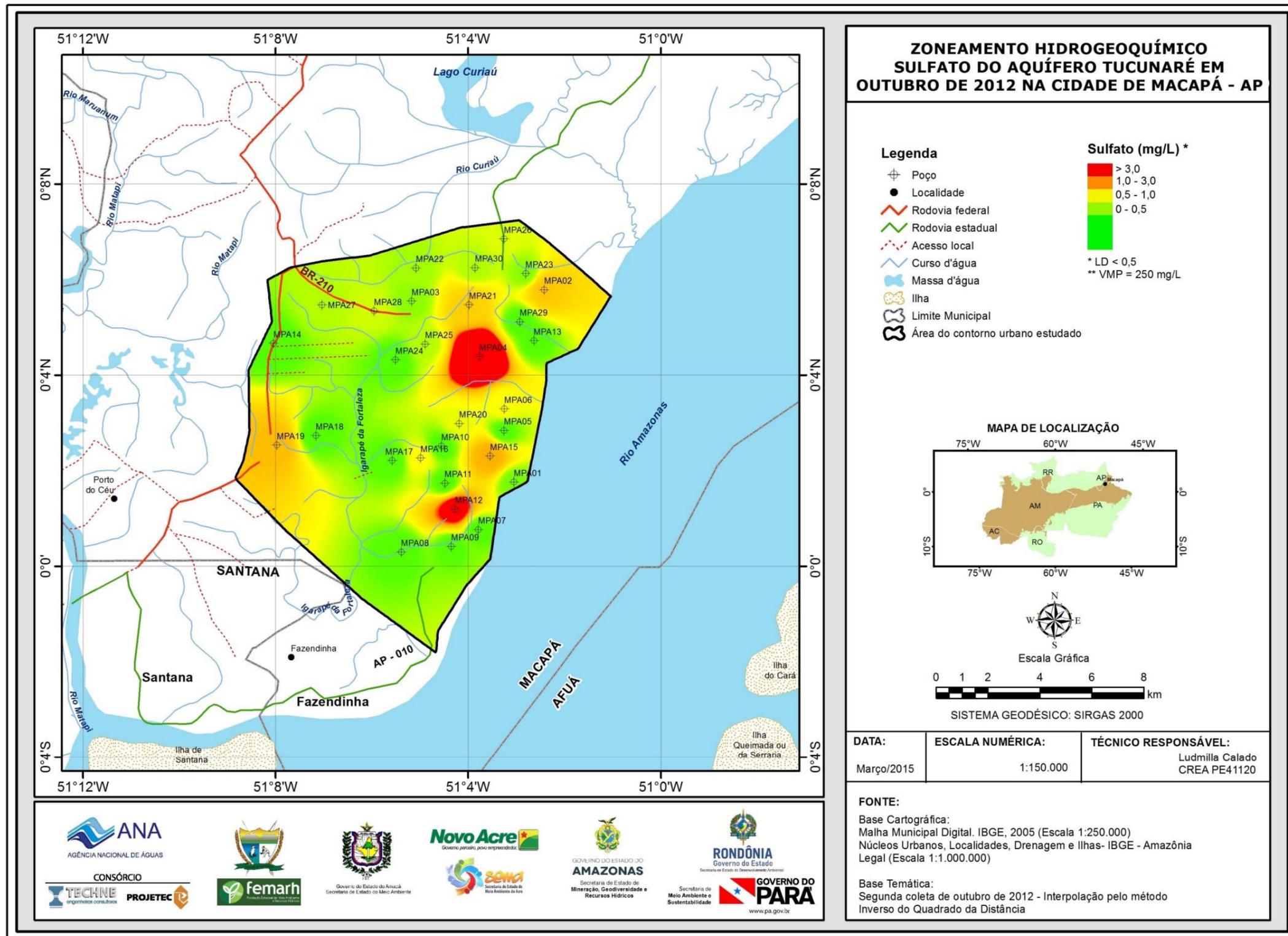


Figura 5.33b – Zoneamento de Sulfato (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.9.3 - Bicarbonato

A maioria dos íons bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) e carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) em águas subterrâneas são derivados do dióxido de carbono na atmosfera e no solo e de soluções de rochas carbonatadas. Águas bicarbonatadas sódicas podem ser concentradas nos solos por evaporação, mas se muito cálcio estiver presente, o bicarbonato é retirado da água através da precipitação de carbonato de cálcio.

A concentração de bicarbonato em águas subterrâneas varia normalmente de 10 a 800 mg/L, sendo mais comuns concentrações entre 50 e 400 mg/L. Existe uma forte relação entre o pH da água e as concentrações do gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), dos bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) e dos carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ); estes dois íons definem a alcalinidade das águas.

De acordo com a Resolução CONAMA 396/2008 e com a Portaria MS 2914/11 não há restrição quanto às concentrações de bicarbonato para o consumo humano, ou seja, não é definido um valor máximo permitido.

A estatística descritiva dos teores de bicarbonato nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, em Macapá (**tabela 5.41**) revela que 83% (25/30) das amostras na primeira e na segunda campanha obtiveram valores iguais a zero.

**Tabela 5.41** – Estatística descritiva do Bicarbonato do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (B-1) - abril de 2012 e no período seco (B-2) - outubro de 2012.

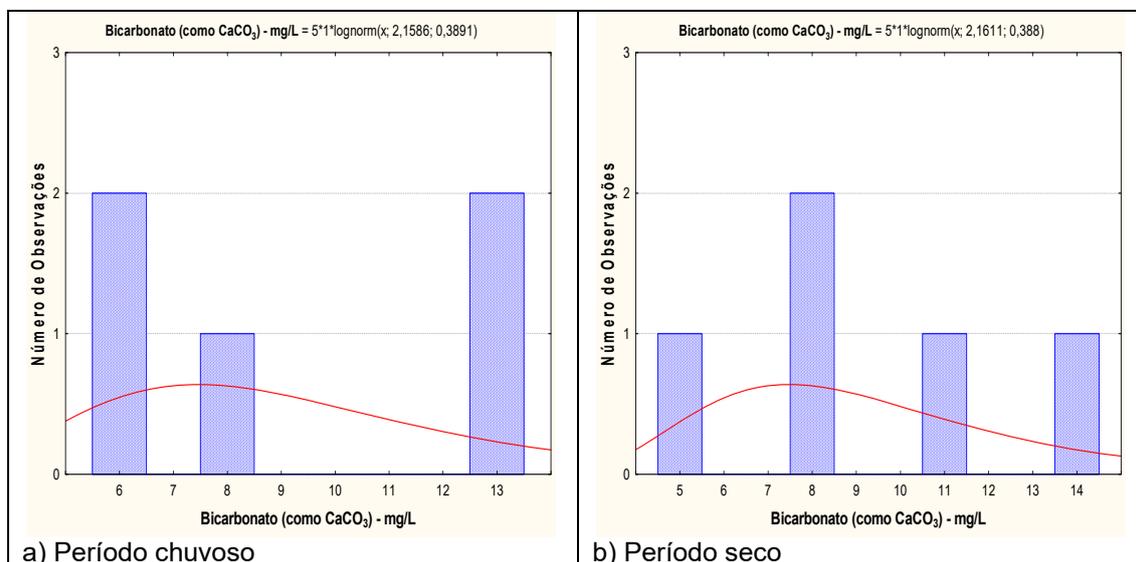
B	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
B-1	30	1,53	0,2	2,87	0	0,0	13,0	3,73	0,68	2,40
B-2	30	1,53	0,2	2,86	0	0,0	14,0	3,71	0,68	2,37

No período chuvoso, as concentrações de bicarbonato oscilaram entre 0 e 13,0 mg/L; enquanto que no período de estiagem as concentrações ficaram compreendidas entre 0 e 14,0 mg/L.

Devido ao baixo número de amostras que apresentaram algum teor de bicarbonato (5/30), em ambas as campanhas, optou-se por elaborar os histogramas e realizar a modelagem geoestatística apenas utilizando tais valores, sem a inserção das amostras restantes (25/30) que apresentaram ausência de bicarbonato, pois a inclusão de zero não permite avaliar distribuição de probabilidade. Assim, os histogramas da **figura 5.34** representativos dos pontos amostrados nas campanhas de abril e de outubro de 2012, foram modelados por uma função de distribuição de probabilidade lognormal. Essa função permitiu estimar com risco calculado, os teores de bicarbonato, no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá (**tabela 5.42**), onde se verificou que não há influência de sazonalidade, pois não tem diferença entre os valores das duas campanhas, sendo a razão igual a 1 (um).

Segundo Lopes *et al.* (2013), os valores extremamente baixos de bicarbonato podem estar relacionados com as variações da alcalinidade total, uma vez que uma alteração nas concentrações dos íons carbonato e bicarbonato, provoca também alterações nos valores de pH de uma solução, já que esses três íons

( $H^+$ ,  $CO_3^{2-}$  e  $HCO_3^-$ ) constituem um verdadeiro sistema em equilíbrio. Assim, a reação entre os dois primeiros, com a formação do terceiro, provoca uma diminuição das concentrações do carbonato e um aumento das concentrações do bicarbonato. O que torna o processo dinâmico e faz com que um elemento seja facilmente convertido em outro por meio de reações que ocorrem no ambiente.



**Figura 5.34** – Histograma de frequência e curva lognormal de distribuição de probabilidade do Bicarbonato do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

Para Obiefuna & Sheriff (2011) a origem do bicarbonato nas águas subterrâneas está relacionada principalmente aos processos que produzem o gás carbônico no solo por meio da decomposição e oxidação da matéria orgânica e à respiração das raízes das plantas.

**Tabela 5.42** – Distribuição de probabilidade do Bicarbonato do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (B-1) - abril de 2012 e no período seco (B-2) – outubro de 2012.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
B-1	8,7	6,2	5,3	4,6	3,9	3,5
B-2	8,7	6,3	5,3	4,6	3,9	3,5
Razão	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

### Zoneamento do Bicarbonato

A distribuição espacial dos teores de bicarbonato encontrados nas águas subterrâneas, do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, no período chuvoso (abril de 2012) e no período de estiagem (outubro de 2012) é mostrada respectivamente nas **figuras 5.35a** e **5.35b**. Nas duas campanhas é possível verificar que a faixa de valores predominante é de 0 a 5 mg/L. Os valores acima dessa classe podem ser notados em pontos isolados.

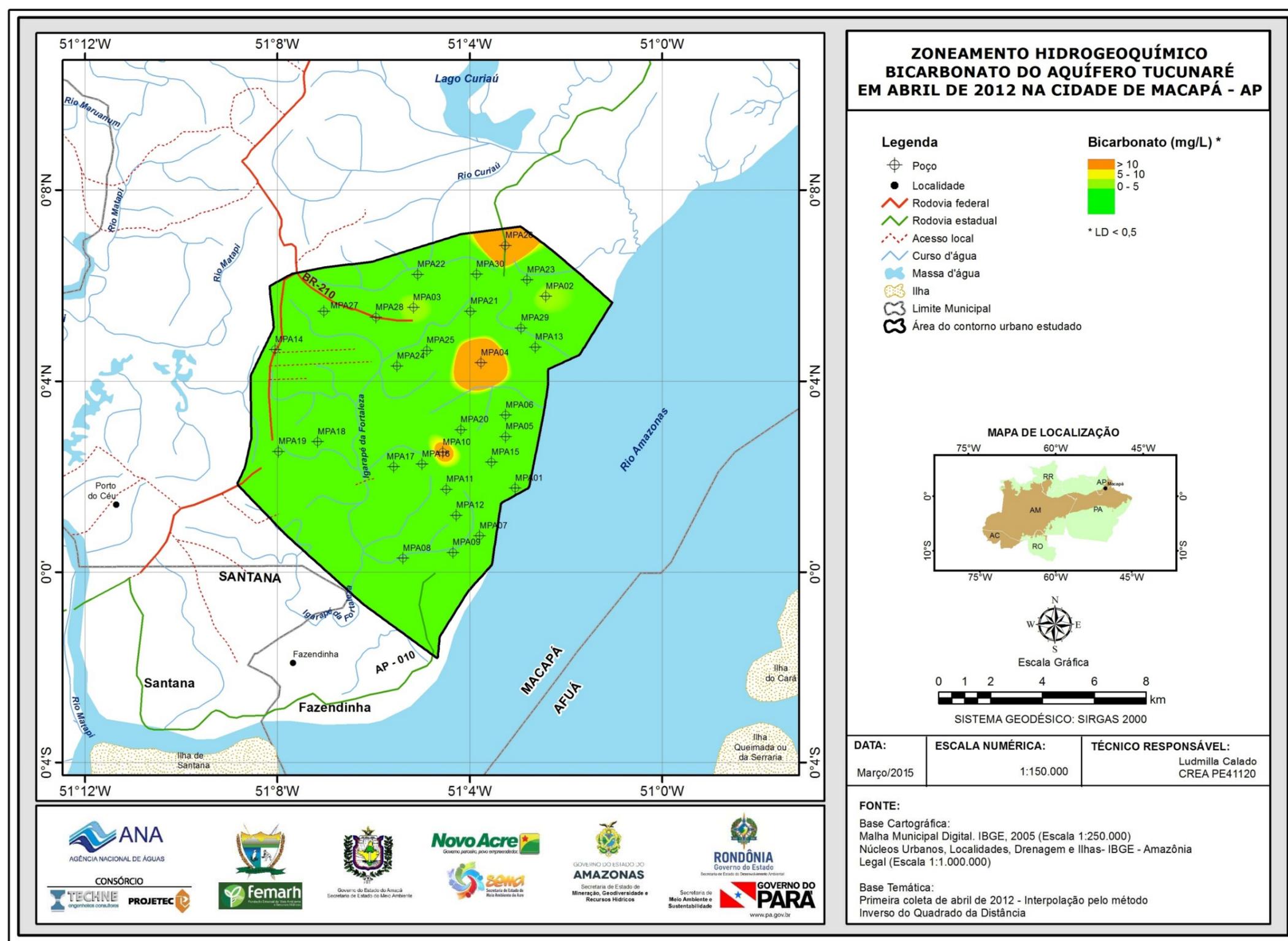


Figura 5.35a – Zoneamento de Bicarbonato (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

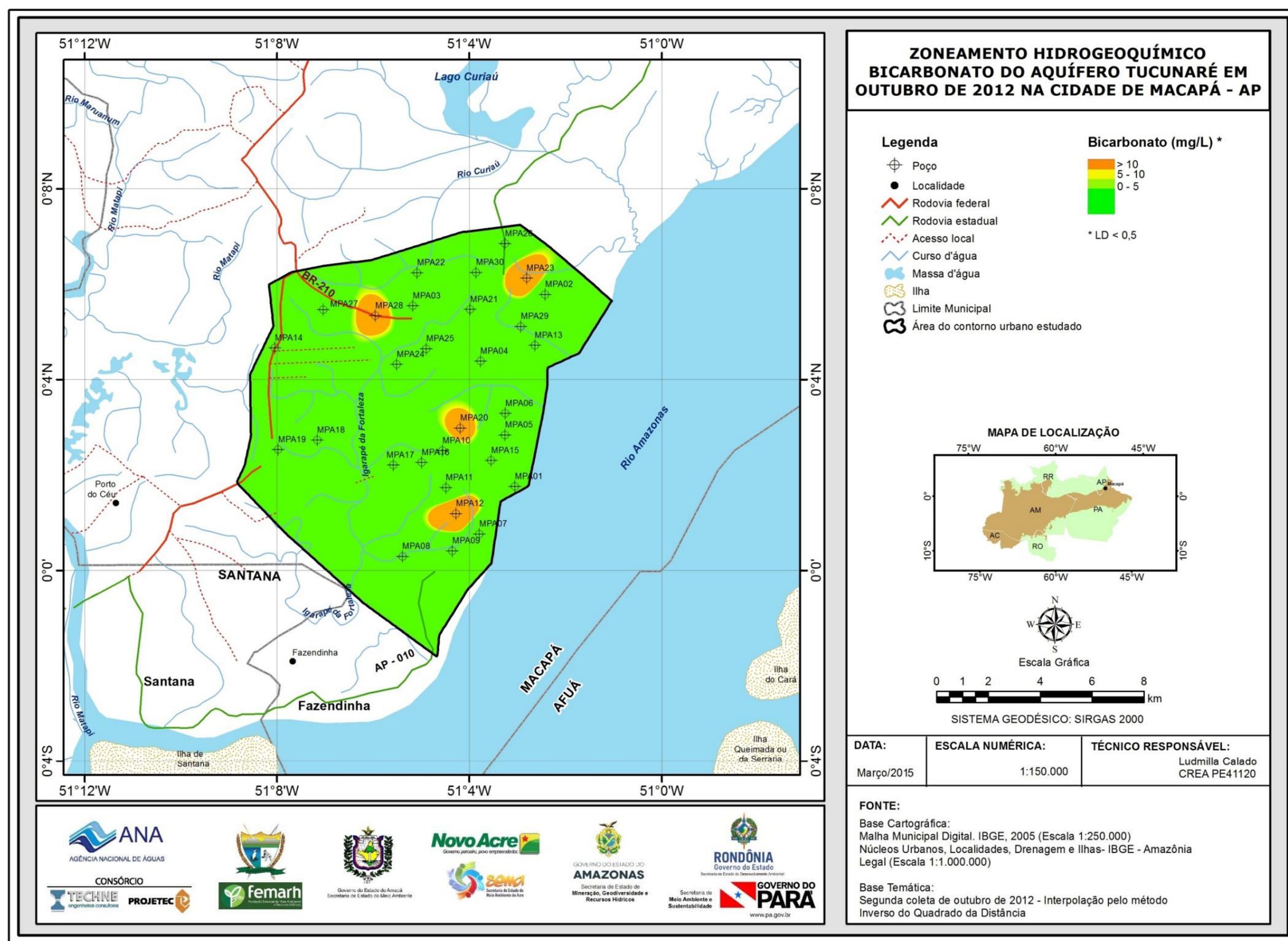


Figura 5.35b – Zoneamento de Bicarbonato (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

## 5.2.10 - Dureza

A dureza da água mede o grau de impedimento da ação do sabão e pode ser expressa como dureza temporária, dureza permanente e dureza total. A dureza temporária ou dureza de carbonatos é causada pelos íons de cálcio e de magnésio combinados, podendo ser eliminada com a ebulição da água.

A dureza permanente ou dureza não carbonatada é a dureza que persiste após a fervura da água; é produzida pelos íons de cálcio e de magnésio combinados com os íons de sulfato, cloreto, nitrato e outros. A dureza total é a soma da dureza temporária com a dureza permanente, é usualmente expressa em mg/L ( $\text{CaCO}_3$ ) e dada pela equação:

$$\text{Dureza total} = 2,5 [\text{Ca}^{2+}] + 4,1[\text{Mg}^{2+}]$$

De acordo com Von Sperling (2005), em termos de tratamento e abastecimento público, as águas podem ser classificadas de acordo com seu grau de dureza, conforme descreve a **tabela 5.43**.

**Tabela 5.43** – Classificação das águas segundo a sua faixa de valor de dureza (Von Sperling, 2005).

Dureza (mg/L de $\text{CaCO}_3$ )	Tipo de Água
< 50	Mole
50 - 150	Moderada
150 - 300	Dura
> 300	Muito Dura

Segundo a classificação de Von Sperling (2005), as águas do aquífero Tucunaré, tanto no período chuvoso como no seco, são 100% (30/30) do tipo mole. Isto provavelmente se deve ao clima da região amazônica, no qual as chuvas são muito frequentes, e há uma constante renovação das águas, o que favorece a baixa mineralização. Valores anômalos apresentados são atribuídos a contaminações oriundas de atividades antrópicas. Nas duas campanhas, nenhum dos poços amostrados ultrapassaram o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011, de 500 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .

A estatística descritiva da dureza das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá (**tabela 5.44a**) mostra que no período chuvoso os valores oscilaram entre 0,4 e 29,3 mg/L, com média de 5,8 mg/L e mediana de 3,4 mg/L. No período de estiagem, a dureza variou de 0,6 a 15,1 mg/L, com média de 3,9 mg/L e mediana de 3,2 mg/L.

**Tabela 5.44a** – Estatística descritiva da Dureza do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (D-1) - abril de 2012 e no período seco (D-2) - outubro de 2012, com valores inconsistentes de cálcio.

Dureza	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
D-1	30	5,8	3,4	8,1	3,4	0,4	29,3	6,3	1,2	2,1
D-2	30	3,9	2,7	5,1	3,2	0,6	15,1	3,2	0,6	1,8

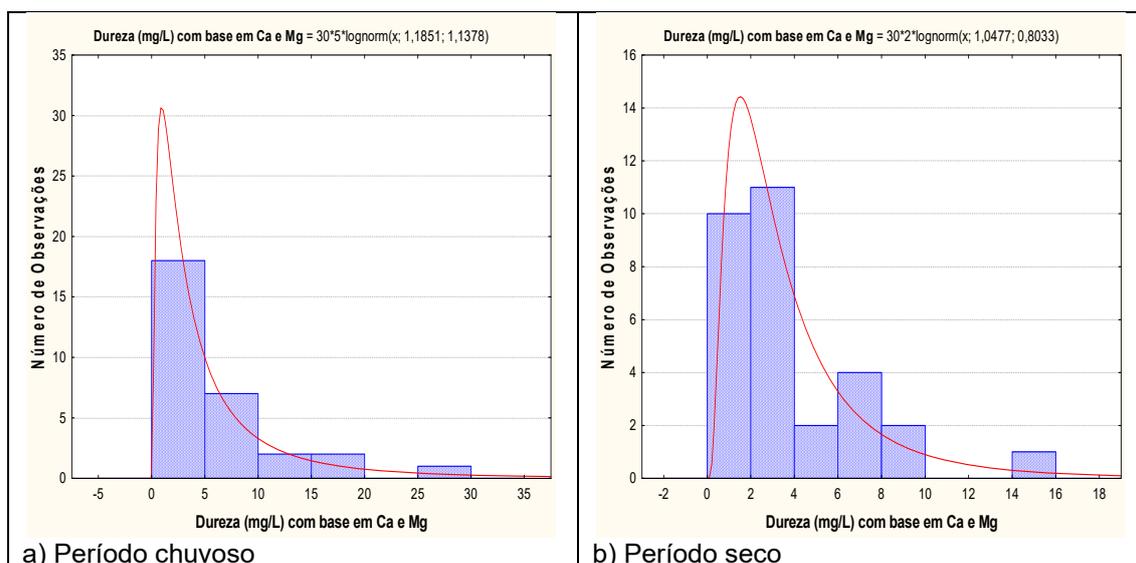
Embora a média e a mediana da dureza sejam maiores no período chuvoso, os resultados da modelagem geoestatística, baseada nos histogramas da **figura 5.36a** e realizada com dados inconsistentes de cálcio, indicam com probabilidades acima de 50% (**tabela 5.45a**), que a dureza tenderia a ser maior no período seco.

Por outro lado, com valores consistentes de cálcio (**item 5.2.8.3**) a estatística descritiva da dureza assume os valores mostrados na **tabela 5.44b** e a modelagem, baseada nos histogramas da **figura 5.36b** comprova que, de fato, a dureza com risco calculado é maior no período chuvoso (**tabela 5.45b**).

**Tabela 5.44b** – Estatística descritiva da Dureza do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (D-1) - abril de 2012 e no período seco (D-2) - outubro de 2012, com valores consistentes de cálcio.

Dureza	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
D-1	30	6,2	3,9	8,4	4,4	0,55	29,3	6,1	1,1	2,2
D-2	30	3,4	2,2	4,6	2,6	0,42	15,1	3,2	0,6	2,1

Os histogramas de frequência de dureza das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá com valores inconsistentes de cálcio e as curvas de distribuição probabilidade lognormal ajustada (**figura 5.36a**) são apresentados para o período chuvoso (abril de 2012) e para o período de estiagem (outubro de 2012).

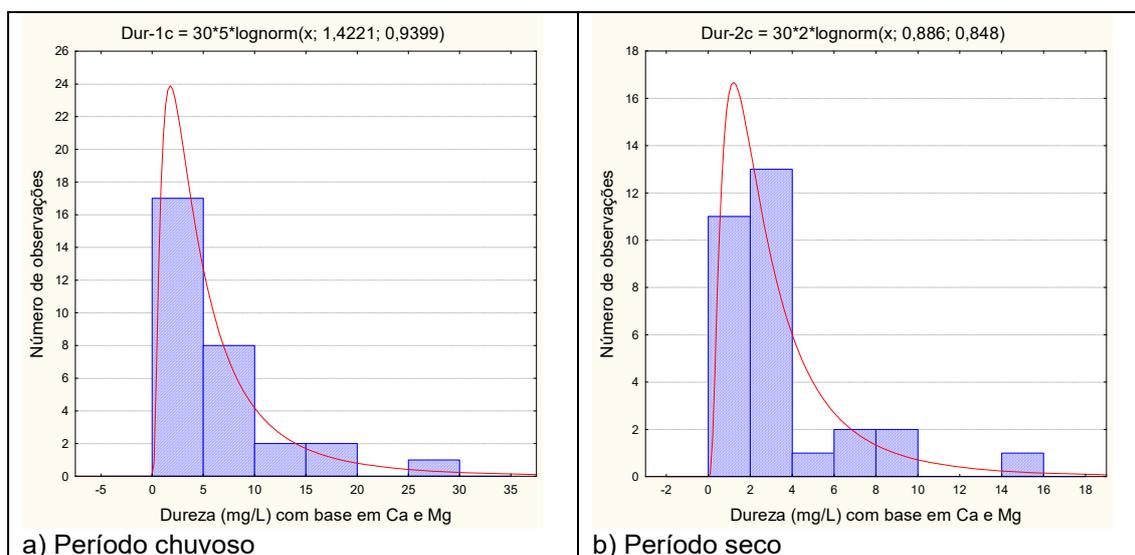


**Figura 5.36a** – Histogramas de frequência e curvas normais ajustadas de distribuição de probabilidade da Dureza do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012, com valores inconsistentes de cálcio.

**Tabela 5.45a** – Distribuição de probabilidade da Dureza do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (D-1) abril de 2012 e no período seco (D-2) outubro de 2012, com dados consistentes de cálcio.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
D-1	3,271	1,255	0,761	0,503	0,316	0,232
D-2	2,851	1,450	1,018	0,761	0,548	0,440
Razão	1,1	0,9	0,7	0,7	0,6	0,5

Os histogramas de frequência de dureza das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá com valores consistentes de cálcio e as curvas de distribuição probabilidade lognormal ajustada (**figura 5.36b**) são apresentados para o período chuvoso (abril de 2012) e para o período de estiagem (outubro de 2012).



**Figura 5.36b** – Histogramas de frequência e curvas normais ajustadas de distribuição de probabilidade da Dureza do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012, com valores consistentes de cálcio.

**Tabela 5.45b** – Distribuição de probabilidade da Dureza do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (D-1) abril de 2012 e no período seco (D-2) outubro de 2012, com dados consistentes de cálcio.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
D-1	4,145	1,879	1,243	0,883	0,601	0,465
D-2	2,425	1,188	0,818	0,601	0,425	0,337
Razão	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4	1,4

### ***Zoneamento da Dureza***

A distribuição espacial da dureza das águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, no período chuvoso (abril de 2012) e no período seco (outubro de 2012), pode ser observada na **figura 5.37a** e **figura 5.37b**. Nas duas campanhas é possível notar que os valores de dureza foram mais frequentes na classe que varia de 0 a 5 mg/L, seguido da faixa de 5 a 10 mg/L. Valores acima dessas classes são representados por manchas esparsas ao longo da área de estudo.

Vale ressaltar que a distribuição espacial dos teores de dureza na área de estudo apresentou comportamento semelhante ao zoneamento dos elementos cálcio e magnésio, como já era de se esperar, pois, segundo Celligoi (1999), a dureza constitui na soma das concentrações de cálcio e magnésio, ambos expressos como  $\text{CaCO}_3$  em mg/L.

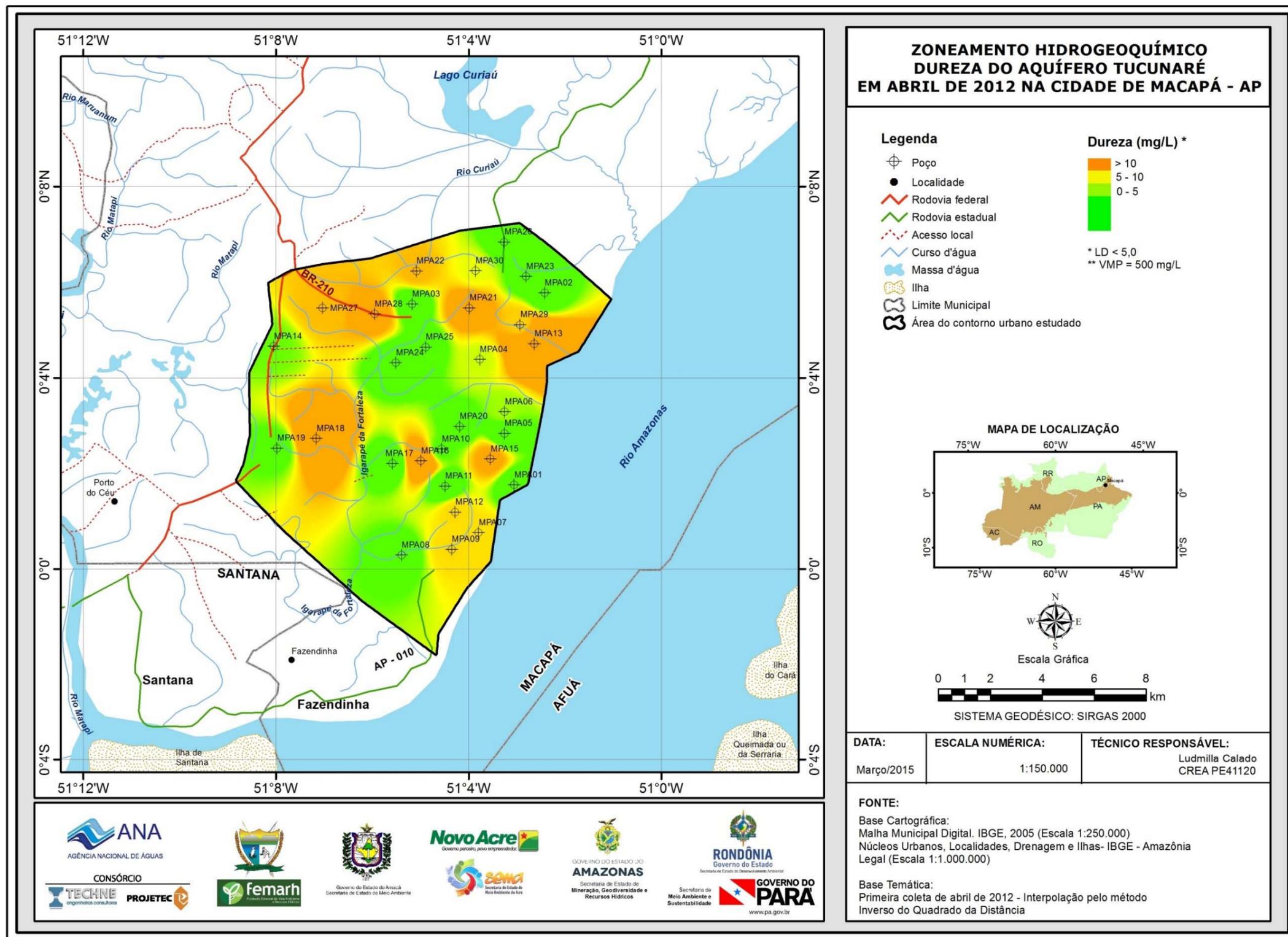


Figura 5.37a – Zoneamento da Dureza (mg/L CaCO<sub>3</sub>) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

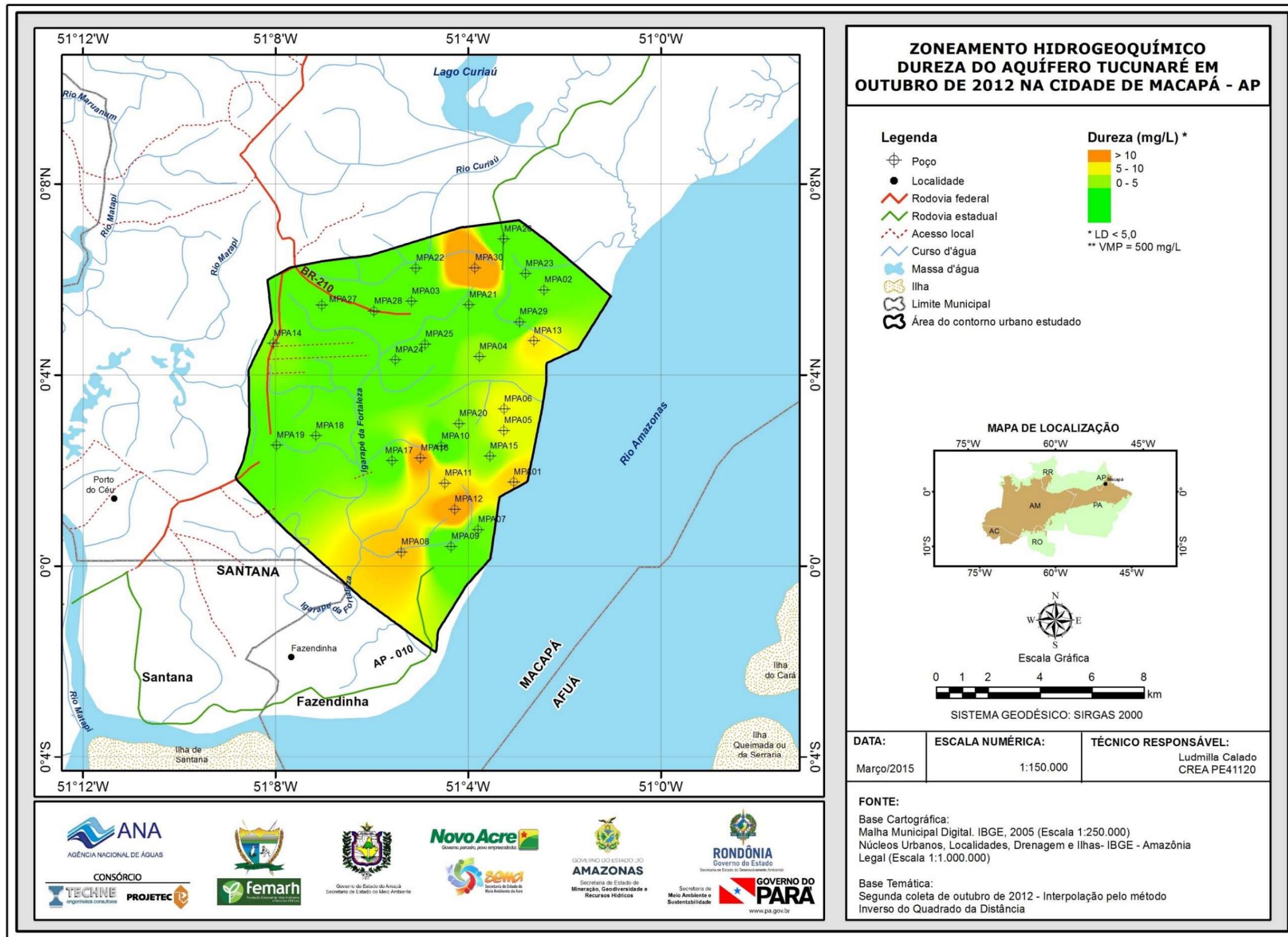


Figura 5.37b – Zoneamento da Dureza (mg/L CaCO<sub>3</sub>) das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.11 – Compostos Nitrogenados

O nitrogênio é um componente importante no ciclo biogeoquímico, onde pode ser encontrado na matéria orgânica, como espécie dissolvida e gases. Os minerais contendo nitrogênio são, em geral, muito solúveis; por isso, são raros na natureza (Appelo & Postma, 1993).

O nitrogênio circula na atmosfera onde ocorrem reações redox catalisadas microbiologicamente; são as reações de oxidação do  $\text{NH}_4^+$  para  $\text{NO}_2^-$  e para  $\text{NO}_3^-$  (nitrificação) e reações redox do  $\text{NO}_3^-$  para  $\text{NO}_2^-$  e para  $\text{NH}_4^+$  (redução do nitrato e redução do nitrito), redução do  $\text{NO}_3^-$  para o  $\text{N}_{2(g)}$  (denitrificação) e redução do  $\text{N}_{2(g)}$  para  $\text{NH}_4^+$  (fixação de nitrogênio).

Os esgotos sanitários constituem geralmente a principal fonte de nitrogênio nas águas naturais, lançando nitrogênio orgânico devido à presença de proteínas e nitrogênio amoniacal, devido à hidrólise da ureia na água (Metcalf & Eddy, 1991).

A quantidade de nitrogênio na água pode indicar poluição recente ou remota. O nitrogênio pode estar presente sob as suas diversas formas compostas: orgânica, amoniacal, nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ); ele segue um ciclo desde o organismo vivo até à mineralização total, onde está presente sob a forma de nitrato.

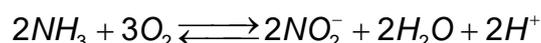
Assim, é possível avaliar o grau e a distância a uma fonte de poluição através das concentrações e das formas dos compostos nitrogenados presentes na água. Águas com predominância de nitrogênio orgânico e amoniacal são poluídas por descargas de esgotos próximos. Águas com concentrações de nitrato predominantes sobre nitrito e amônia indicam uma poluição remota, porque os íons nitratos são produtos finais de oxidação do nitrogênio.

Os nitratos são muito solúveis e por isso, dificilmente precipitam. Eles tendem a estabilidade em meios redutores, podendo passar a  $\text{N}_2$  ou  $\text{NH}_4^+$  e excepcionalmente a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ). Esta redução é um fenômeno biológico produzido principalmente pelas bactérias Nitrossomas. A maioria dos compostos nitrogenados passa a  $\text{NO}_3^-$  em meio oxidante, enquanto o íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) pode transformar-se parcialmente em  $\text{N}_2$ . O solo pode fixar nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), em especial através da vegetação.

A nitrificação é um processo de oxidação biológica da amônia sob a forma do íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) para nitrato (Snoeyink & Jenkins, 1980).



Caso a amônia esteja sob a forma gasosa ( $\text{NH}_3$ ) a nitrificação ou oxidação biológica a converterá em nitrito, através da reação:



As concentrações de nitrato nas águas naturais estão na faixa de 0,1 a 10 mg/L; porém, em águas muito poluídas, podem chegar a 200 mg/L; em alguns casos, em áreas influenciadas por aplicações excessivas de fertilizantes, as concentrações podem ser maiores que 600 mg/L.

Independente da sua origem, que também pode ser mineral, os nitratos em concentrações acima de 45 mg/L provocam em crianças a cianose ou methemoglobinemia, condições mórbidas associadas à descoloração da pele, em consequência de alterações no sangue.

Dessa forma, a Portaria MS 2914/2011 estabeleceu limites máximos de padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde humana, como 1,5 mg/L para Amônia, 1 mg/L para Nitrito e 10 mg/L para Nitrato.

A Resolução CONAMA 396/2008, também estabeleceu limites máximos aceitáveis para esses parâmetros, de acordo com os usos considerados preponderantes, como pode ser observado na **tabela 5.46**.

**Tabela 5.46** - Valores Máximos Permitidos (VMP) de nitrato e nitrito para os usos preponderantes (Resolução CONAMA 396/2008).

Parâmetro	Usos Preponderantes da Água			
	Consumo Humano ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	Dessedentação Animal ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	Irrigação ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	Recreação ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )
Nitrato (expresso em N)	10.000	90.000	-	10.000
Nitrito (expresso em N)	1.000	10.000	1.000	1.000

Nitrogênio inorgânico pode existir no estado livre como gás, nitrito, nitrato e amônia. Com exceção de algumas ocorrências como sais evaporíticos, o nitrogênio e seus compostos não são encontrados nas rochas da crosta terrestre. Nas águas subterrâneas os nitratos ocorrem em teores em geral abaixo de 5 mg/L e nitritos e amônia são ausentes, pois são rapidamente convertidos a nitrato pelas bactérias. Elevado teor de nitrito e amônia é sinal de poluição orgânica recente.

No sistema digestivo o nitrato é transformado em nitrosaminas, que são substâncias carcinógenas. Crianças com menos de três meses de idade possuem, em seu aparelho digestivo, bactérias que reduzem o nitrato a nitrito. Este se liga muito fortemente a moléculas de hemoglobina, impedindo-as de transportarem oxigênio para as células do organismo. A deficiência em oxigênio leva a danos neurológicos permanentes, dificuldade de respiração (falta de ar) e em casos mais sérios à morte por asfixia. Aos seis meses de idade, a concentração de ácido hidrolórico aumenta no estômago, matando as bactérias redutoras de nitrato.

### 5.2.11.1 - Nitrato

A **tabela 5.47** mostra a estatística descritiva dos teores de nitrato presentes nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá nas duas campanhas de coleta de água realizadas. No período chuvoso, as concentrações de nitrato variam de 0,19 a 14,9 mg/L com média de 6,9 mg/L e mediana igual a 5,9 mg/L. No período seco, os teores variam de 0,09 a 11,2 mg/L, com média de 3,9 mg/L e mediana de 2,6 mg/L.

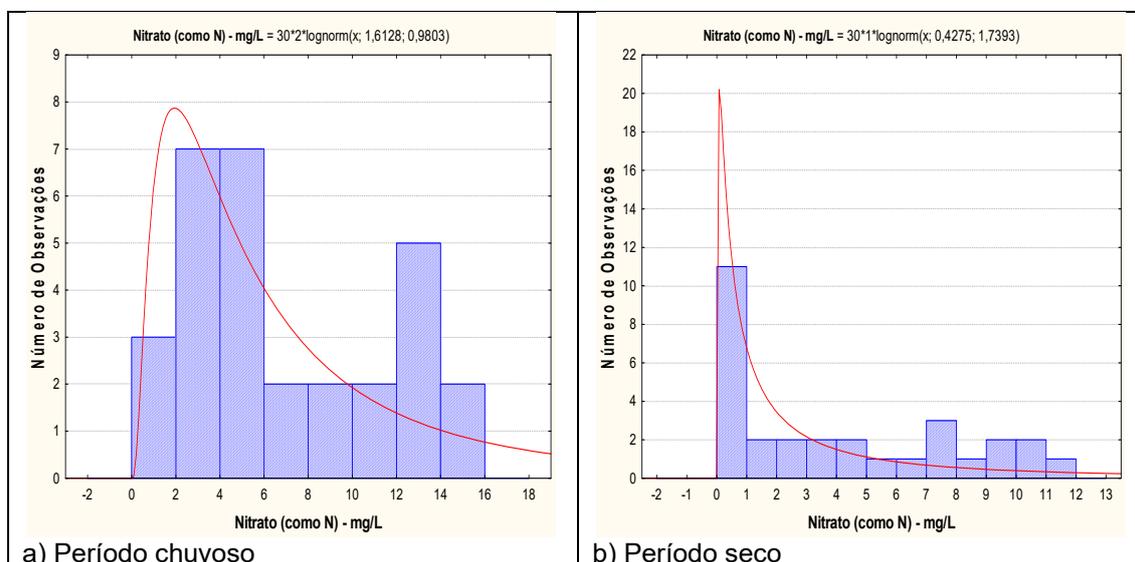
**Tabela 5.47** – Estatística descritiva do Nitrato do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (N-1) - abril de 2012 e no período seco (N-2) - outubro de 2012.

Nitrato	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
N-1	30	6,9	5,2	8,7	5,9	0,19	14,9	4,6	0,8	0,3
N-2	30	3,9	2,5	5,4	2,6	0,09	11,2	3,9	0,7	0,5

Na primeira campanha, apenas 3% (1/30) das amostras apresentaram teores de nitrato abaixo do limite de detecção de 0,2 mg/L; enquanto que na segunda campanha, cerca de 13% (4/30) dos poços obtiveram resultados abaixo do limite quantificável de 0,1 mg/L. Os limites de quantificação dependem do método utilizado e podem variar para o mesmo parâmetro (**item 5.1.3**).

Dentre o total de amostras analisadas nas duas campanhas, 30% (9/30) dos poços no período chuvoso e 10% (3/30) no período de estiagem, apresentaram valores que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação segundo a Resolução CONAMA 396/2008. Contudo, todas as amostras analisadas nas duas campanhas poderiam ser utilizadas para a dessedentação animal, haja vista que não ultrapassaram os limites definidos pela Resolução citada.

Os histogramas de frequência de nitrato (**figura 5.38**), representativos dos pontos amostrados nas coletas de abril e outubro de 2012, foram modelados por uma função de distribuição de probabilidade lognormal. Essa função permitiu estimar com risco calculado, valores de nitrato nas duas campanhas no aquífero Tucunaré, em Macapá.



**Figura 5.38** – Histogramas de frequência e curvas normais ajustadas de distribuição de probabilidade do Nitrato do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

Com base na **tabela 5.48** é possível verificar que os valores do período chuvoso são maiores do que os do período seco, o que sugere alguma influência da sazonalidade, pois a razão das duas campanhas é superior a 1 (um). Tal resultado é justificável, haja vista que no período chuvoso ocorre o fenômeno da ressaca na região de Macapá, e provavelmente as fossas sépticas transbordam juntamente com as galerias pluviais, que se misturam as águas superficiais e posteriormente infiltram no lençol freático, ocasionando a sua contaminação.

**Tabela 5.48** – Distribuição de probabilidade do Nitrato do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (N-1) - abril de 2012 e no período seco (N-2) - outubro de 2012.

P(x≥a)	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
N-1	5,017	2,198	1,428	1,000	0,670	0,513
N-2	1,533	0,355	0,165	0,088	0,043	0,027
Razão	3,3	6,2	8,7	11,4	15,6	19,1

Segundo Mello *et al.* (1984), o nitrato e o nitrito são substâncias químicas derivadas do nitrogênio e são encontrados de forma natural na água e no solo em baixas concentrações. A deposição de matéria orgânica no solo, como acontece quando se utiliza fossas e sumidouros, aumenta drasticamente a quantidade de nitrogênio. Esse nitrogênio é biotransformado e por fim se transforma na substância inorgânica denominada nitrato que possui grande mobilidade no solo alcançando o manancial subterrâneo e ali se depositando. O nitrato por possuir essas características, se torna um ótimo indicativo para avaliar se um dado manancial subterrâneo está sendo contaminado pela atividade antrópica sobre ele exercida.

Diante disso, fica evidente que os valores de nitrato encontrados nas águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, superiores aos limites permitidos para consumo humano se devem a contaminação oriunda, principalmente da ausência de saneamento básico, haja vista em muitos casos, a proximidade das fossas com os poços.

### **Zoneamento de Nitrato**

A distribuição espacial dos teores de nitrato nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, tanto no período chuvoso (**figura 5.39a**) quanto no período de estiagem (**figura 5.39b**), é caracterizada por valores compreendidos entre 0,2 a 5,0 mg/L, seguida da faixa de 5,0 a 10,0 mg/L.

Apesar da maioria das amostras apresentarem valores baixos de nitrato, em ambas as campanhas, alguns poços ultrapassaram o limite de potabilidade estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, como pode ser observado na última faixa de valores (>10 mg/L), representada por manchas pontuais.

Os valores de nitrato abaixo do limite de detecção, ou seja, <0,1 mg/L, na segunda campanha podem ser observados em alguns pontos ao longo da área de estudo.

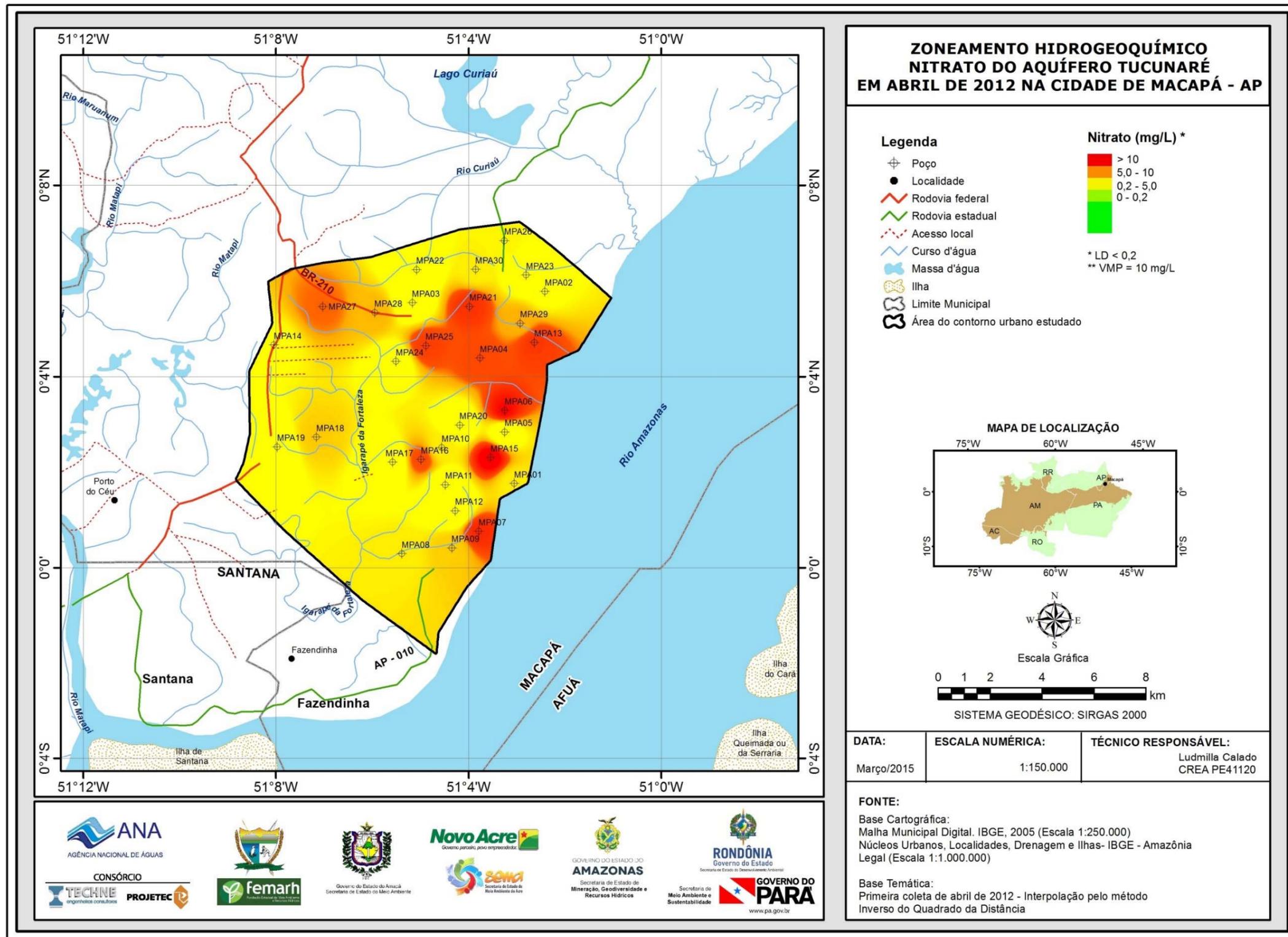


Figura 5.39a – Zoneamento de Nitrato (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

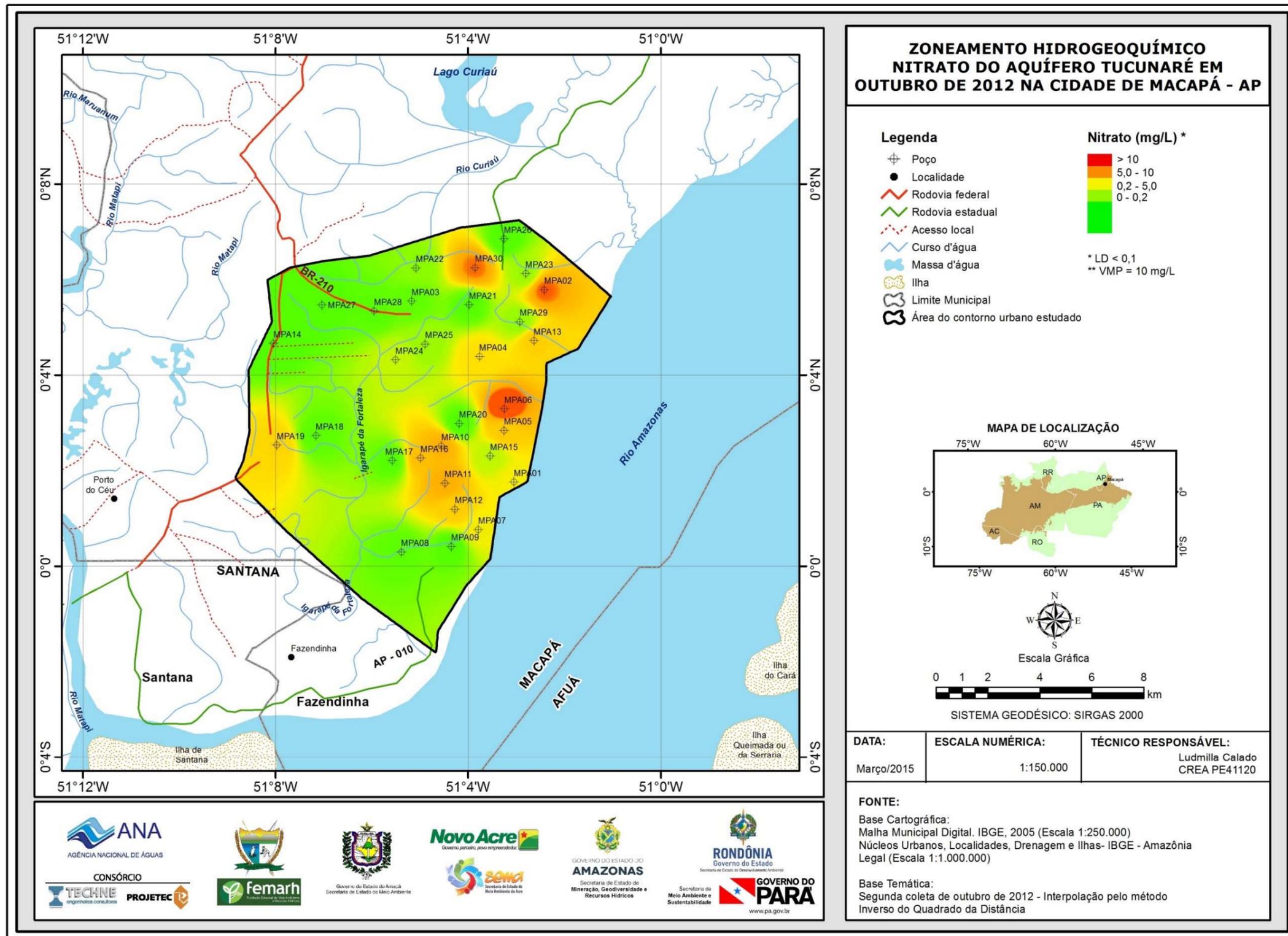


Figura 5.39b – Zoneamento de Nitrato (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.11.2 - Nitrito

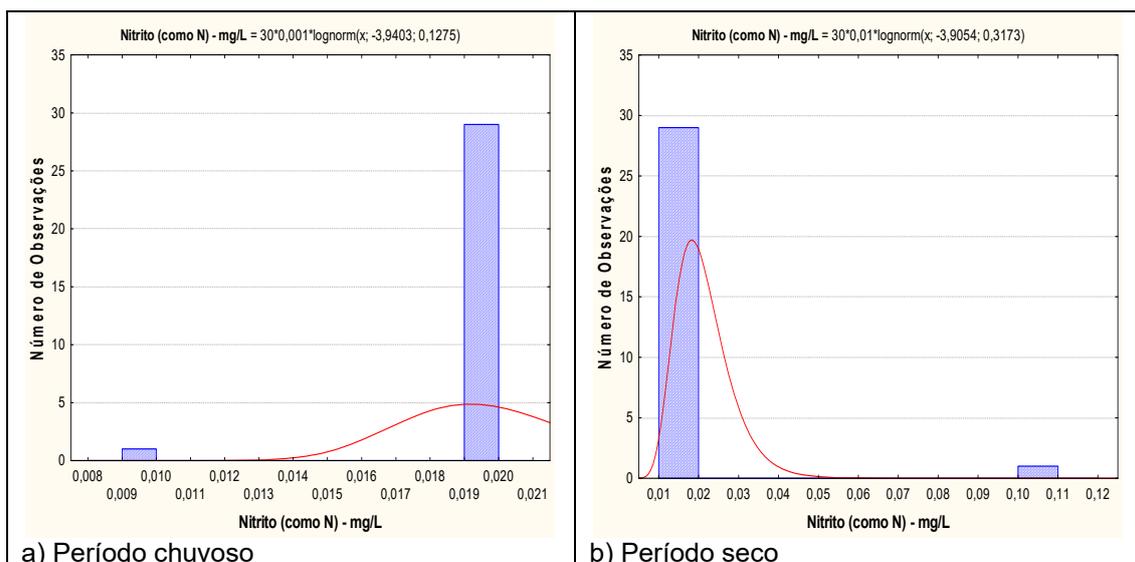
A **tabela 5.49** mostra a estatística descritiva dos teores de nitrito presentes nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, nas duas campanhas de amostragem realizadas. No período chuvoso (abril de 2012), todas as amostras apresentaram valores abaixo do limite de detecção, sendo 97% (29/30) com resultados inferiores a 0,02 mg/L, e 3% (1/30) com valores de nitrito abaixo de 0,01 mg/L. No período de estiagem (outubro de 2012), 97% (29/30) dos poços amostrados tiveram concentrações de nitrito abaixo do limite de quantificação de 0,02 mg/L. Portanto, de modo geral, a ocorrência de nitrogênio sob a forma de nitrito é praticamente desprezível, haja vista que o maior valor encontrado foi de 0,11 mg/L, na segunda campanha. Todas as amostras analisadas nas duas coletas, apresentaram teores de nitrito dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria MS 2914/2011 de 1 mg/L, assim como, poderiam ser usadas para o consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008, em relação a esse parâmetro.

**Tabela 5.49** – Estatística descritiva do Nitrito do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (N-1) - abril de 2012 e no período seco (N-2) - outubro de 2012.

Nitrito	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
N-1	30	0,0196	0,0190	0,0190	0,0199	0,0099	0,0199	0,0018	0,0003	-5,4772
N-2	30	0,0220	0,0190	0,0090	0,1080	0,0190	0,11	0,0162	0,0030	5,4772

Os baixos teores de nitrito encontrados nas águas do aquífero Tucunaré são coerentes, pois de acordo com Campos & Rohlf (2010) nas águas subterrâneas, os nitratos ocorrem em teores, geralmente, abaixo de 5 mg/L, enquanto que nitritos e amônia são ausentes, devido à velocidade com que são convertidos em nitrato pelas bactérias.

Os histogramas de frequência de nitrito (**figura 5.40**), representativos dos pontos amostrados nas coletas de abril e outubro de 2012, foram modelados por uma função de distribuição de probabilidade lognormal, que permitiu estimar, com risco calculado valores de nitrito, conforme apresentado na **tabela 5.50**, onde se pode verificar que não há influência da sazonalidade nos teores de nitrito, haja vista que a razão entre as duas campanhas é da ordem de 1 (um).



**Figura 5.40** – Histograma de frequência e curva normal de distribuição de probabilidade do Nitrito do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

**Tabela 5.50** – Distribuição de probabilidade do Nitrito do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (N-1) - abril de 2012 e no período seco (N-2) - outubro de 2012.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
N-1	0,0194	0,0175	0,0165	0,0158	0,0150	0,0145
N-2	0,0201	0,0154	0,0134	0,0119	0,0105	0,0096
Razão	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

### **Zoneamento de Nitrito**

A distribuição espacial dos teores de nitrito nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, tanto no período chuvoso (**figura 5.41a**) quanto no período de estiagem (**figura 5.41b**), é caracterizada predominantemente por valores de até 0,02 mg/L, ou seja, inferiores ao limite de detecção. Apenas um poço (MPA07) na segunda campanha apresentou valor superior ao limite de detecção, com 0,108 mg/L.

Nenhum dos poços ultrapassou o limite de potabilidade estabelecido pela Portaria MS 2914/2011 e suas águas poderiam ser utilizadas para os usos definidos pela Resolução CONAMA 396/2008.

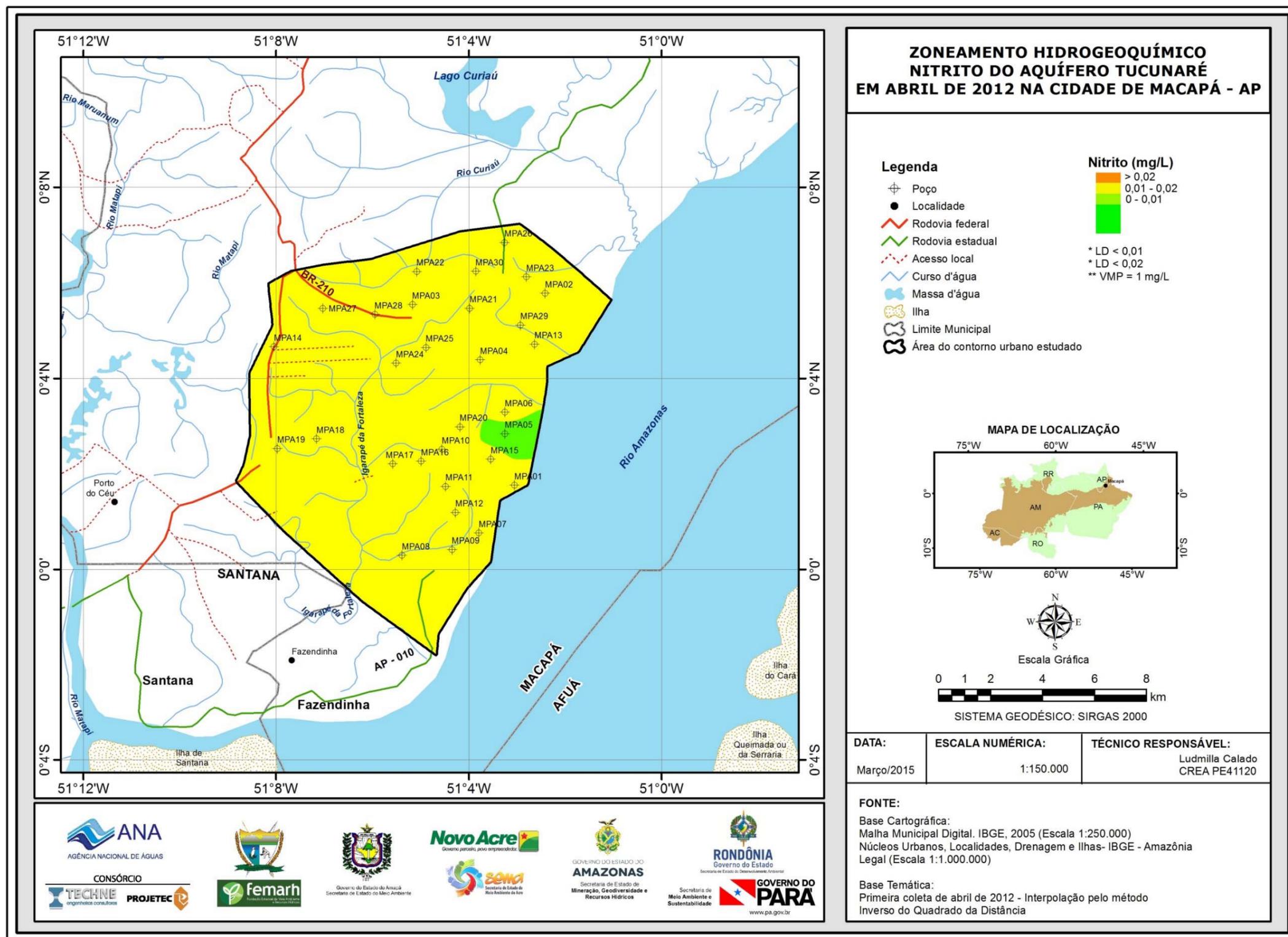


Figura 5.41a – Zoneamento de Nitrito (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

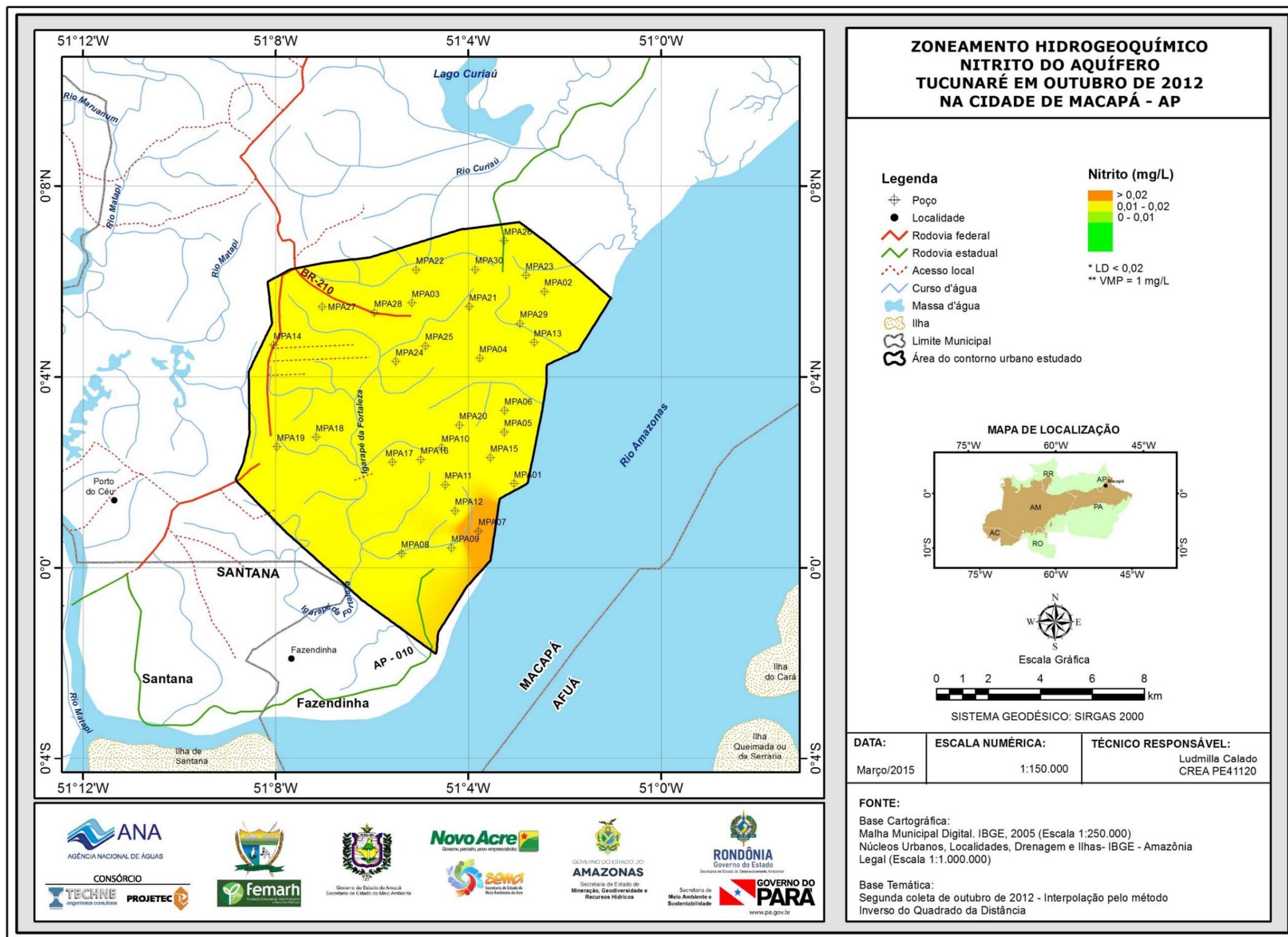


Figura 5.41b – Zoneamento de Nitrito (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.11.3 - Amônia

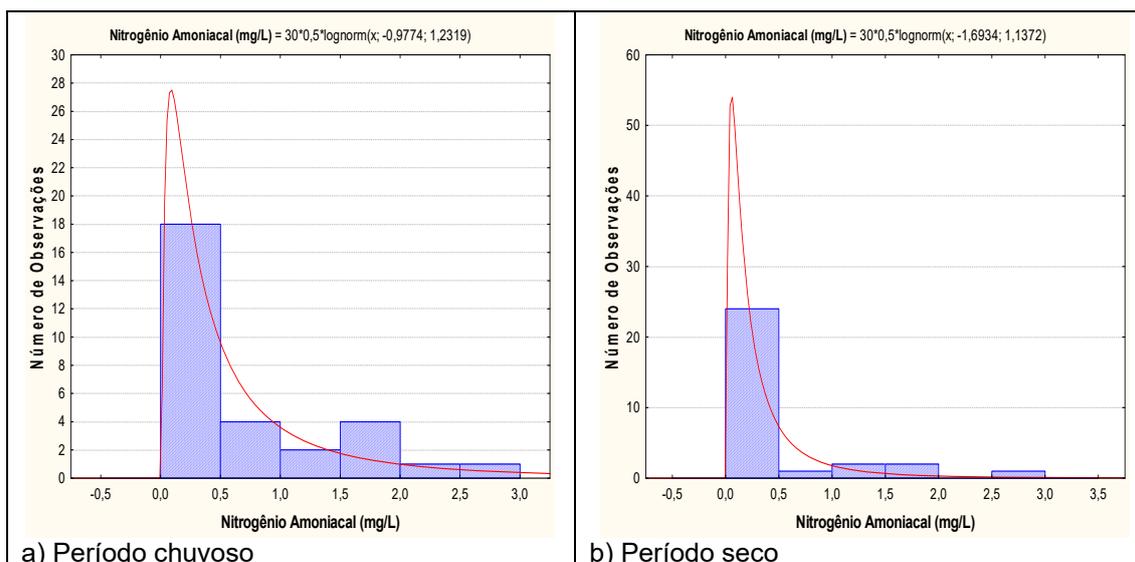
A **tabela 5.51** mostra a estatística descritiva dos teores de amônia, presentes nas águas subterrâneas, do aquífero Tucunaré, em Macapá, nas duas campanhas de coleta de água realizadas. No período chuvoso, as concentrações de amônia variam de 0,09 a 2,6 mg/L com média de 0,7 mg/L e mediana de 0,4 mg/L. No período seco, os teores ficaram compreendidos entre 0,09 a 3,0 mg/L, com média de 0,4 mg/L e mediana de 0,1 mg/L.

**Tabela 5.51** - Estatística descritiva da Amônia do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (A-1) - abril de 2012 e no período seco (A-2) - outubro de 2012.

Amônia	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
A-1	30	0,7	0,4	1,0	0,4	0,09	2,6	0,8	0,1	1,0
A-2	30	0,4	0,2	0,7	0,1	0,09	3,0	0,7	0,1	2,5

Na coleta de abril de 2012, 27% (8/30) das amostras apresentaram valores de amônia inferiores ao limite de detecção de 0,1 mg/L; enquanto que na coleta de outubro de 2012, 57% (17/30) dos poços tiveram resultados de amônia abaixo do limite de detecção. Na primeira e segunda campanha, respectivamente, 20% (6/30) e 10% (3/30) das amostras analisadas apresentaram valores de amônia que ultrapassaram o VMP recomendável pela Portaria MS 2914/2011 para consumo humano de 1,5 mg/L.

Os histogramas de frequência de amônia (**figura 5.42**), representativos dos pontos amostrados nas coletas de abril e outubro de 2012, foram modelados por uma função de distribuição de probabilidade lognormal, que permitiu estimar, com risco calculado valores de amônia nas duas campanhas, conforme apresentado na **tabela 5.52**.



**Figura 5.42** – Histograma de frequência e curva normal de distribuição de probabilidade da Amônia no Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

Assim, é possível notar que os valores de amônia no período chuvoso foram maiores quando comparados ao período seco, indicando que há alguma influência de sazonalidade, haja vista que a razão entre os dois períodos é superior a 1 (um). Isto provavelmente ocorre porque no período chuvoso as fossas sépticas localizadas próximas aos poços transbordam e se misturam com as águas superficiais associadas ao fenômeno da ressaca e inundam a região de Macapá, contaminando os mananciais próximos.

**Tabela 5.52** – Distribuição de probabilidade da Amônia no Aquífero Tucunaré no período chuvoso (A-1) - abril de 2012 e no período seco (A-2) - outubro de 2012.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
A-1	0,376	0,133	0,078	0,050	0,030	0,021
A-2	0,184	0,071	0,043	0,028	0,018	0,013
Razão	2,0	1,9	1,8	1,8	1,7	1,6

De acordo com Resende (2002), a amônia ( $\text{NH}_3$ ) originada no solo ou aplicada via fertilizantes tende a ser rapidamente convertida em amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e esse, por sua vez, é convertido em nitrato pelo processo microbiano da nitrificação.

Por esse motivo, os teores de amônia obtidos nas duas campanhas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, foram muito baixos, pois provavelmente a amônia existente proveniente dos dejetos das fossas sépticas está sendo convertida em nitrato, o que justifica alguns teores de nitrato superiores ao padrão de potabilidade permitido pela Portaria MS 2914/2011.

### ***Zoneamento da Amônia***

A distribuição espacial dos teores de amônia nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, tanto no período chuvoso (**figura 5.43a**) quanto no período de estiagem (**figura 5.43b**), é caracterizada predominantemente pelas faixas de valores de 0 a 0,1; 0,1 a 0,5 e 0,5 a 1,5 mg/L.

Em ambas as campanhas, os poços que apresentaram teores de amônia superiores aos padrões da Portaria MS 2914/2011 estão distribuídos de modo disperso na área de estudo, representada pela última faixa de valores (>1,5 mg/L).

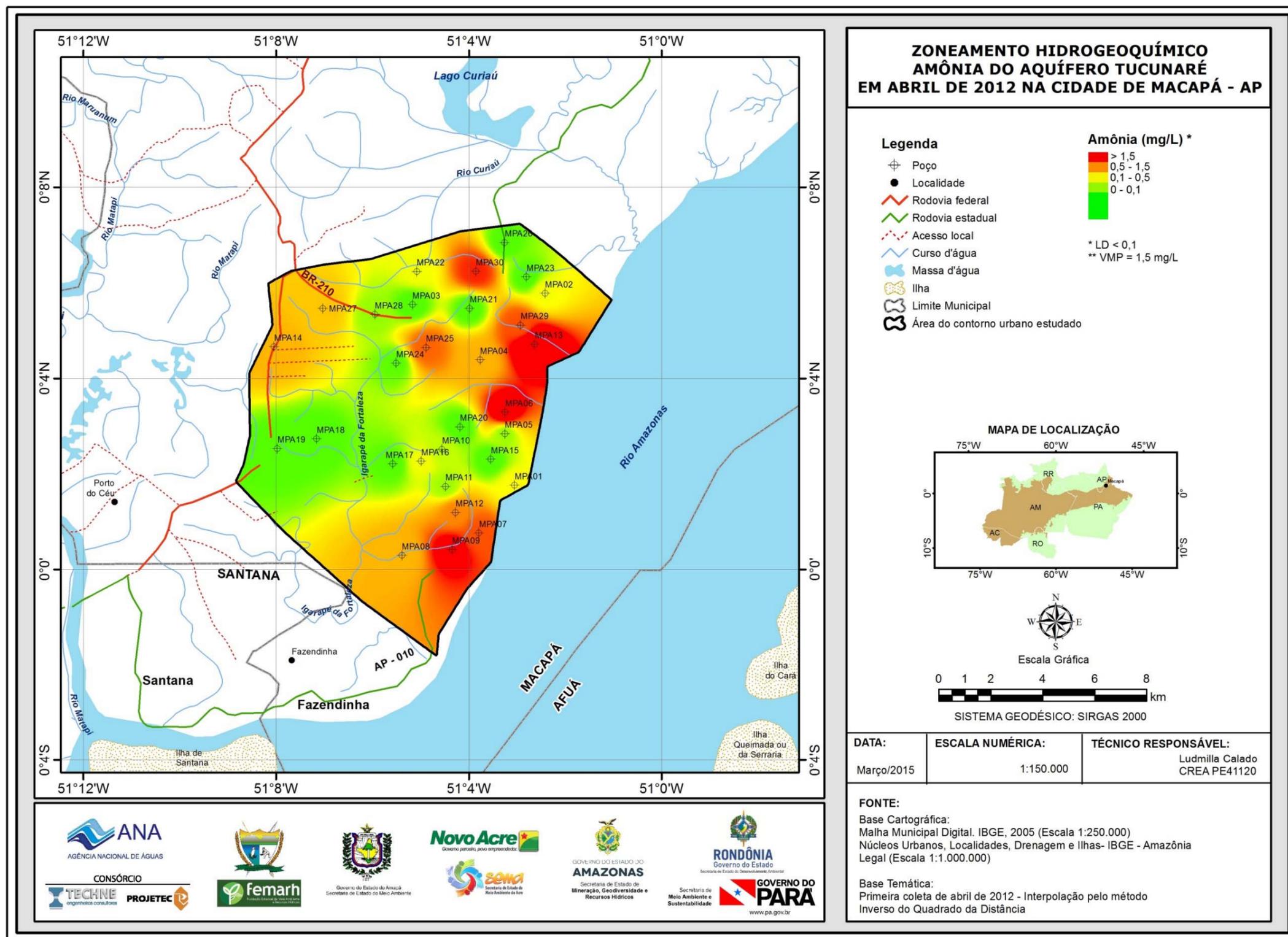


Figura 5.43a – Zoneamento da Amônia (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

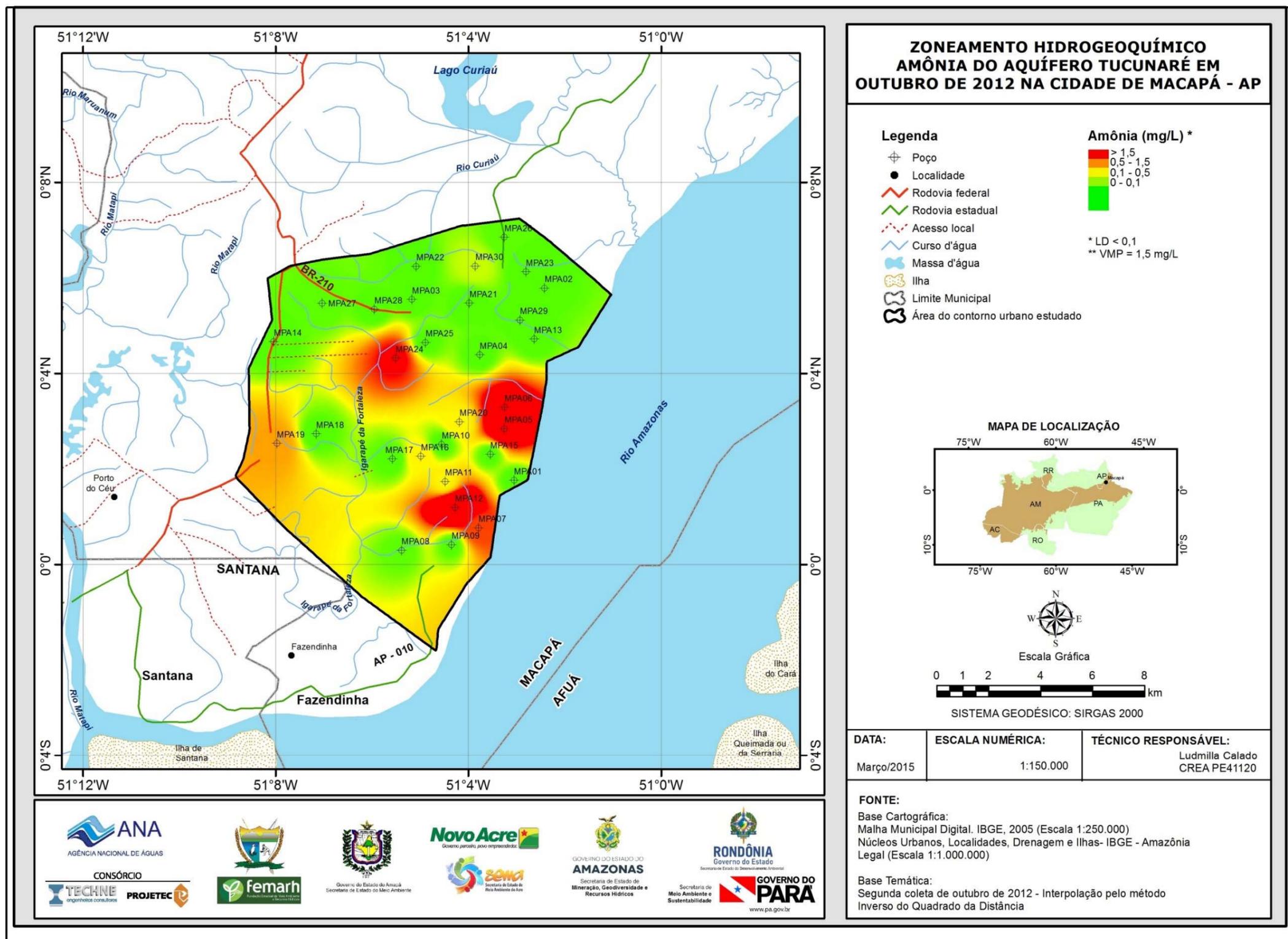


Figura 5.43b – Zoneamento da Amônia (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.12 – Ferro e Manganês

Ferro e manganês são elementos que apresentam comportamento químico muito parecido na natureza e, em virtude de afinidades geoquímicas, quase sempre ocorrem juntos.

As fontes de ferro são minerais escuros (máficos) portadores de Fe: magnetita, biotita, pirita, piroxênios e anfibólios. No estado ferroso ( $Fe^{2+}$ ) forma compostos solúveis, principalmente hidróxidos. Em ambientes oxidantes o  $Fe^{2+}$  passa a  $Fe^{3+}$  dando origem ao hidróxido férrico, que é insolúvel e se precipita, tingindo fortemente a água. Não apresentam inconveniente à saúde nas concentrações normalmente encontradas, mas águas com altas concentrações desses metais lhe conferem coloração amarelada, acarretando sabor amargo e adstringente (Parron *et al.*, 2011).

A presença do manganês se deve a óxidos e hidróxidos, tais como hornblenda e biotita. Elemento principal da rodocrosita. É detectável em pequenas quantidades na água subterrânea, concentrações acima de 1 mg/L são raras, mas valores como 0,05 mg/L terão efeito adverso na potabilidade da água (Celligoi, 1999).

O ferro e o manganês estão presentes nas formas insolúveis numa grande quantidade de solos. Na ausência de oxigênio dissolvido como, por exemplo, água subterrânea ou fundo de lagos, eles se apresentam na forma solúvel. Caso a água contendo as formas reduzidas de ferro e manganês seja exposta ao ar atmosférico, o ferro e o manganês voltam a se oxidar às suas formas insolúveis (Schwarzbach & Morandi, 2000).

A Portaria MS 2914/2011 estabeleceu limites máximos de padrão organoléptico de potabilidade para ferro e manganês, como sendo o de 0,3 mg/L e 0,1 mg/L, respectivamente.

A Resolução CONAMA 396/2008 também estabeleceu limites máximos aceitáveis para esses parâmetros, de acordo com os usos considerados preponderantes, como pode ser observado na **tabela 5.53**.

**Tabela 5.53** – Valores Máximos Permitidos (VMP) de ferro e manganês para os usos preponderantes (Resolução CONAMA 396/2008).

Parâmetro	Usos Preponderantes da Água			
	Consumo Humano ( $\mu g.L^{-1}$ )	Dessedentação Animal ( $\mu g.L^{-1}$ )	Irrigação ( $\mu g.L^{-1}$ )	Recreação ( $\mu g.L^{-1}$ )
Ferro	300	-	5.000	300
Manganês	100	50	200	100

Nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré na cidade de Macapá, foram encontrados, nas duas campanhas de amostragem realizadas no ano de 2012 no Projeto PHA, teores muito elevados de ferro. A principal razão para as altas concentrações detectadas é o intemperismo químico regional resultante da alta pluviosidade e elevadas temperaturas, que ao longo do tempo geológico causaram a decomposição das rochas com remoção de muitos dos seus elementos químicos, lixiviando os solos e deixando outros elementos como o ferro, após dissolução inicial, presente em forma solúvel ou consolidado como óxido e hidróxido.

### 5.2.12.1 - Ferro

A estatística descritiva dos teores de ferro nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá (**tabela 5.54**) mostra, no período chuvoso, valores compreendidos entre 0,005 e 9,5 mg/L, com média de 0,98 mg/L. No período seco a faixa de variação é de 0,007 a 2,5 mg/L, com média de 0,51 mg/L. A mediana é de 0,1 mg/L, em ambos os períodos de coleta.

**Tabela 5.54** – Estatística descritiva do Ferro (mg/L) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Fe-1) - abril de 2012 e no período seco (Fe-2) - outubro de 2012.

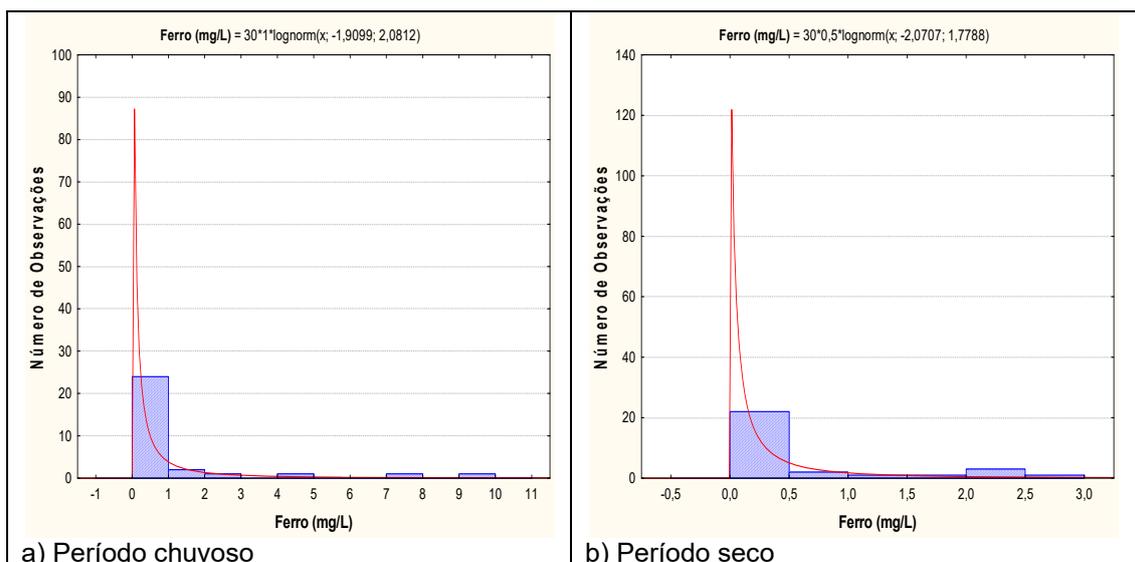
Fe	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
Fe-1	30	0,98	0,2	1,8	0,1	0,005	9,5	2,2	0,4	3,1
Fe-2	30	0,51	0,2	0,8	0,1	0,007	2,5	0,8	0,2	1,6

Dentre o total de amostras analisadas nas duas campanhas, 37% (11/30) dos poços no período chuvoso e 30% (9/30) no período de estiagem, apresentaram valores que ultrapassaram o VMP de potabilidade recomendável pela Portaria MS 2914/2011, além de não serem indicadas para consumo humano e para recreação, segundo a Resolução CONAMA 396/2008.

Além disso, 7% (2/30), dos poços amostrados na primeira campanha apresentaram teores de ferro que ultrapassaram os limites recomendados para irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Os histogramas de frequência de ferro (**figura 5.44**), representativos dos pontos amostrados nas coletas de abril e outubro de 2012, foram modelados por uma função de distribuição de probabilidade lognormal. Essa função permitiu estimar com risco calculado os valores de ferro no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá (**tabela 5.55**), onde se verificou que há influência de sazonalidade, pois a razão das duas campanhas é inferior a 1 (um), para probabilidades superiores a 80%.

No caso de Macapá os valores de ferro mais elevados na estiagem são consistentes, pois a zona de aeração, que no período chuvoso se encontra quase totalmente saturada por águas de infiltração em movimento, volta a ter espaços vazios preenchidos por oxigênio, o que, conseqüentemente, eleva o valor de Eh produzindo a oxidação do ferro.



**Figura 5.44** – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade do Ferro do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

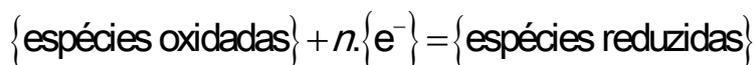
**Tabela 5.55** – Distribuição de probabilidade do Ferro (mg/L) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Fe-1) - abril de 2012 e no período seco (Fe-2) - outubro de 2012.

$P(x \geq a)$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Fe-1	0,148	0,026	0,010	0,005	0,002	0,0012
Fe-2	0,126	0,028	0,013	0,007	0,003	0,0020
Razão	1,2	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6

### **Os altos teores de ferro dissolvido na água subterrânea em Macapá**

Em primeiro lugar convém fazer uma distinção entre os “processos de intemperismo” das rochas na região amazônica, que ocorrem desde, pelo menos, do Neomioceno até o presente, e respondem pela formação de depósitos de concentração residual (por exemplo, laterita, bauxita), e os “processos redox”, graças aos quais, o alumínio e o ferro residuais do intemperismo (insolúveis em água), podem ser transportados em solução. Ou seja, os altos teores de ferro dissolvido na água subterrânea não resultam do processo de intemperismo químico das rochas, mas das condições de pH e Eh em águas ácidas reduzidas.

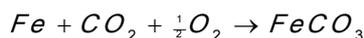
Segundo Merkel & Friedrich (2008) as equações de oxi-redução ou redox desempenham um papel importante em todas as interações presentes em sistemas aquosos. Uma reação redox é considerada como uma transferência de elétrons e obedece à seguinte reação geral:



$n$  = número de elétrons ( $e^{-}$ ).

Na Amazônia as águas superficiais são ácidas e constituem um dos principais agentes do intemperismo químico. A acidez dessas águas pode resultar da oxidação de sulfetos (pirita), gerando  $H_2SO_4$  (ácido sulfúrico); da dissolução do dióxido de carbono da atmosfera, formando  $H_2CO_3$  (ácido carbônico) diluído; da presença de ácidos húmicos gerados por processos biológicos de degradação da matéria orgânica nos solos.

O ferro aparece principalmente em águas subterrâneas devido à dissolução do minério (resíduo do intemperismo das rochas) pelo gás carbônico da água, conforme a equação:



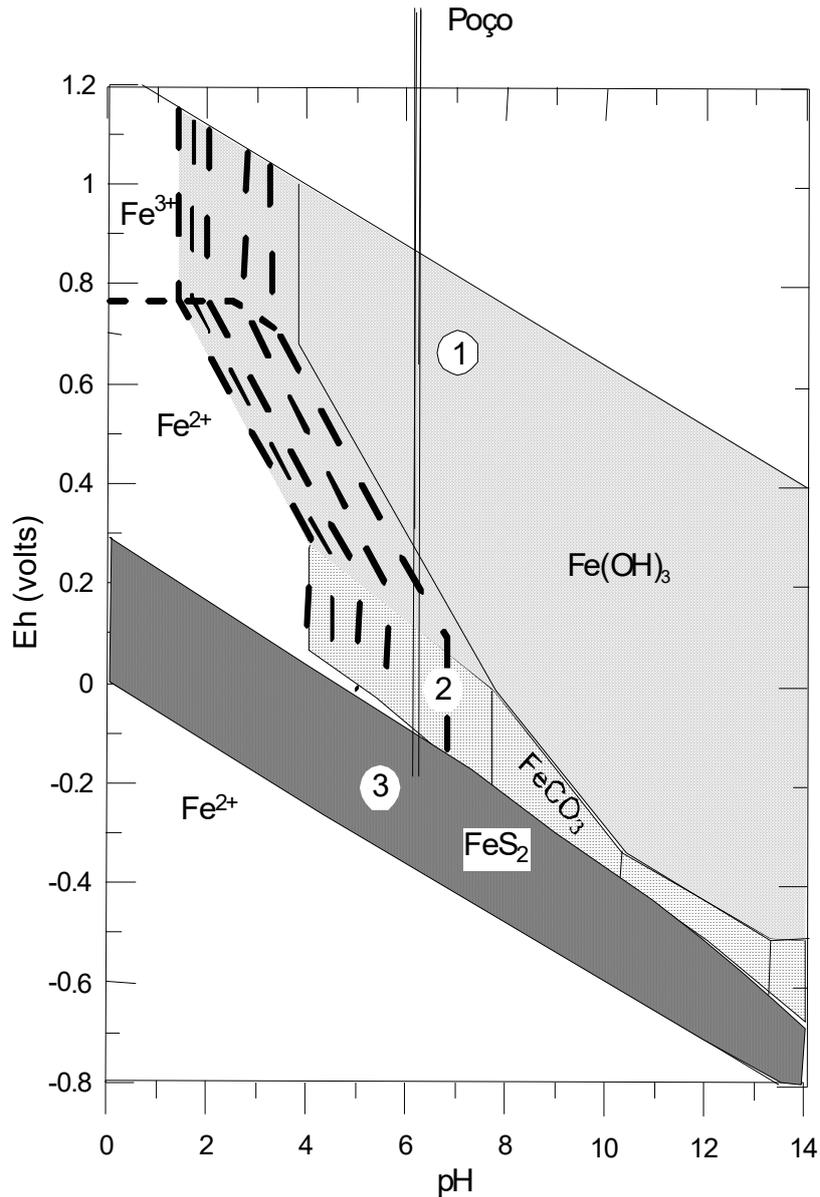
O carbonato ferroso é solúvel e frequentemente encontrado em águas de poços contendo elevados níveis de concentração (CETESB, 2009).

Portanto, a explicação para os elevados teores de ferro dissolvido nas águas subterrâneas em Macapá é que eles resultam de reações de oxidação-redução, como fica demonstrado pela modelagem do equilíbrio do ferro nas águas subterrâneas (Snoeyink & Jenkins, 1980), através de um diagrama pH-Eh incluindo a interação de espécies do ferro com sulfeto e bicarbonato. Esse diagrama também é chamado de diagrama de estabilidade ou diagrama de espécies predominantes para cada sistema redox.

A solubilidade do ferro em relação a pH e Eh a 25°C e 1 atm é ilustrada no diagrama da **figura 5.45**, segundo Hem (1960). A figura foi desenhada para uma concentração molar especificada de carbono inorgânico total ( $C_{T,CO_3} = 10^{-3} M$ ) e um teor de enxofre inorgânico total ( $C_{T,S} = 10^{-4} M$ ). Notar que a região do hidróxido ferroso ( $Fe(OH)_2$ ) foi reduzida de tamanho pelas espécies  $FeS_2$  (dissulfeto de ferro) e  $FeCO_3$  (carbonato ferroso). Outra feição desse particular diagrama é a apresentação de diversos limites entre fases sólidas e em solução, cada uma representando uma concentração diferente de ferro permissível. Esses limites variam de 10 M (570 g de Fe/litro) a  $10^{-5} M$  (0,57 mg de Fe/litro).

Para um dado pH constante, o diagrama revela uma região superior de  $Fe(OH)_3$  (hidróxido férrico), uma região intermediária de  $FeCO_3$  (carbonato ferroso) e uma região inferior de  $FeS_2$  (dissulfeto de ferro).

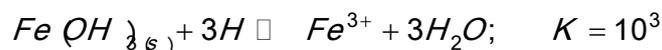
Esse diagrama e suas regiões pode ser visualizado, ao longo da vertical, como um “poço virtual” tendo 3 (três) entradas de água, indicadas como 1, 2 e 3 (**figura 5.45**).



**Figura 5.45** – Diagrama pH-Eh ilustrando a solubilidade do ferro em relação a pH, em 3 (três) zonas, para  $C_{T,S} = 10^{-4} M$ ;  $C_{T,CO_3} = 10^{-3} M$ , segundo Hem (1960). Adaptado de Snoeyink & Jenkins (1980).

### Região Superior

A primeira entrada seria equivalente à de um poço raso que tivesse a sua fonte de água na zona de aeração ou insaturada. Nessa zona, o ferro está quase em equilíbrio com o oxigênio da atmosfera e o seu teor na água é governado pela reação da mesma com o óxido de ferro sólido,  $Fe(OH)_3(s)$ . O teor de ferro na água é, portanto, governado pelo equilíbrio:



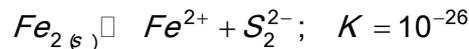
A equação para o teor de ferro (mol/L) em função do pH é dada por:

$$\log[Fe^{3+}] = 4 - 3pH$$

Logo, nessa região, para um pH de 5, a concentração de ferro em equilíbrio na solução será de apenas  $10^{-11} M$  (0,0057  $\mu g$  de  $Fe^{3+}/L$ ). Aí as águas têm baixo pH porque elas se encontram na zona biologicamente ativa do solo, onde existe uma considerável produção de  $CO_2$ .

### **Região Inferior**

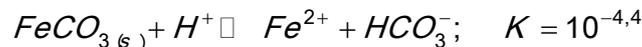
A terceira entrada seria para um poço profundo que capta água que está em equilíbrio com o mineral pirita  $FeS_{2(s)}$ . Nessa zona aquífera o ferro se encontra na forma de ferroso e o enxofre na forma de sulfeto, precipitando dissulfeto de ferro. O teor de ferro da água do poço seria controlado pela reação:



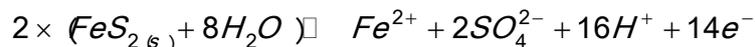
Essa reação, caso o  $S_2^{2-}$  seja a única espécie, produzirá um teor de ferro em solução inferior a 1  $\mu g$  de  $Fe^{2+}/L$ . Ou seja, águas desse tipo apresentam baixo teor de ferro e de sulfato.

### **Região Intermediária**

A segunda entrada de água do poço se encontra numa zona intermediária entre as regiões do óxido de ferro III e do dissulfeto de ferro. Essa zona é a do carbonato ferroso ( $FeCO_{3(s)}$ ) e o mineral que controla a concentração de ferro dissolvido é geralmente o mineral siderita.



As águas nessa região apresentam altos teores de ferro dissolvido em comparação com as duas outras zonas para um dado pH. Além disso, nessa zona ocorre um aumento na concentração de sulfato na água do poço porque a formação dessa região pode ser tratada como uma oxidação do sulfeto de ferro ( $FeS_{2(s)}$ ) para sulfato ferroso.



No que concerne à qualidade da água, essa modelagem traz importante contribuição para o projeto e construção de poços. Por exemplo, a água de poços na zona de  $Fe(OH)_3$  apresenta altos teores de  $CO_2$  e baixos valores de pH, sendo potencialmente corrosiva. Em poços perfurados que penetram na zona de  $FeS_{2(s)}$  o revestimento deve se estender até abaixo da mesma, para evitar o contato com o oxigênio. Além disso, o próprio revestimento nessa zona deve ser cimentado para evitar a corrosão.

### **Zoneamento do Ferro**

O teor de ferro nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré na cidade de Macapá, no período chuvoso (abril de 2012) e no período de estiagem (outubro de 2012), mostrado respectivamente pela **figura 5.46a** e **figura 5.46b**, se distribui em 3 (três) classes, sendo predominante a última faixa, com valores superiores a 0,3 mg/L, ou seja, que ultrapassam o VMP recomendado pela Portaria MS 2914/2011. Secundariamente, estão as outras duas faixas, de 0 a 0,1 mg/L e de 0,1 a 0,3 mg/L, representados por manchas pontuais distribuídas ao longo da área de estudo.

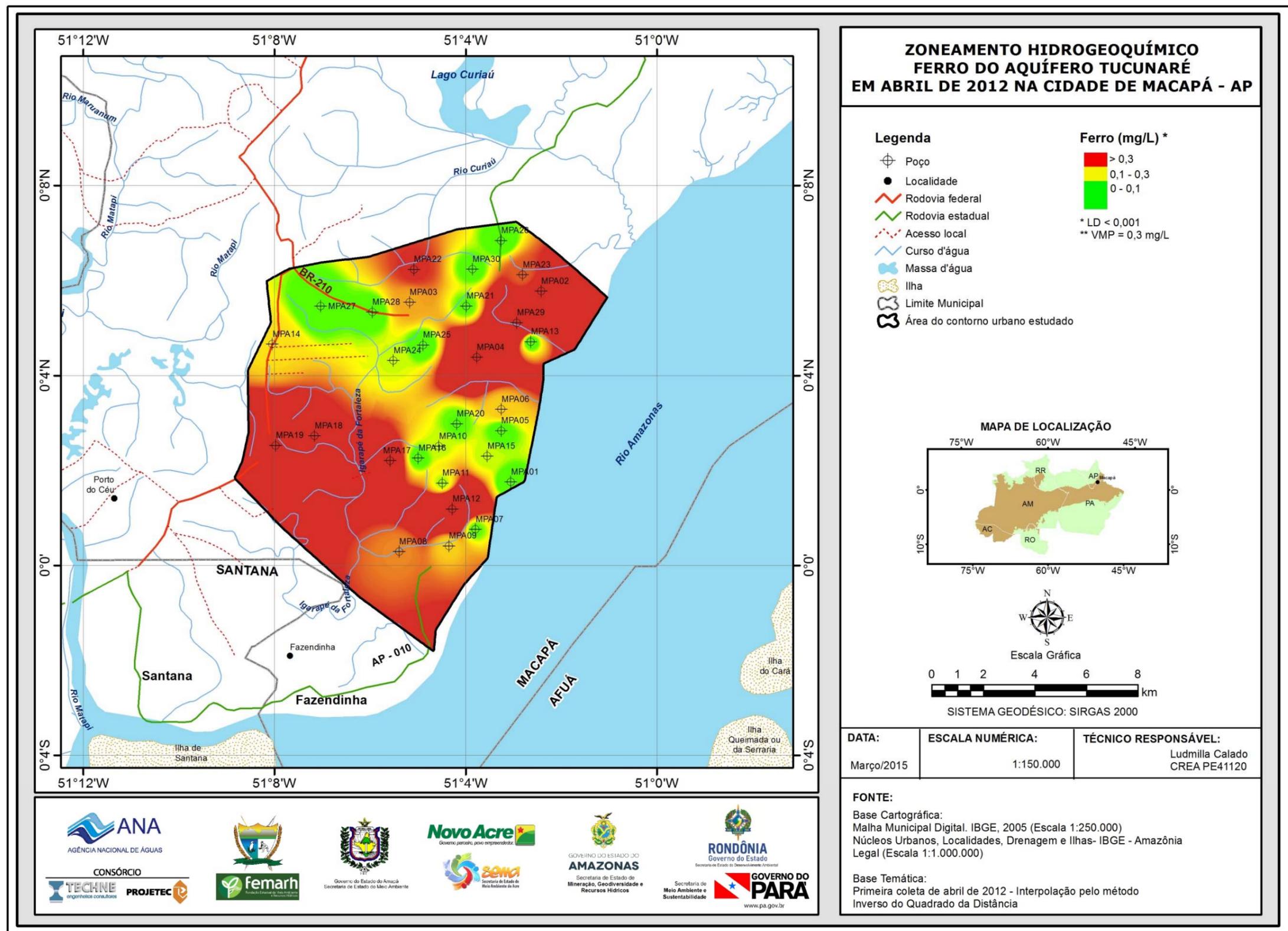


Figura 5.46a – Zoneamento de Ferro (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

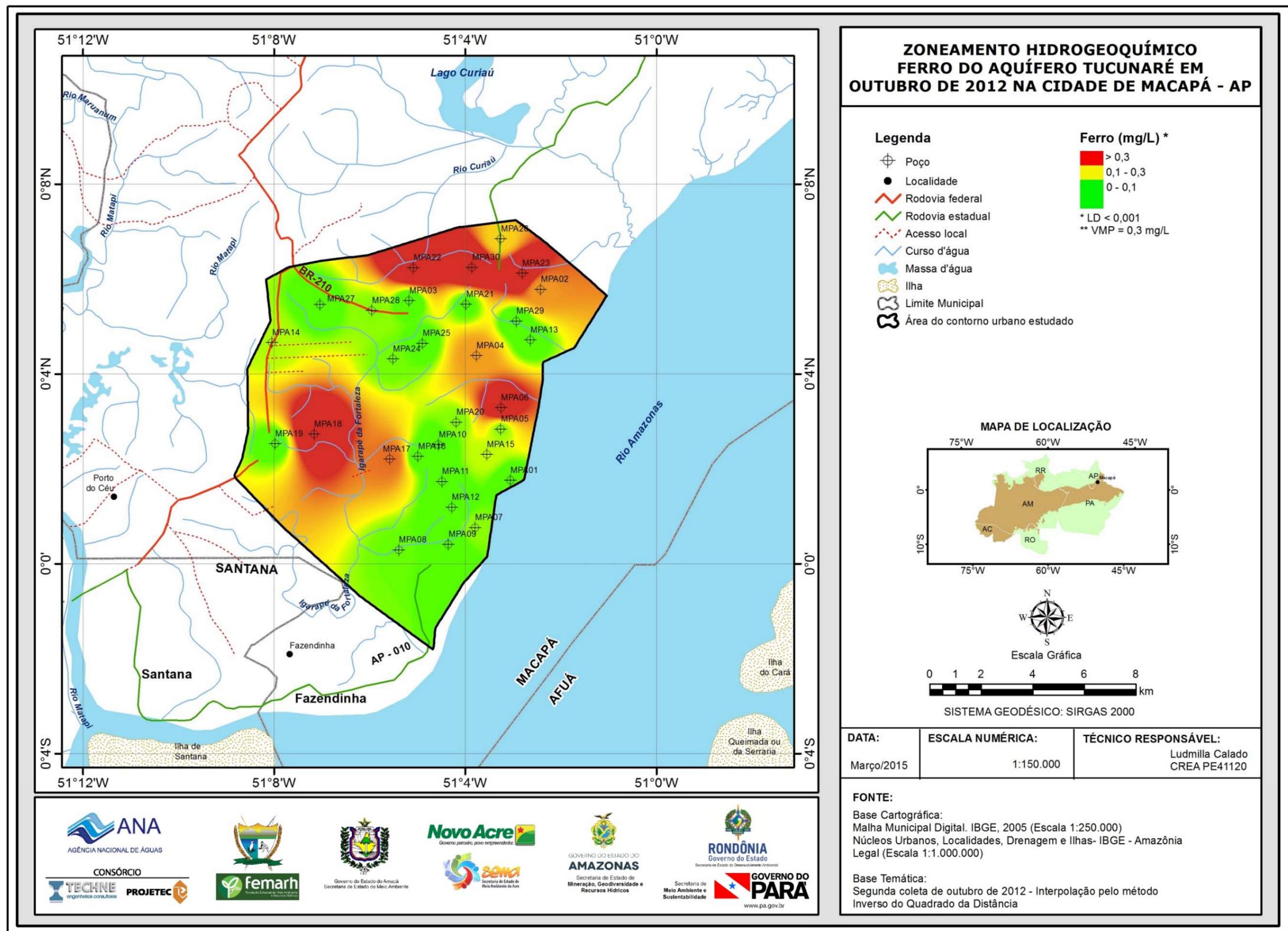


Figura 5.46b – Zoneamento de Ferro (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.12.2 - Manganês

A estatística descritiva das concentrações de manganês nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá (**tabela 5.56**) revela que os teores de manganês no período chuvoso variam de 0,00009 a 0,08 mg/L, com média de 0,008 mg/L. No período seco, os valores ficam entre um mínimo de 0,0009 e um máximo de 0,06 mg/L, sendo a média igual a 0,006 mg/L.

**Tabela 5.56** – Estatística descritiva do Manganês (mg/L) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Mn-1) - abril de 2012 e no período seco (Mn-2) - outubro de 2012.

Mn	N	Média	Confiança 95%		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro padrão	Assimetria
Mn-1	30	0,008	0,000	0,010	0,003	0,00009	0,08	0,016	0,003	4,031
Mn-2	30	0,006	0,000	0,000	0,003	0,0009	0,06	0,012	0,002	4,016

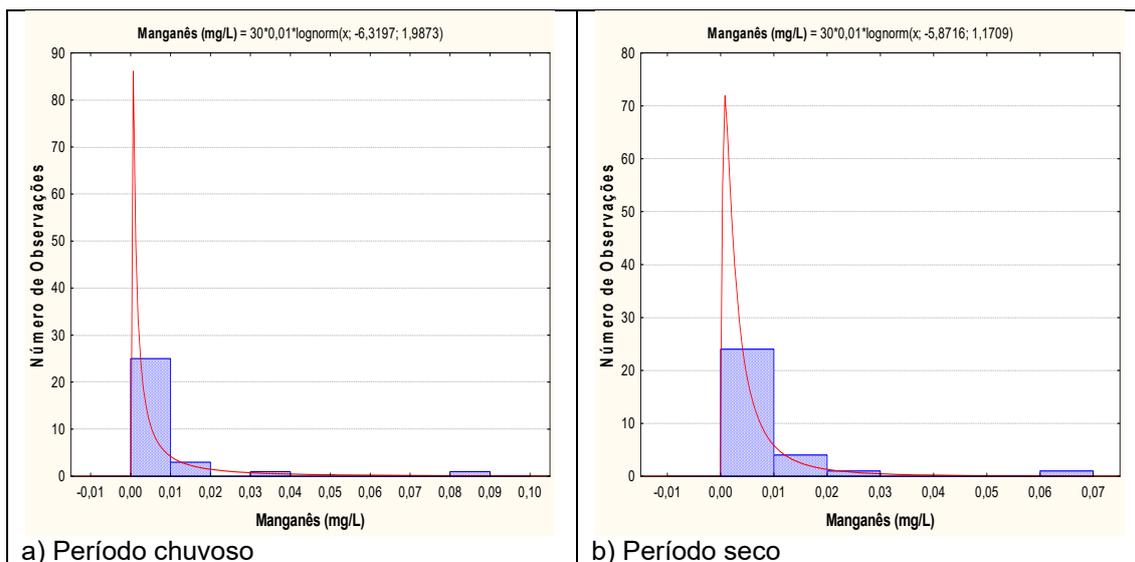
Na primeira campanha, 23% (7/30) das amostras apresentaram teores de manganês abaixo do limite de detecção de 0,0001 mg/L; enquanto que na segunda campanha, 33% (10/30) dos poços obtiveram valores abaixo do limite quantificável de 0,001 mg/L.

Em ambas as campanhas, observou-se que nenhum dos poços apresentou teores de manganês acima do VMP de 0,1 mg/L estabelecido pela Portaria MS 2914/2011, bem como, ultrapassou os limites previstos na Resolução CONAMA 396/2008, no que se refere aos usos da água para consumo humano, irrigação e recreação.

Além disso, 3% (1/30) dos poços amostrados, no período chuvoso, e 3% (1/30) dos poços, no período de estiagem apresentaram teores de manganês que ultrapassaram os limites recomendados para dessedentação animal, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008.

Os histogramas de frequência de manganês (**figura 5.47**), representativos dos pontos amostrados nas coletas de abril e outubro de 2012, foram modelados por uma função de distribuição de probabilidade lognormal. Essa função permitiu estimar com risco calculado, os valores de manganês, no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá (**tabela 5.57**), onde se verificou que os valores do período seco são maiores do que os do período chuvoso, o que reflete alguma influência de sazonalidade, pois a razão das duas campanhas é inferior a 1 (um).

Isso é justificável, pois a maior presença de oxigênio na zona não saturada no período de estiagem dá lugar a oxidações do manganês, aumentando a sua concentração na zona saturada.



**Figura 5.47** – Histogramas de frequência e curvas lognormais de distribuição de probabilidade do Manganês do Aquífero Tucunaré, no período chuvoso – abril de 2012 e no período seco – outubro de 2012.

De acordo com Feitosa *et al.* (2008), o manganês, frequentemente está presente com baixos teores, <0,2 mg/L em quase todas as águas naturais, sendo mais abundante nas águas ácidas. Isso corrobora, com os dados do aquífero Tucunaré, onde no período de estiagem, as águas são mais ácidas, com pH médio de 5,1, e conseqüentemente ocorrem teores mais elevados de manganês quando comparados ao período chuvoso.

**Tabela 5.57** – Distribuição de probabilidade do Manganês (mg/L) do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (Mn-1) - abril de 2012 e no período seco (Mn-2) - outubro de 2012.

P(x≥a)	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Mn-1	0,00180	0,00034	0,00014	0,00007	0,00003	0,00002
Mn-2	0,00308	0,00115	0,00069	0,00045	0,00028	0,00020
Razão	0,6	0,3	0,2	0,15	0,1	0,1

### **Zoneamento do Manganês**

A distribuição espacial do teor de manganês nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, no período chuvoso (abril de 2012), apresentada na **figura 5.48a**, apresenta de forma predominante valores na faixa de 0 a 0,001 mg/L. No período seco (outubro de 2012), os teores de manganês distribuídos na faixas de 0 a 0,001 e 0,005 a 0,02 mg/L são predominantes, como também pode ser observado na **figura 5.48b**. Em ambas as campanhas, os valores acima de 0,02 mg/L estão distribuídos em zonas isoladas representadas por alguns poços.

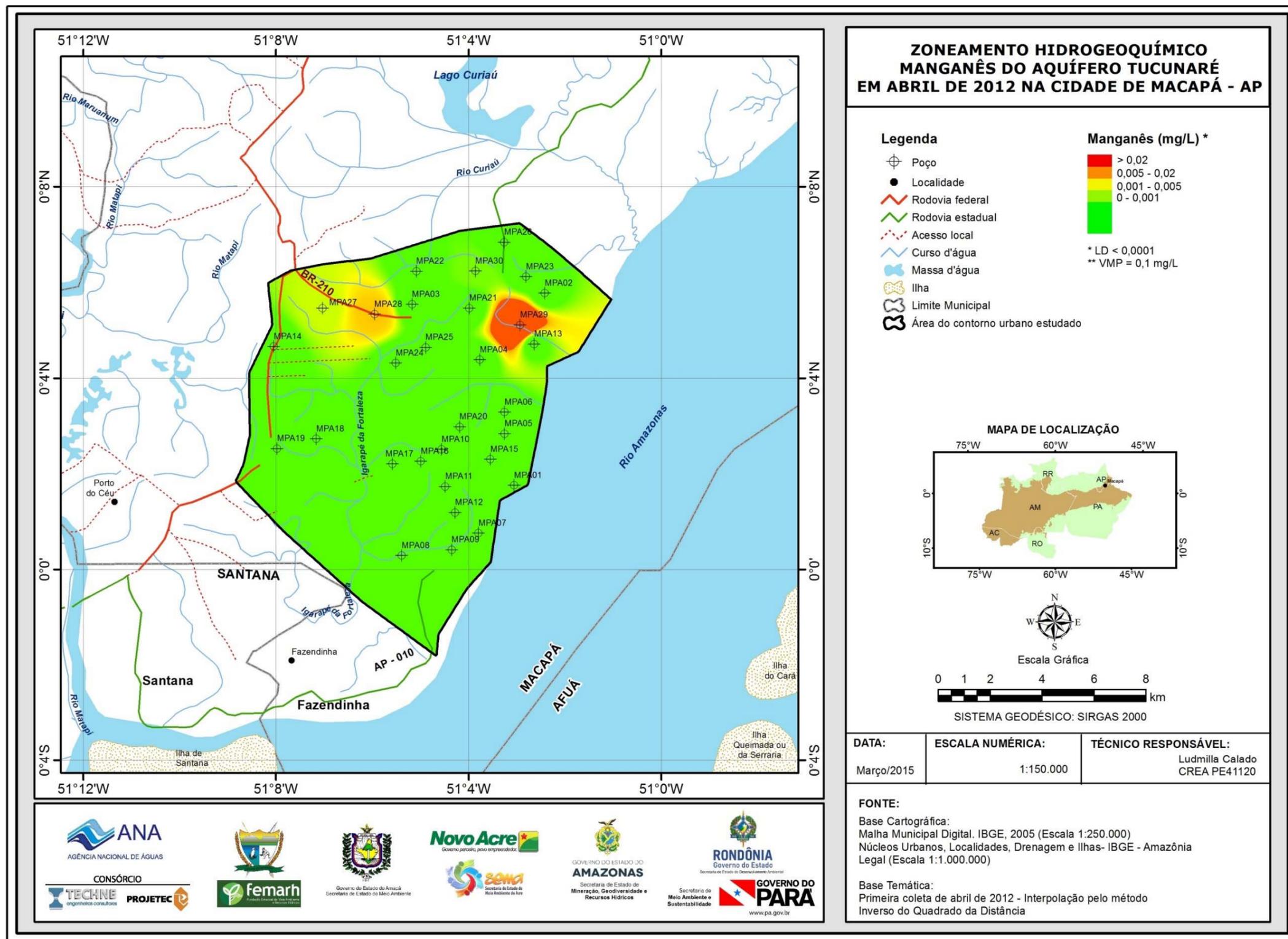


Figura 5.48a – Zoneamento de Manganês (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012), na cidade de Macapá – AP.

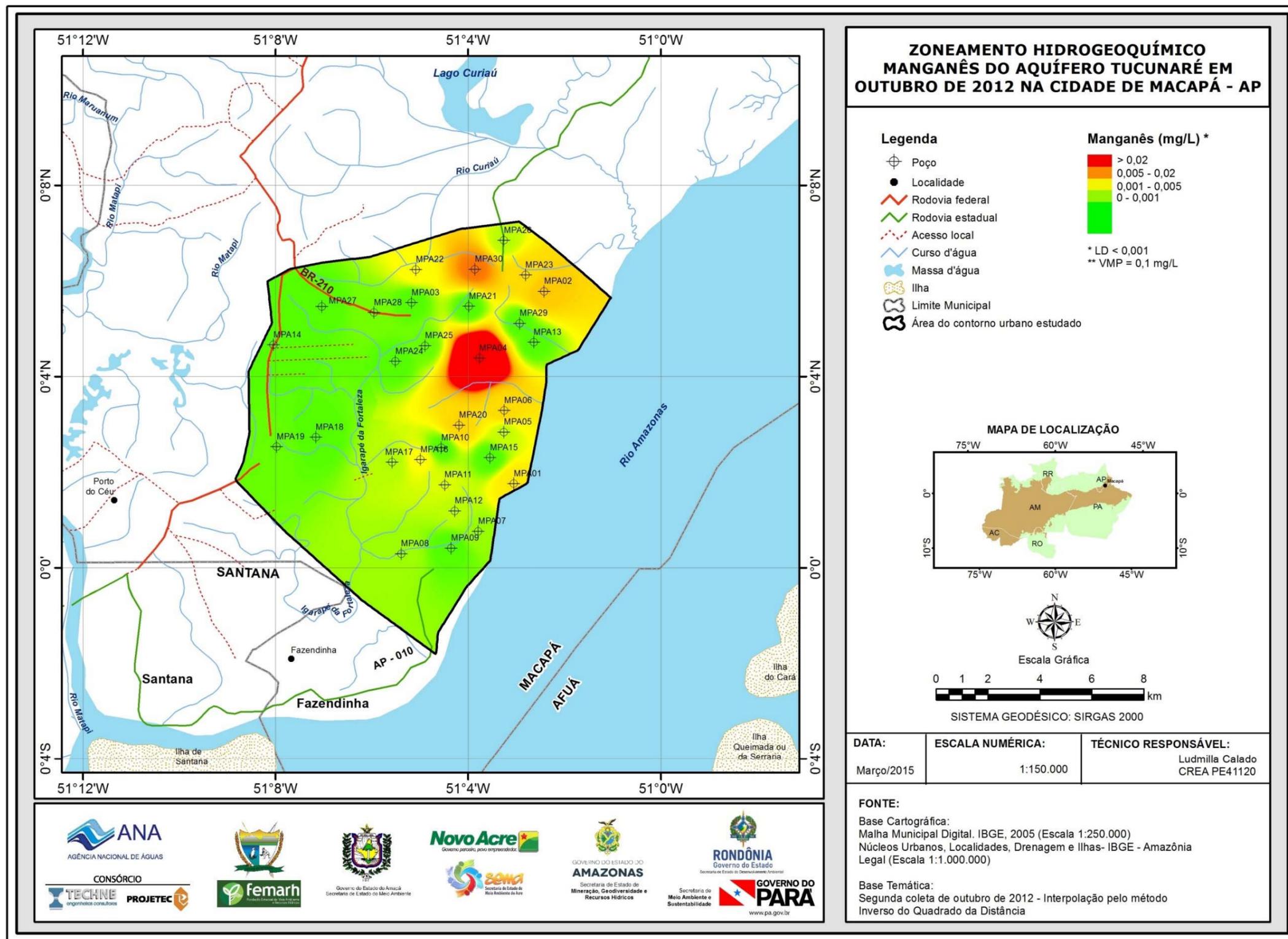


Figura 5.48b – Zoneamento de Manganês (mg/L) nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro/12), na cidade de Macapá – AP.

### 5.2.13 – Metais Pesados

Os resultados analíticos de metais pesados, das amostras de água do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, coletadas durante a segunda campanha de amostragem realizada em outubro de 2012, podem ser observados no **anexo 7.3.3**. Os metais pesados analisados foram: Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Mercúrio, Níquel e Zinco. Como esses parâmetros apresentam risco à saúde humana, a Portaria MS 2914/2011, estabeleceu limites máximos de padrão de potabilidade (**tabela 5.58**).

**Tabela 5.58** - Valores Máximos Permitidos (VMP) de Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Mercúrio, Níquel e Zinco, segundo a Portaria MS 2914/2011.

Parâmetro	VMP (mg/L)
Arsênio	0,01
Bário	0,7
Cádmio	0,005
Chumbo	0,01
Cobre	2,0
Cromo	0,05
Mercúrio	0,001
Níquel	0,07
Zinco	5,0

A Resolução CONAMA 396/2008, também estabeleceu limites máximos aceitáveis para esses parâmetros, de acordo com os usos considerados preponderantes, como pode ser observado na **tabela 5.59**.

**Tabela 5.59** - Valores Máximos Permitidos (VMP) de Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Mercúrio, Níquel e Zinco, para os usos preponderantes (Resolução CONAMA 396/2008).

Parâmetro	Usos Preponderantes da Água			
	Consumo Humano ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	Dessedentação Animal ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	Irrigação ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	Recreação ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )
Arsênio	10	200	-	50
Bário	700	-	-	1000
Cádmio	5	50	10	5
Chumbo	10	100	5000	50
Cobre	2000	500	200	1000
Cromo	50	1000	100	50
Mercúrio	1	10	2	1
Níquel	20	1000	200	100
Zinco	5000	24000	2000	5000

### Arsênio

Presente na matéria orgânica, em quase todos os sulfetos metálicos e encontra-se ainda dissolvido nas águas naturais. Ocorre na natureza em quantidades reduzidas, aproximadamente 0,00005%. As fontes naturais de arsênio são principalmente, as jazidas de metais, onde o elemento se encontra na forma de arsenita ( $\text{AsO}_4^{-3}$ ). Nas águas subterrâneas, as concentrações de

arsênio são comumente abaixo de 0,1 mg/L, porém, em águas de poços petrolíferos e em águas minerais, ocorrem concentrações de até 4 mg/L. O arsênio é muito perigoso à saúde pública, basta uma pequena ingestão de 100 mg para envenenar seriamente o organismo humano. Por ser carcinógeno o seu limite de aceitação é de 0,01 mg/L (Feitosa *et al.*, 2008).

Todos os 10 (dez) poços amostrados no aquífero Tucunaré, na segunda campanha realizada em outubro de 2012, apresentaram valores de arsênio abaixo do limite de detecção, ou seja, resultados <0,001 mg/L.

### **Bário**

O bário metálico é um elemento químico tóxico que pode ser encontrado no mineral barita e todos os seus compostos que são solúveis em água são venenosos. A barita é muito usada em fluidos para a perfuração de poços de petróleo. Dentre as 10 (dez) análises de amostras de água do aquífero Tucunaré em Macapá, apenas 1 (uma) apresentou teor de bário abaixo do limite de detecção de 0,001mg/L. Tendo sido detectada a presença de bário em 90% (9/10) dos poços. Os teores encontrados variaram de 0,0026 a 0,034 mg/L. Nenhuma das amostras analisadas ultrapassou o limite organoléptico de potabilidade estabelecido pela Portaria MS 2914/2011 (**tabela 5.58**), bem como, poderia ser indicada para consumo humano e recreação segundo os padrões definidos na resolução CONAMA 396/2008 (**tabela 5.59**).

### **Cádmio**

Metal relativamente raro na natureza, encontrado principalmente nos minerais de zinco, tais como, blenda, calamina, smithsonita e hidrozincita, em porcentagens que variam de 0,1 a 0,3%. Nas águas subterrâneas exibe teores inferiores a 20 mg/L. É muito tóxico para a saúde do homem, tendo ação cumulativa sobre o organismo humano. Seu excesso pode provocar hipertensão arterial, anemia, retardamento de crescimento e morte (Feitosa *et al.*, 2008). No período de estiagem (outubro de 2012), as 10 (dez) análises realizadas no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá apresentaram teores de cádmio abaixo dos limites de detecção de 0,001 mg/L.

### **Chumbo**

Metal encontrado em pequenas quantidades na natureza sendo a sua principal fonte o mineral galena (sulfeto de chumbo). A maioria do chumbo que ingressa diariamente no organismo humano tem origem em alimentos, sujeiras e poeira contendo o metal. As águas subterrâneas tem quantidades médias em torno de 20 mg/L. Altos teores de chumbo podem provocar intoxicação, podendo ocasionar até danos cerebrais ou levar a morte em casos extremos (Feitosa *et al.*, 2008). Do total de amostras analisadas na segunda campanha, 80% (8/10) apresentaram teores de chumbo inferiores ao limite de detecção de 0,001 mg/L. Os demais poços revelaram valores de chumbo que variaram de 0,004 a 0,02 mg/L. Apenas o poço MPA14 ultrapassou o limite de potabilidade da

Portaria MS 2914/2011 (**tabela 5.58**), não sendo as suas águas recomendadas para consumo humano, segundo a Resolução CONAMA 396/2008 (**tabela 5.59**). Os poços restantes apresentaram teores de chumbo abaixo dos padrões definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008, o que indica que as águas podem ser usadas para todos os usos nela prescritos.

### **Cobre**

Os principais minerais de cobre são calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), calcosita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelita ( $\text{CuS}$ ), malaquita ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ) e azurita ( $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ). O cobre tem baixa solubilidade e elevada persistência na água. Ocorre nas águas subterrâneas com teores inferiores a 1 mg/L, contudo em águas que percolam jazidas de cobre ocorrem em maiores concentrações. Quase todo o cobre ingerido pelo homem é eliminado, no entanto, altas concentrações podem provocar hemocromatose (Feitosa *et al.*, 2008). As análises de metais pesados realizadas nas águas subterrâneas, do aquífero Tucunaré, em Macapá, indicaram que 60% (6/10) das amostras apresentaram teores de cobre abaixo do limite de detecção de 0,001 mg/L, enquanto que os 40% (4/10) restantes obtiveram resultados de cobre que variaram de 0,0012 a 0,2342 mg/L. O poço MPA14 foi o único que ultrapassou o limite estabelecido pela Resolução CONAMA, não sendo suas águas recomendadas para irrigação. Os teores encontrados nos demais poços estão abaixo do VMP estabelecido pela Portaria MS 2914/2011 (**tabela 5.58**), assim como, dentro dos padrões definidos pela Resolução CONAMA 396/2008 (**tabela 5.59**), indicando que as águas podem ser usadas para consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação.

### **Cromo**

Metal relativamente raro na crosta terrestre, aproximadamente 0,03%. Não é encontrado no estado livre, ocorrendo geralmente associado ao ferro e ao chumbo. Entre os minerais de cromo destacam-se a cromita ( $\text{FeOCr}_2\text{O}_3$ ) e a crocoíta ( $\text{PbCrO}_4$ ). Entre os vários estados de oxidação, o  $\text{Cr}^{3+}$  e o  $\text{Cr}^{6+}$  são estáveis em água. O cromo é relativamente bem distribuído, mas com baixa solubilidade. Os níveis em água são geralmente baixos, inferiores a 1 mg/L. Entretanto, existem exemplos de contaminação de água por cromatos e dicromatos, superiores a 25 mg/L (Celligoi, 1999; Feitosa *et al.*, 2008).

Na segunda campanha, realizada em outubro de 2012, as 10 (dez) amostras analisadas apresentaram teores de cromo abaixo do limite de detecção de 0,001 mg/L.

### **Mercúrio**

Único metal líquido, volátil em pequena intensidade, seus vapores são extremamente tóxicos, podendo causar cansaço, dificuldade de concentração e perda de memória. O mais importante composto de mercúrio é o sulfeto mercúrico (HgS). Os estados de oxidação que o mercúrio pode assumir são  $Hg^{+1}$  e  $Hg^{+2}$ . Apesar da toxicidade dos sais de mercúrio, o cloreto mercurioso ( $Hg_2Cl_2$ ), conhecido como calomelano, encontra aplicação na medicina como estimulante de órgãos de secreção (Feitosa *et al.*, 2008). Todas as 10 (dez) amostras analisadas na segunda campanha, do aquífero Tucunaré apresentaram teores de mercúrio abaixo do limite de detecção de 0,0001 mg/L.

### **Níquel**

O níquel é um metal prateado, razoavelmente duro, dúctil e maleável. Apresenta um fraco brilho amarelado devido, em parte, à existência de uma camada protetora de óxido. Forma compostos inorgânicos solúveis, como os hidróxidos, sulfatos, cloretos e nitratos, e insolúveis, como os óxidos e sulfetos. Também pode formar carbonila de níquel, um composto orgânico volátil e incolor. O níquel possui diferentes estados de oxidação e o mais frequente é o  $Ni^{2+}$ , que tem a capacidade de formar vários complexos. O níquel está presente no solo, água, ar e biosfera em concentrações traço. O níquel emitido no ambiente por fontes naturais ou antropogênicas circula por todos os compartimentos ambientais por meio de processos químicos e físicos, além de ser biologicamente transportado por organismos vivos (CETESB, 2012).

As análises de metais pesados realizadas nas águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, em Macapá, indicaram que 70% (7/10) das amostras apresentaram teores de níquel abaixo do limite de detecção de 0,001 mg/L, enquanto que os 30% (3/10) restantes obtiveram resultados de níquel que variaram de 0,005 a 0,07 mg/L. Todas as amostras analisadas apresentaram valores de níquel dentro dos padrões de potabilidade definido pela Portaria MS 2914/2011 (**tabela 5.58**). Com relação à indicação dos usos, 90% (9/10) das amostras indicam que as águas do aquífero Tucunaré poderiam servir para o consumo humano, dessedentação animal, irrigação e recreação, conforme os padrões da Resolução CONAMA 396/2008. A água do poço MPA28 não seria indicada para o consumo humano, haja vista que superou o limite estabelecido pela Resolução citada (**tabela 5.59**).

### **Zinco**

Metal brilhante encontrado na crosta terrestre e que pode se combinar com outros elementos formando compostos de zinco. O zinco e seus compostos têm muitos usos na indústria automobilística, de construção civil e de eletrodomésticos. É usado na fabricação de ligas resistentes à corrosão e na galvanização de produtos de ferro e aço. Os principais compostos de zinco são os óxidos ( $ZnO$ ), utilizados nas indústrias de cerâmica, borracha e tintas; o

sulfato de zinco ( $ZnSO_4$ ) com aplicação na indústria têxtil e no enriquecimento de solos pobres em zinco; e o cloreto de zinco ( $ZnCl_2$ ) usado para preservar madeiras e em pilhas secas e tintas. A principal emissão natural de zinco é por erosão. As fontes antropogênicas são mineração, produção de zinco, produção de ferro e aço, corrosão de estruturas galvanizadas, combustão de carvão e outros combustíveis, eliminação e incineração de resíduos e uso de fertilizantes e agrotóxicos contendo zinco. A concentração de zinco em água superficial geralmente é menor que 10  $\mu g/L$ , na água do mar está entre 0,002 e 0,1  $\mu g/L$  e na água subterrânea de 10 a 40  $\mu g/L$  (CETESB, 2012).

No aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá foi detectada a presença de zinco, com teores que ficaram compreendidos entre 0,011 e 0,22 mg/L. Apesar das 10 (dez) amostras apresentarem presença de zinco, todas estavam com valores abaixo do VMP de potabilidade definido pela Portaria MS 2914/2011 (**tabela 5.58**), bem como, dentro dos limites da Resolução CONAMA 396/2008 (**tabela 5.59**), indicando que as águas do aquífero Tucunaré poderiam ser utilizadas para todos os usos nela prescritos sem restrições.

### **Conclusão**

Os resultados das análises de metais pesados que apresentaram teores de chumbo, cobre e níquel acima dos padrões estabelecidos pela Portaria MS 2914/2011 e/ou Resolução CONAMA 396/2008, se devem provavelmente a contaminação oriunda de atividades antrópicas, principalmente descarte inadequado de resíduos sólidos.

Na área da propriedade em que o poço MPA14 está inserido há descarte de resíduos sólidos no solo de forma inapropriada (**foto 5.3**), o que provavelmente contribuiu para os teores de chumbo e cobre elevados em suas águas, haja vista que o lixo doméstico pode conter pilhas, baterias de eletrônicos, embalagens laminadas e latas de embutidos.



**Foto 5.3** – Descarte de resíduos sólidos em frente à propriedade, onde está localizado o poço MPA14, na cidade de Macapá - AP.

O mesmo ocorre na área da propriedade do poço MPA28, onde está localizada uma oficina mecânica de consertos de caminhões (**foto 5.4**), onde possivelmente ocorre o descarte inadequado de peças automotivas e de baterias, as quais contêm alto teor de metais, e mediante a ação da chuva e exposição temporal, entram em processo de corrosão liberando líquido contaminante que pode infiltrar no solo e atingir o lençol freático. Por tal motivo, provavelmente as águas do poço MPA28 apresentaram valores elevados de níquel.



**Foto 5.4** – Galpão de oficina mecânica, onde está localizado o poço MPA28, na cidade de Macapá - AP.

Segundo Tenório & Espinosa (2004), a decomposição do lixo produz chorume, líquido proveniente da umidade natural dos resíduos, das águas das chuvas e da ação de microorganismos sobre a matéria orgânica. O chorume pode apresentar, dependendo do tipo de lixo e do seu estado de degradação, além de alto teor de matéria orgânica, quantidades significativas de íons metálicos capazes de comprometer o meio ambiente.

De acordo com Fortunato (2009), a procedência dos íons metálicos no lixo é variada, podendo ser de: baterias recarregáveis que liberam para o ambiente níquel ( $\text{Ni}^{2+}$ ), cádmio ( $\text{Cd}^{2+}$ ) e chumbo ( $\text{Pb}^{2+}$ ); materiais eletrônicos, que liberam íons de cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ ); latas, que contém ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ); pilhas comuns e alcalinas, que possuem mercúrio ( $\text{Hg}^{2+}$ ); solventes orgânicos que são responsáveis pela liberação de cromo ( $\text{Cr}^{3+}$  e  $\text{Cr}^{6+}$ ); latas descartáveis, utensílios domésticos e embalagens laminadas que liberam alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ).

## 5.2.14 – BTEX e Fenóis

### 5.2.14.1 - BTEX

O grupo de compostos BTEX formado pelo **B**enzeno, **T**olueno, **E**tilbenzeno e **X**ilenos (orto, meta e para) são extremamente tóxicos à saúde humana, apresentando toxicidade crônica mesmo em pequenas concentrações, podendo levar a lesões do sistema nervoso central. O benzeno é reconhecidamente o mais tóxico de todos os BTEX, pois se trata de uma substância comprovadamente carcinogênica (podendo causar leucemia, ou seja, câncer dos tecidos que formam os linfócitos do sangue). Uma exposição aguda (altas concentrações em curtos períodos) por inalação ou ingestão pode causar até mesmo a morte de uma pessoa. O BTEX e outros alquilbenzenos perfazem cerca de 10 a 59% da gasolina (massa/massa), enquanto os hidrocarbonetos alifáticos compreendem 41 a 62% (Brito *et al.*, 2005).

Devido ao risco potencial a saúde humana que esse grupo de compostos oferece, a Portaria MS 2914/2011 estabeleceu limites para que a água seja considerada potável, como pode ser observada na **tabela 5.60**.

**Tabela 5.60** - Valores Máximos Permitidos (VMP) de Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos (BTEX) segundo a Portaria MS 2914/2011.

Parâmetro	VMP (mg/L)
Benzeno	0,005
Tolueno	0,17
Etilbenzeno	0,2
Xilenos	0,3

A Resolução CONAMA 396/2008, também estabeleceu limites máximos aceitáveis para esses parâmetros, de acordo com os usos considerados preponderantes, como pode ser observado na **tabela 5.61**.

**Tabela 5.61** - Valores Máximos Permitidos (VMP) de Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos (BTEX), para os usos preponderantes (Resolução CONAMA 396/2008).

Parâmetro	Usos Preponderantes da Água			
	Consumo Humano ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	Dessedentação Animal ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	Irrigação ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	Recreação ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )
Benzeno	5	-	-	10
Tolueno	170	24	-	-
Etilbenzeno	200	-	-	-
Xileno Total (o,m,p xilenos)	300	-	-	-

Na segunda campanha de amostragem das águas do Aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, dentre todos os componentes do BTEX, apenas o Tolueno apresentou duas amostras com teores de 0,0034 e 0,0036 mg/L, respectivamente. Ou seja, nenhum dos demais componentes do BTEX foi detectado pelas análises realizadas.

Além disso, ressalta-se que os teores de Tolueno detectados estão abaixo do VMP estabelecido pela Portaria MS 2914/2011 (**tabela 5.60**), bem como, dentro dos limites da Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as águas subterrâneas podem ser utilizadas para os usos nela prescritos (**tabela 5.61**).

Vale ressaltar que a presença de tolueno encontrado na análise da água de 02 (dois) poços se deve a contaminação por postos de combustível, pois de acordo com Kao & Wang (2000), os problemas mais graves de contaminação das águas subterrâneas são atribuídos aos hidrocarbonetos aromáticos, ocorrendo, na maioria dos casos, devido ao vazamento de tanques subterrâneos que armazenam combustíveis derivados de petróleo. Dentre os constituintes da gasolina, principal derivado do petróleo, os que merecem maior preocupação são os hidrocarbonetos voláteis monoaromáticos, benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX), devido a sua toxicidade e solubilidade em água (Kuntasal *et al.*, 2005).

Por tal motivo é extremamente importante o monitoramento das águas subterrâneas na área de estudo, pois esses compostos apresentam risco à saúde humana quando presentes na água.

#### 5.2.14.2 – Fenóis

O fenol ( $\text{CH}_6\text{H}_5\text{OH}$ ) é um sólido branco cristalino em seu estado puro. Geralmente é vendido e utilizado na forma líquida, possui odor forte, levemente doce e irritante. Apresenta diversas aplicações, como reagente na produção de resinas, plásticos, medicamentos, herbicidas e desinfetantes (CETESB, 2010). Os fenóis foram muito utilizados como germicidas e desinfetantes. Atacam o sistema nervoso central, podendo levar à morte com pouco tempo de exposição (Schmidt, 2010). Considerando os efeitos toxicológicos do fenol, a Resolução CONAMA 396/2008 estabeleceu limites máximos aceitáveis para a água subterrânea, de acordo com os usos considerados preponderantes, como pode ser observado na **tabela 5.62**.

**Tabela 5.62** - Valores Máximos Permitidos (VMP) de Fenóis, para o os usos preponderantes (Resolução CONAMA 396/2008).

Parâmetro	Usos Preponderantes da Água			
	Consumo Humano ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	Dessedentação Animal ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	Irrigação ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	Recreação ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )
Fenóis	3	2	-	2

No período de estiagem (outubro de 2012), foram realizadas amostragens de água no aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, para avaliação dos teores de fenóis, onde se verificou que 80% (8/10) das amostras analisadas apresentaram resultados inferiores ao limite de detecção de 0,001 mg/L. Enquanto que os 20% (2/10) restantes dos poços apresentaram valores de fenóis que variaram de 0,0015 a 0,0017 mg/L.

De acordo com a resolução CONAMA 396/2008, as águas dos poços amostrados podem ser aproveitadas para todos os usos nela prescritos (**tabela 5.60**), uma vez que não ultrapassaram o VMP de fenóis.

## 5.2.15 – Isótopos Ambientais

### 5.2.15.1 - Oxigênio-18 e Deutério

A composição dos isótopos estáveis da água ( $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$ ) é modificada por processos meteóricos e por esta razão as águas de recarga dos aquíferos possuem uma *assinatura isotópica* característica, que serve como um traçador natural da *origem* das mesmas (Clark & Fritz, 1997).

O hidrogênio e o oxigênio fazem parte da molécula da água e apresentam cada um deles, três formas diferentes; o hidrogênio:  $^1\text{H}$ , D ( $^2\text{H}$ ) e T ( $^3\text{H}$ ) e o oxigênio  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}$ . Por isso, a água pode ser encontrada em formas isotópicas diferentes, sendo as mais abundantes  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  e  $\text{HD}^{16}\text{O}$ , cujas abundâncias relativas médias são, respectivamente, 99%, 0,2% e 0,032%.

Portanto, a quantidade de moléculas  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  e  $\text{HD}^{16}\text{O}$ , é muito pequena em relação à quantidade de moléculas  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  e varia dependendo da origem da água, de processos que ocorrem durante o seu deslocamento e de seu armazenamento superficial. Assim, estas moléculas marcam a água e são utilizadas como traçadores para pesquisar sua história.

Os resultados das medidas destes isótopos são expressos em termos de  $\delta\text{‰}$ , definido por,

$$\delta\text{‰} = [(R_a - R_p) / R_p] \times 10^3$$

Onde,  $R_a$  é a razão isotópica  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ou D/H, respectivamente, para o oxigênio e para o hidrogênio na amostra e  $R_p$  seu valor para uma água padrão “VSMOW” (*Vienna Standard Mean Ocean Water*) da IAEA (Agência Internacional de Energia Atômica) em Viena/Áustria. O padrão SMOW originalmente era água do oceano, escolhido por Craig (1961).

O valor de  $\delta$  mede, portanto, o enriquecimento (ou empobrecimento, quando  $\delta < 0$ ) no isótopo pesado da amostra em relação ao padrão. É importante que, devido à grande predominância do isótopo mais leve ( $^1\text{H}$  ou  $^{16}\text{O}$ ),  $\delta$  comporta-se como uma concentração numa mistura de águas de valores de  $\delta$  diferentes (i.e. segue uma reta de mistura) (Craig, 1961).

Em virtude da complexidade do ciclo hidrológico é surpreendente que  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  tenham um comportamento perfeitamente previsível (Clark & Fritz, 1997). De fato, Craig (1961) descobriu que  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  em águas doces se correlacionam em escala global. A **Linha de Água Meteórica Global** (sigla em inglês GMWL) de Craig define a relação entre  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  através da **equação 5.1**.

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10\text{‰ SMOW} \quad (5.1)$$

O monitoramento subsequente da composição isotópica estável da chuva em escala global (IAEA – Rede Global para Isótopos na Precipitação) resultou, dez anos depois, no estabelecimento do padrão VSMOW e na substituição da **equação 5.1** pela **equação 5.2**.

$$\delta^2\text{H} = 8,13\delta^{18}\text{O} + 10,8\text{‰ VSMOW} \quad (5.2)$$

Na verdade essa relação (5.2) é “global” apenas na aplicação, sendo de fato uma média de muitas linhas de água meteórica regional e local que diferem da global devido à variação dos parâmetros climáticos e geográficos envolvidos (Clark & Fritz, 1997). Em hidrologia isotópica, a **equação (5.2)** que define a linha de água meteórica global (GMWL) de Harmon Craig é uma referência para a interpretação da origem das águas subterrâneas.

No caso de Macapá, o diagrama da **figura 5.49** elaborado a partir dos dados contidos na **tabela 5.63** mostra que a **Reta de Água Subterrânea (RAS)** do aquífero Tucunaré apresenta um comportamento muito próximo daquele da **Reta de Água Meteórica (RMM)** da região, conforme se pode comprovar comparando as equações das retas RAS e RMM (fazendo  $\delta^2\text{H}^0/_{00} = 0$ ), ou seja:

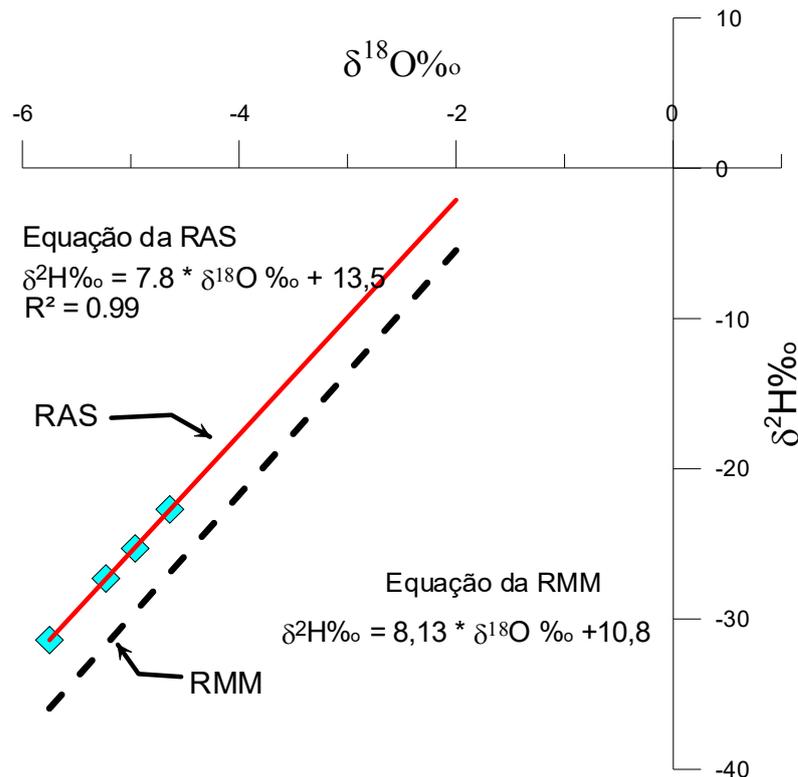
$$\text{Para a RAS: } \delta^{18}\text{O} = -\frac{13,5}{7,8} = -1,73\text{‰}_{00}$$

$$\text{Para a RMM: } \delta^{18}\text{O} = -\frac{10,8}{8,13} = -1,33\text{‰}_{00}$$

Ocorre, portanto, uma variação de -0,4 na concentração isotópica de  $\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$  das precipitações, indicando águas subterrâneas provenientes de chuvas com 30% de perda de  $\delta^{18}\text{O}$  por evaporação.

**Tabela 5.63** – Valores de deutério e oxigênio-18 dosados nas amostras coletadas em Macapá no período seco (outubro de 2012).

Poço	$\delta\text{D}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$
MPA01	-31,45	-5,75
MPA08	-27,31	-5,23
MPA14	-25,32	-4,96
MPA26	-22,67	-4,64



**Figura 5.49** – Diagrama mostrando que a água subterrânea do aquífero Tucunaré em Macapá tem origem nas precipitações e apresenta, em relação às mesmas, uma redução de 30% no conteúdo de  $\delta^{18}\text{O}$  devido a perdas por evaporação da água meteórica durante o processo de recarga por infiltração direta das águas de chuva.

### 5.2.15.2 - Trício

#### *Trício na Precipitação*

Os testes atmosféricos de armas nucleares realizados entre os anos de 1952 e 1962 produziram uma quantidade formidável de trício atmosférico. Essa tremenda entrada de  $^3\text{H}$  na atmosfera criou na estratosfera um reservatório desse isótopo que literalmente contaminou o sistema global de precipitação durante 40 anos. Em 1963 um tratado Americano-Soviético suspendeu os testes de armas termonucleares, embora alguns testes franceses e chineses tenham sido realizados até 1980 (Clark & Fritz, 1997). O ano de 1962, quando foram encerrados os testes nucleares, gerou um imenso pico de  $^3\text{H}$ , que apareceu na primavera de 1963 e se tornou uma marca usada em muitos estudos hidrológicos. As concentrações de  $^3\text{H}$  nas precipitações estão agora praticamente de volta aos níveis cosmogênicos naturais (Clark & Fritz, 1997).

### **Datação de Água Subterrânea com Trício**

O trício ( $^3\text{H}$ ) é provavelmente o radioisótopo mais frequentemente empregado para identificar a presença de recarga moderna (Clark & Fritz, 1997).

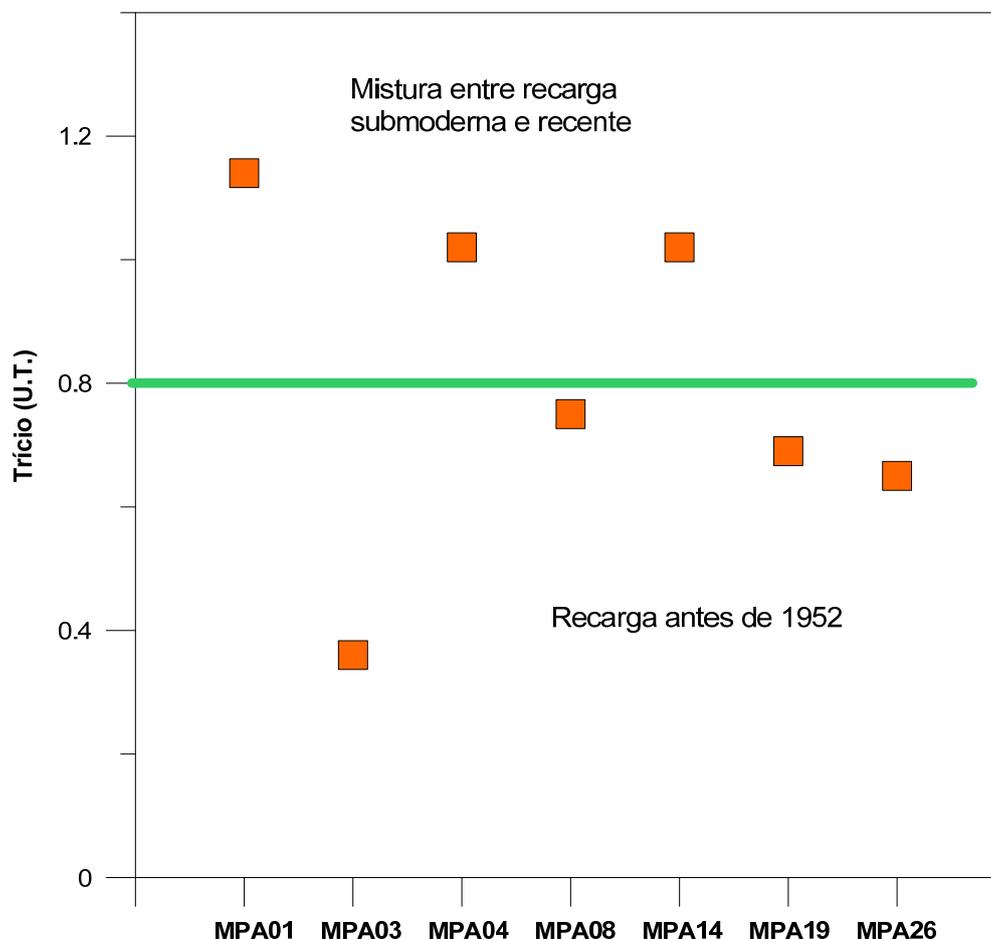
Kaufman & Libby (1954) foram os primeiros a reconhecer o potencial do  $^3\text{H}$  cosmogênico para a datação de águas subterrâneas e existem vários métodos *quantitativos* e *qualitativos* com uso desse isótopo. A atenuação dos níveis de trício na atmosfera associada com a presença de águas novas e paleoáguas, em alguns aquíferos (como é o caso do aquífero Tucunaré), afetam a confiabilidade das interpretações quantitativas. Uma interpretação qualitativa significa que os tempos de trânsito ou de residência não podem ser determinados (Clark & Fritz, 1997).

Uma proposta de interpretação qualitativa de dados de  $^3\text{H}$ , feita por Clark & Fritz (1997) para dados de regiões costeiras e de baixa latitude, relaciona os valores de unidades de trício (U.T.) com a idade das águas subterrâneas (**tabela 5.64**).

**Tabela 5.64** – Relação entre unidades de trício (U.T.) e idade das águas subterrâneas.

Unidade de trício (U.T.)	Interpretação qualitativa da idade
< 0,8	Água submoderna, recarga anterior a 1952
0,8 a 2	Mistura de água submoderna com recarga recente
2 a 8	Água moderna (<5 a 10 anos)
10 a 20	Água com presença de $^3\text{H}$ residual da "bomba"
>20	Água com uma componente significativa de recarga dos anos 1960 e 1970

Os dados de  $^3\text{H}$  obtidos em 7 (sete) amostras coletadas em Macapá (**figura 5.50**) revelam, de acordo com a interpretação qualitativa mostrada na **tabela 5.64**, que o aquífero Tucunaré possui água de recarga anterior a 1952 e mistura de água submoderna com recarga recente.

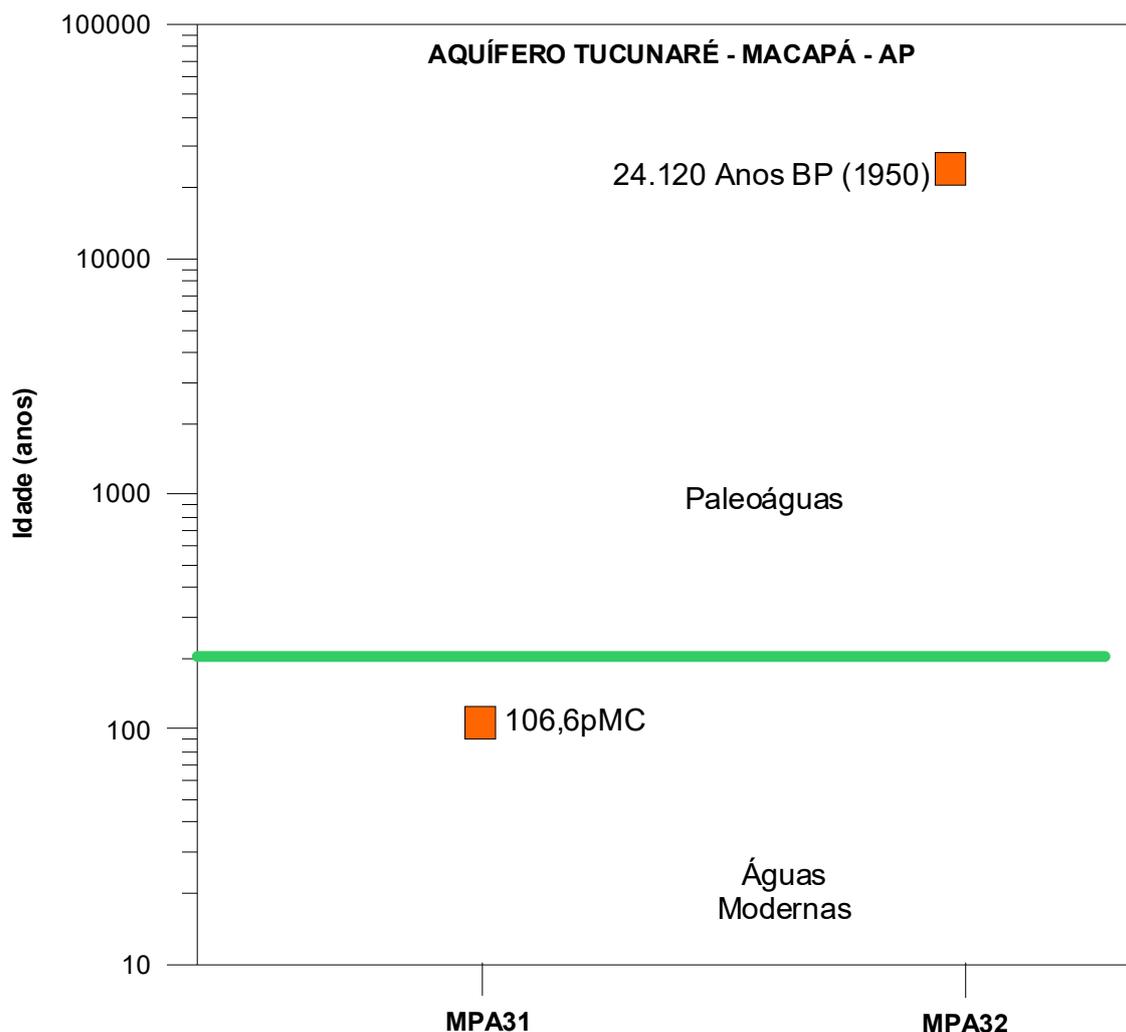


**Figura 5.50** – Idade qualitativa da recarga do aquífero Tucunaré em Macapá, segundo os dados de trítio de 7 (sete) amostras coletadas.

### 5.2.15.3 - Carbono-14

O carbono-14 embora não pertencendo à molécula d'água é um excelente traçador das águas subterrâneas onde está presente na forma de bicarbonato dissolvido proveniente do CO<sub>2</sub> do ar, trazido pelas precipitações, do CO<sub>2</sub> existente no solo, vindo principalmente pela respiração das raízes e dissolução dos calcários. O uso deste isótopo no estudo das águas subterrâneas foi proposto por Münnich (1957).

Em Macapá, segundo o diagrama da **figura 5.51**, elaborado a partir dos dados contidos na **tabela 5.65**, as duas medidas de carbono-14 indicam no aquífero Tucunaré, presença de águas modernas (106,6 pMC) e paleoáguas, com 24120 anos BP. As águas modernas são provenientes do poço MPA31 com 31 m de profundidade e seção filtrante instalada no intervalo de 24 a 30 m; a paleoágua foi coletada no poço MPA32 com 160 m de profundidade. Provém das seções filtrantes existentes nos intervalos de 90 m a 102 m e de 130 m a 142 m de profundidade.



**Figura 5.51** – Idades medidas com carbono 14 de amostras de água do aquífero Tucunaré em Macapá – AP.

**Tabela 5.65** – Idades aparentes ou convencionais do radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) em anos BP (*before present* – 1950) e, quando inferior a 200 anos, dita “Moderna” por convenção e expressa em %M ou pMC (*percent modern carbon*).

Resultado	MPA31	MPA32
Idade Aparente C14 (Fração Moderna)	106,6 $\pm$ 0,4 pMC	24120 $\pm$ 130 BP
Fmdn- fração de carbono moderno	1,0655 $\pm$ 0,0040	0,0497 $\pm$ 0,0008
Razão C13/C12 (‰)	-23,3	-24,4

As idades das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré parecem consistentes com as respectivas profundidades de coleta, que foram de 24 a 30 m no poço MPA31 de água moderna e de 90 a 142 m no poço MPA32 de paleoágua.

#### 5.2.15.4 - Conclusão

Os estudos dos isótopos ambientais realizados no âmbito desse projeto permitiram alcançar os seguintes resultados:

- As análises de Oxigênio-18 e Deutério levaram a concluir que a recarga do aquífero Tucunaré, em Macapá, provém de águas meteóricas, ou seja, águas de chuva com 30% de perda de  $\delta^{18}\text{O}$  por evaporação;
- As datações radiométricas de Carbono-14 revelaram a presença de águas modernas, com menos de 200 anos BP, expressas por convenção em pMC e de paleoáguas com idade da ordem de 20.000 anos BP expressas em Fmdn;
- As datações efetuadas com Trício foram baseadas na proposta de interpretação qualitativa de Clark & Fritz (1997) e indicaram que as águas do aquífero Tucunaré têm idade submoderna com recarga anterior a 1952 e mistura de água submoderna com recarga recente.

#### 5.2.16 – Parâmetros Biológicos

A qualidade bacteriológica de uma água para avaliar a contaminação por dejetos humanos e de outros animais de sangue quente é feita através de bactérias do grupo coliformes, principalmente os Coliformes Totais e *Escherichia Coli* ou Coliformes Termotolerantes. Por serem considerados indicadores microbiológicos de contaminação fecal da água são mundialmente utilizados, podendo indicar eventuais perigos para a saúde humana. Vale ressaltar que nem toda água que contenha coliformes é contaminada por microorganismos patogênicos (Feitosa *et al.*, 2008).

##### **Coliformes Totais**

Bacilos gram-negativos, aeróbicos ou anaeróbicos facultativos, não formadores de esporos, capazes de se desenvolver na presença de sais biliares ou agentes tensoativos que fermentam a lactose com produção de ácido, gás e aldeído a  $35 \pm 0,5$  °C em 24-48 horas, e que podem apresentar atividade da enzima  $\beta$ -galactosidase (Feitosa *et al.*, 2008). Os coliformes totais, dada a sua possível incidência em águas e solos não contaminados, representam, portanto, outros organismos de vida livre, e não intestinal. No caso específico de abastecimento de água potável, a água tratada não deve conter coliformes totais, os quais, caso encontrado, sugere tratamento inadequado, contaminação posterior ou nutriente em excesso (Von Sperling, 2005).

A Portaria MS 2914/2011 estabelece como padrão microbiológico da água para consumo humano, a ausência de coliformes totais em 100 mL de água.

No período chuvoso (abril de 2012), as águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, apresentaram em 63% (19/30) dos casos a presença de coliformes totais, enquanto que no período de estiagem (outubro de 2012), a presença ocorreu em 40% (12/30) das amostras.

Com base nos padrões microbiológicos definidos pela Portaria MS 2914/2011, apenas 37% (11/30) dos poços na primeira campanha e 60% (18/30) na

segunda campanha apresentaram águas recomendadas para consumo humano, o que é extremamente preocupante, haja vista que a população da área de estudo utiliza a água dos poços para todos os usos, principalmente o doméstico.

Tais resultados ocorrem no aquífero Tucunaré, pois a área de estudo está inserida numa região bastante urbanizada e que não possui sistema de esgotamento sanitário, o que segundo Zoby (2008) é extremamente preocupante, pois a falta de saneamento representa um risco direto à potabilidade das águas subterrâneas pela infiltração por fossas sépticas e pelo vazamento de redes de esgoto.

### ***Zoneamento dos Coliformes totais***

A distribuição espacial dos coliformes totais, no período chuvoso (abril de 2012) e no período de estiagem (outubro de 2012), nas águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, pode ser visualizada na **figura 5.52a** e **figura 5.52b**, respectivamente. Em ambas as campanhas, é possível notar o alto nível de contaminação por coliformes totais, 63% no período chuvoso e 40% no período de estiagem, o que é plausível pela urbanização da área associada à contaminação por fossas sépticas situadas próximas aos poços.

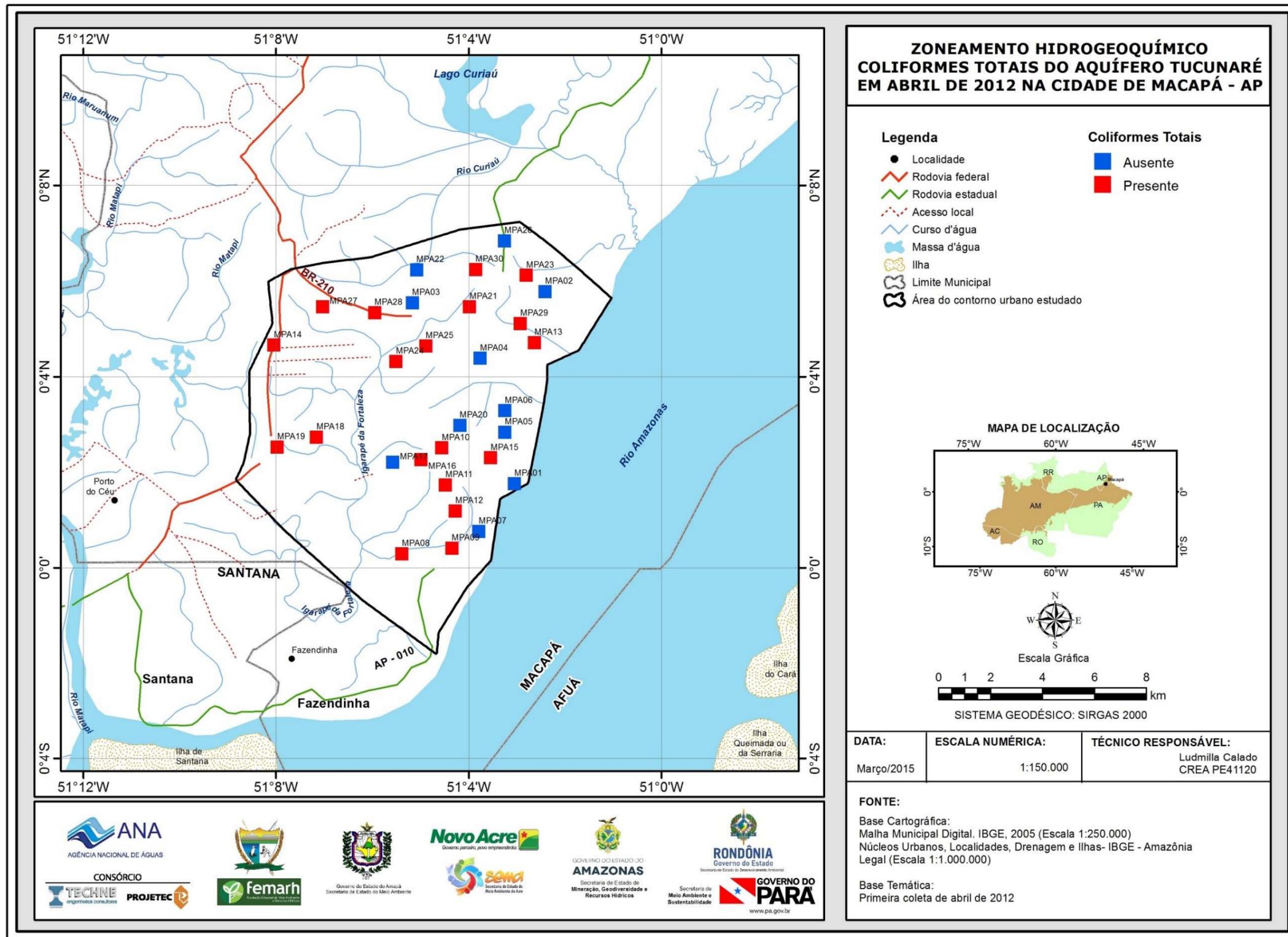


Figura 5.52a – Distribuição dos poços com presença /ausência de coliformes totais no aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012) na cidade de Macapá – AP.

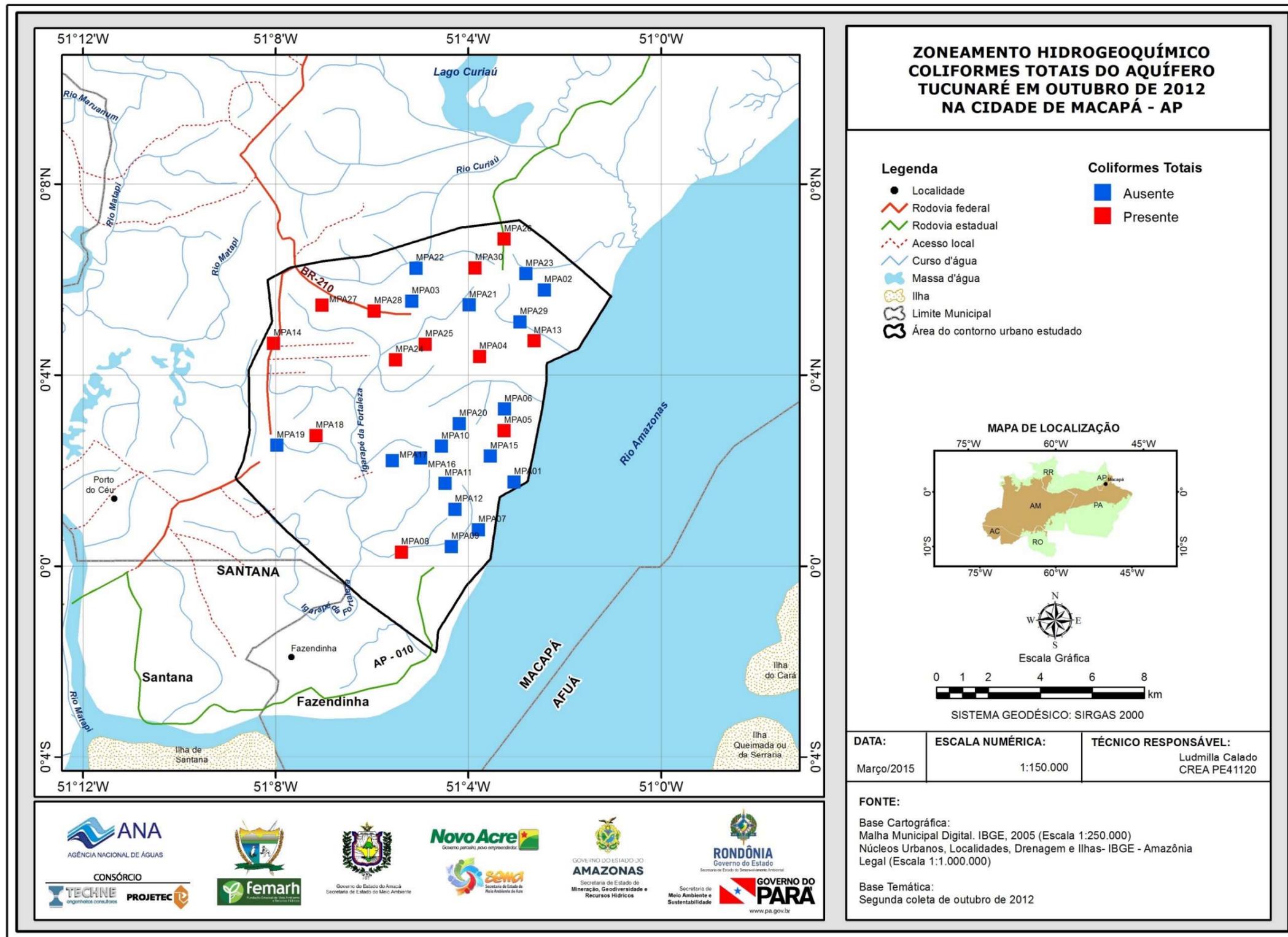


Figura 5.52b – Distribuição dos poços com presença /ausência de coliformes totais no aquífero Tucunaré no período de estiagem (outubro de 2012) na cidade de Macapá - AP.

### ***Escherichia Coli***

É uma bactéria não patogênica, do grupo de coliformes fecais (termotolerantes), que normalmente habita os intestinos dos animais superiores. É encontrada em esgotos, efluentes tratados e águas naturais sujeitas à contaminação recente por seres humanos, atividades agropecuárias, animais selvagens e pássaros. A sua presença indica que poderão estar presentes microorganismos causadores ou transmissores de doenças patogênicas. Diferentemente dos coliformes totais, *E. coli* é a única que dá garantia de contaminação exclusivamente fecal (Von Sperling, 2005; Feitosa *et al.*, 2008).

A Portaria MS 2914/2011 estabeleceu como padrão biológico para consumo humano a ausência de *E. coli* em 100 mL de água. A Resolução CONAMA estabelece padrões de microorganismos de acordo com os usos preponderantes da água subterrânea, como pode ser observado na **tabela 5.66**.

**Tabela 5.66** - Valores Máximos Permitidos (VMP) de microorganismos para os usos preponderantes (Resolução CONAMA 396/2008).

Parâmetro	Usos Preponderantes da Água			
	Consumo Humano	Dessedentação Animal	Irrigação	Recreação
<i>E. coli</i>	Ausentes em 100 mL	100 / 200 mL	-	800 / 100 mL

Em ambas as campanhas de amostragem, realizadas nas águas do aquífero Tucunaré, em Macapá, no período chuvoso (abril de 2012) e no período seco (outubro de 2012), foi detectada a presença de *E. coli* em 10% (3/30) das amostras.

Com base nos resultados das análises verifica-se que em ambas as campanhas, 90% (27/30) dos poços apresentaram águas dentro dos padrões biológicos recomendados pela Portaria MS 2914/2011, bem como, nos limites definidos pela Resolução CONAMA 396/2008, indicando que as suas águas podem ser utilizadas para consumo humano, dessedentação animal e recreação (**tabela 5.66**).

De acordo com Colvara *et al.* (2009), vários fatores podem ser responsáveis pela contaminação da água de poços artesianos em uma propriedade, tanto rural quanto urbana, a exemplo, da falta de manutenção do reservatório; localização inadequada do poço; e falta de cuidado e higiene com a água antes do consumo.

Silva & Araújo (2003) relatam que o destino final do esgoto doméstico e industrial em fossas e tanques sépticos, a disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos e industriais, postos de combustíveis e de lavagem e a modernização da agricultura representam fontes de contaminação das águas subterrâneas por bactérias e vírus patogênicos, parasitas e substâncias orgânicas e inorgânicas.

Dessa forma, fica evidente que a presença de *E. coli* no aquífero Tucunaré se deve provavelmente ao lançamento de esgoto *in natura*, que infiltra no solo e contribui para a contaminação do lençol freático, o que é extremamente

preocupante, pois pode acarretar na população ribeirinha doenças de veiculação hídrica, tais como, amebíase, giardíase, gastroenterite, febres tifoide e paratifoide, hepatite infecciosa e cólera.

### ***Zoneamento da Escherichia Coli***

A distribuição espacial da presença e ausência de *E. coli* nas águas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, analisadas no período chuvoso (abril de 2012) e no período de estiagem (outubro de 2012), podem ser observadas respectivamente na **figura 5.53a** e **figura 5.53b**.

Em ambas as campanhas, 10% das análises apresentaram presença de *E. coli*, o que indica contaminação por material fecal. Tal resultado é plausível, haja vista que na área de estudo os poços são construídos muito próximos às fossas sépticas, sem o devido cuidado sanitário, fazendo com que os dejetos entrem em contato com as águas subterrâneas, contaminando-as. Associado a isso, o fato de que na região de Macapá o sistema de esgotamento sanitário é ausente e a área é bastante urbanizada, o que contribui ainda mais para a contaminação dos mananciais próximos.

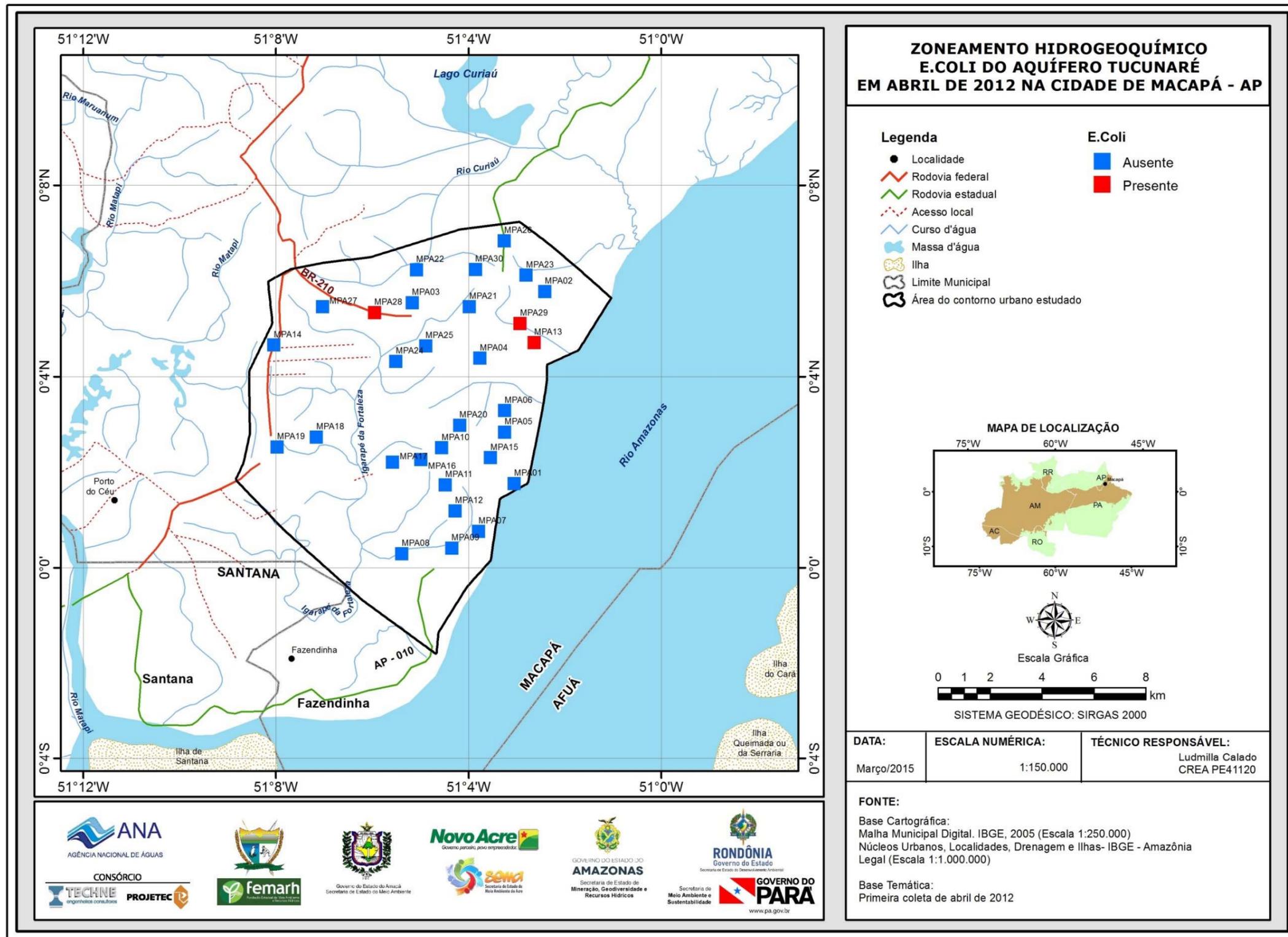


Figura 5.53a – Distribuição dos poços com presença /ausência de *E. coli* no aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012) na cidade de Macapá – AP.

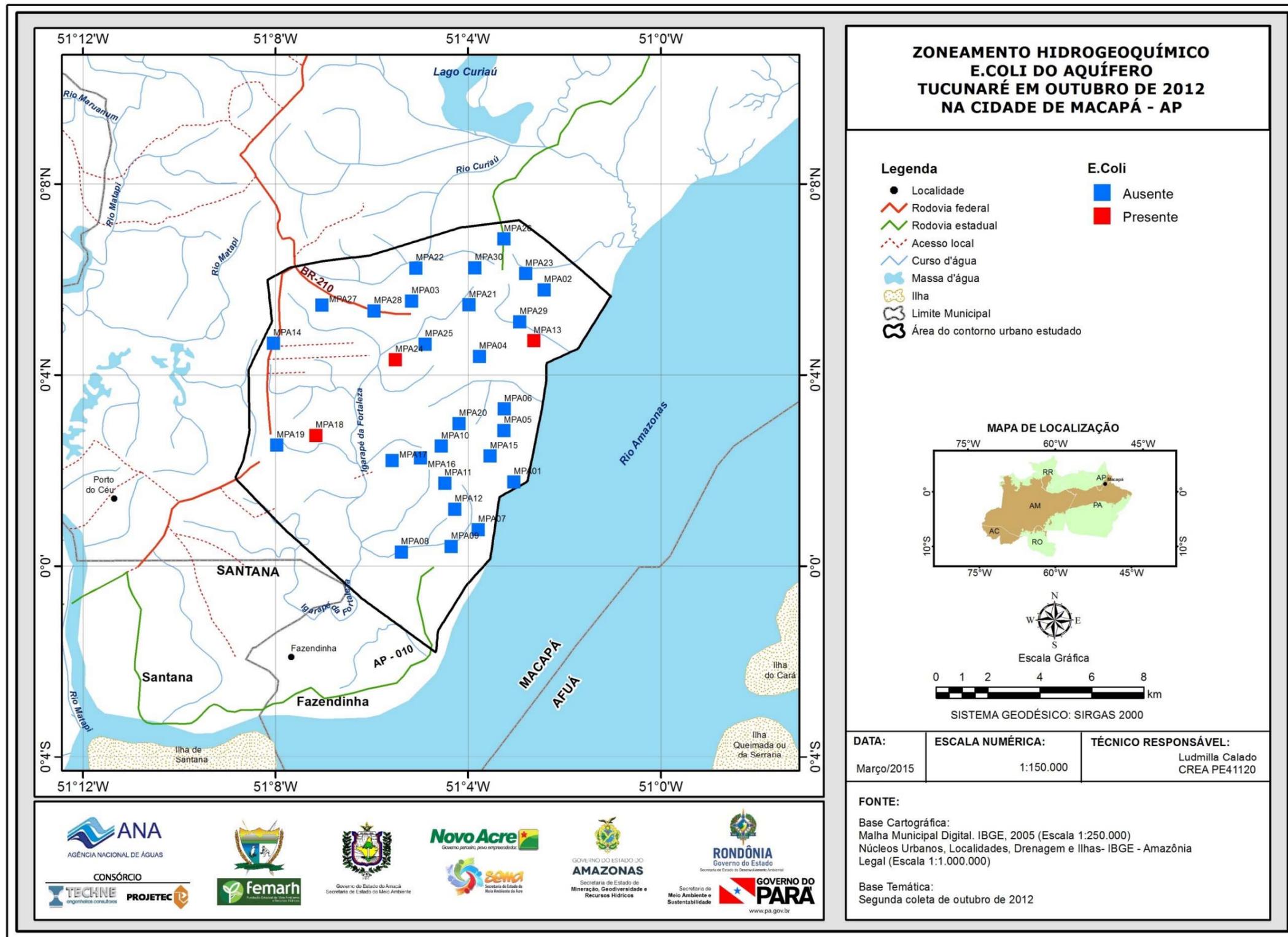


Figura 5.53b – Distribuição dos poços com presença /ausência de *E. coli* no aquífero Tucunaré no período seco (outubro de 2012) na cidade de Macapá – AP.

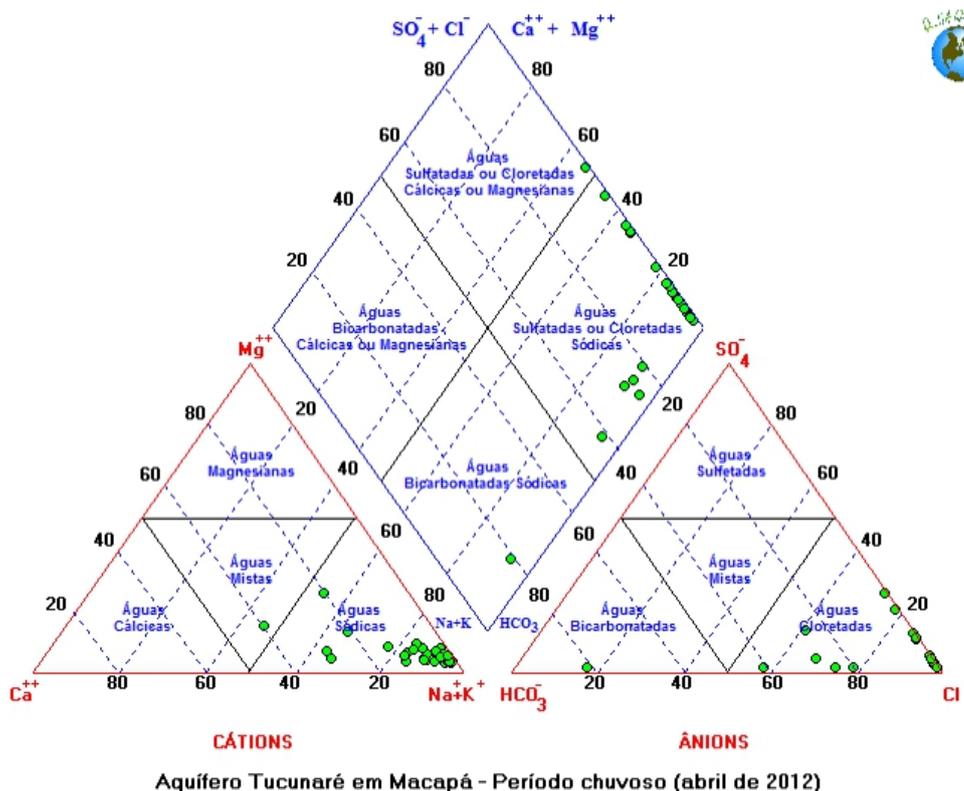
## 5.2.17 – Classificação das Águas Subterrâneas do Aquífero Tucunaré Segundo a Composição Química

Vários são os métodos existentes para a classificação das águas segundo a composição química. Todos eles se baseiam em representações gráficas dos percentuais ou frações dos cátions e ânions dominantes, normalmente expressos em meq/L. As representações são as mais diversas, incluindo diagramas colunares, circulares, triangulares e polígonos irregulares. Dentre os mais utilizados, estão o diagrama triangular de Piper e o polígono de Stiff, a seguir apresentados para a classificação das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá, com base nos dados coletados na rede de 30 (trinta) poços de monitoramento, em duas campanhas: a primeira, no período chuvoso (abril de 2012) e a segunda no período de estiagem (outubro de 2012).

### 5.2.17.1 – Diagrama Triangular de Piper

#### Período chuvoso

A classificação das águas por meio do Diagrama de Piper se baseia na identificação dos ânions e cátions predominantes. Mediante observação da **figura 5.54**, é possível identificar que as águas do Aquífero Tucunaré em Macapá, no período chuvoso (abril de 2012), no que se refere aos ânions são 96,7% (29/30) cloretadas e 3,3% (1/30) bicarbonatadas, como mostra a **tabela 5.67**. Já no que concerne a presença de cátions, as águas são 96,7% (29/30) sódicas e 3,3% (1/30) mistas, como demonstra a **tabela 5.67**.



**Figura 5.54** – Classificação das águas do aquífero Tucunaré em Macapá, coletadas no período chuvoso (abril de 2012) segundo o diagrama Triangular de Piper.

**Tabela 5.67** - Classificação das Águas do Aquífero Tucunaré segundo a composição química em Macapá - Período Chuvoso (abril de 2012).

Cátions	Poços	%	Ânions	Poços	%	Geral	Poços	%
Águas Magnesianas	0	0,0	Águas Sulfetadas	0	0,0	Águas Cloretadas Cállicas	1	3,3
Águas Cállicas	0	0,0	Águas Bicarbonatadas	1	3,3	Águas Bicarbonatadas Cállicas ou Magnesianas	0	0,0
Águas Sódicas	29	96,7	Águas Cloretadas	29	96,7	Águas Bicarbonatadas Sódicas	1	3,3
Águas Mistas	1	3,3	Águas Mistas	0	0,0	Águas Cloretadas Sódicas	28	93,3

Com base nos dados apresentados na **figura 5.54** e na **tabela 5.67**, é possível afirmar que, a maioria (93,3%) das águas do Aquífero Tucunaré, coletadas em abril de 2012, são *Cloretadas Sódicas*.

A distribuição espacial dos poços, apresentada na **figura 5.55**, permite verificar que os 6,6% restantes dos poços apresentam águas de composição química diversa, dentre elas, cloretada cálcica (3,3%) e bicarbonatada sódica (3,3%).

A ocorrência desses tipos fora do padrão é atribuída possivelmente a influências antrópicas, haja vista que a área de estudo está inserida em região urbana.

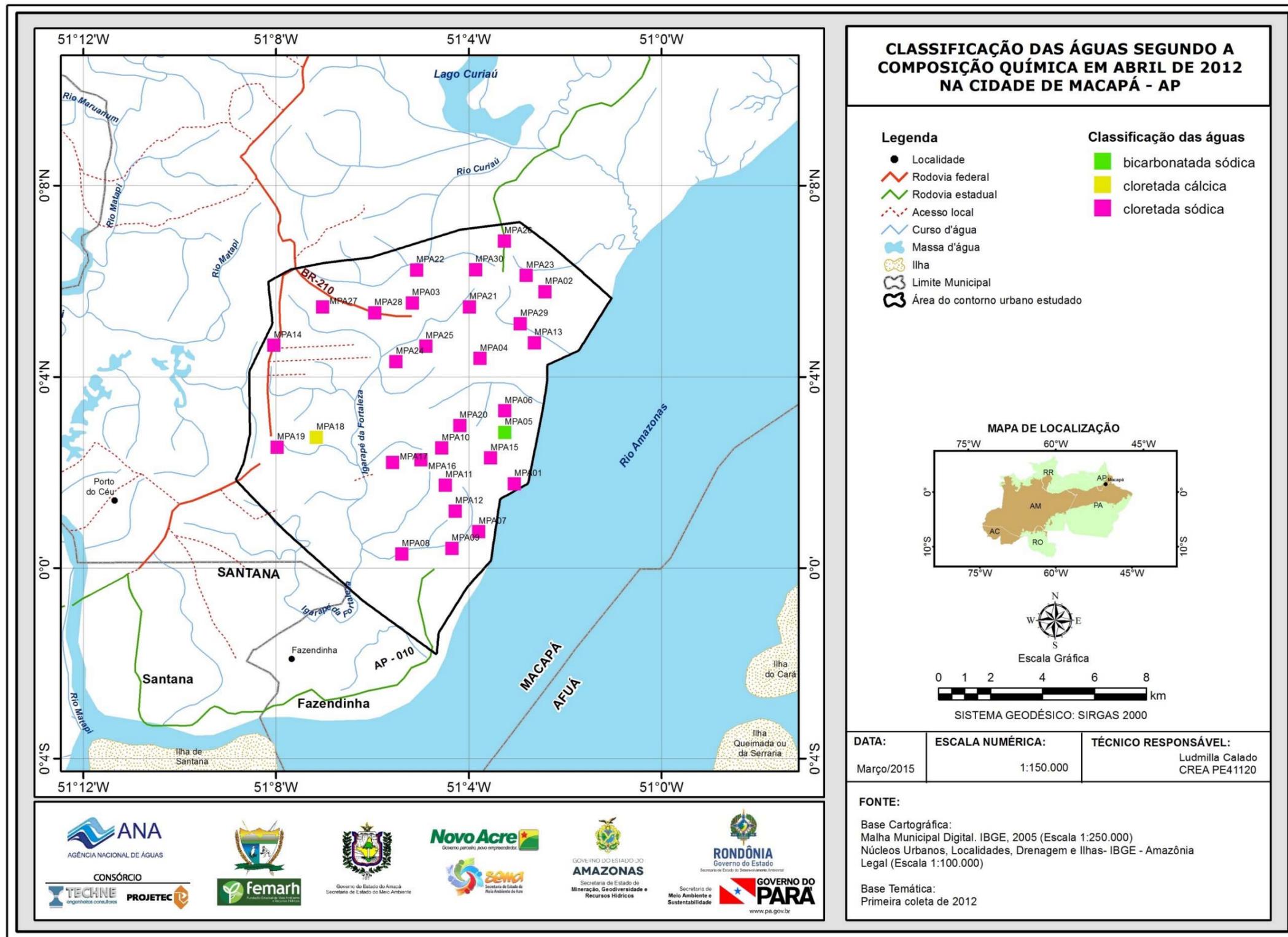
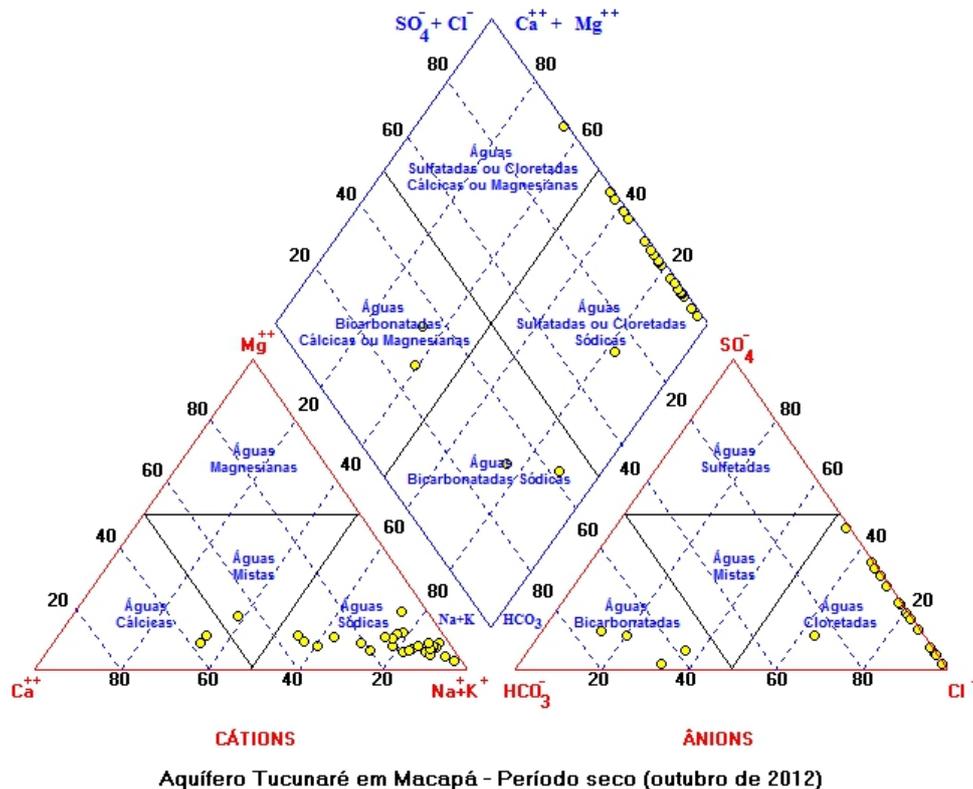


Figura 5.55 - Classificação das águas do Aquífero Tucunaré em Macapá segundo a composição química - Período chuvoso (abril de 2012).

### Período de estiagem

De acordo com a **figura 5.56** e **tabela 5.68** verifica-se que as águas do Aquífero Tucunaré, no período seco (outubro de 2012), quanto à presença de ânions, são 86,7% (26/30) cloretadas e 13,3% (4/30) bicarbonatadas. Com relação aos cátions é possível identificar que 90% (27/30) das águas são sódicas, 6,7% (2/30) são cálcicas, e 3,3% (1/30) são mistas.



**Figura 5.56** – Classificação das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá, através do Diagrama de Piper, com base em amostras de água coletadas em outubro de 2012.

Mediante análise dos dados da **tabela 5.68** e **figura 5.56** é possível afirmar que a maioria das águas do aquífero Tucunaré em Macapá são *Cloretadas Sódicas*, o que corresponde a 83,3% das amostras.

A distribuição espacial da classificação das águas, da segunda campanha apresentada na **figura 5.57**, permite verificar que os 16,7% restantes das amostras possuem composição química diversa, dentre as quais se encontram cloretada cálcica (3,3%), bicarbonatada cálcica (6,7%) e bicarbonatada sódica (6,7%), como pode ser observado na **tabela 5.68**.

A ocorrência desses tipos fora do padrão é provavelmente atribuída a influências antrópicas, pois a área de estudo está localizada em espaço geográfico bastante urbanizado.

**Tabela 5.68** - Classificação das Águas do Aquífero Tucunaré, de acordo com a composição química em Macapá - Período seco (outubro de 2012).

Cátions	Poços	%	Ânions	Poços	%	Geral	Poços	%
Águas Magnesianas	0	0,0	Águas Sulfetadas	0	0,0	Águas Cloretadas Cálcicas	1	3,3
Águas Cálcicas	2	6,7	Águas Bicarbonatadas	4	13,3	Águas Bicarbonatadas Cálcicas	2	6,7
Águas Sódicas	27	90,0	Águas Cloretadas	26	86,7	Águas Bicarbonatadas Sódicas	2	6,7
Águas Mistas	1	3,3	Águas Mistas	0	0,0	Águas Cloretadas Sódicas	25	83,3

Analisando os resultados das duas campanhas, nota-se que a composição química das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré, na cidade de Macapá, não se modifica, sendo em sua maioria, classificadas como *Cloretadas Sódicas*, o que sugere a não influência da sazonalidade.

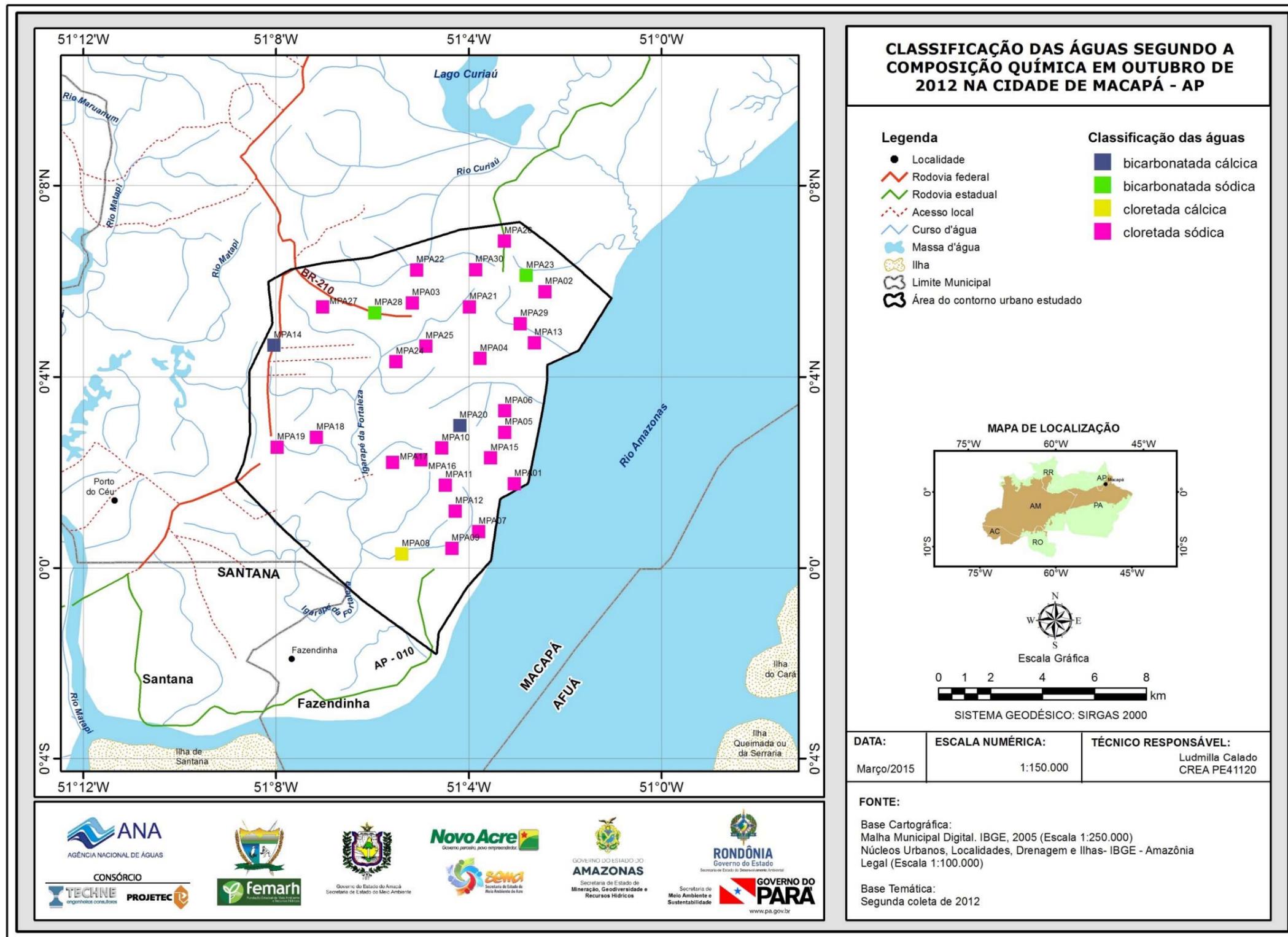


Figura 5.57 - Classificação das águas do Aquífero Tucunaré em Macapá segundo a composição química - Período seco (outubro de 2012).

### 5.2.17.2 – Diagramas de Stiff

Com base nos resultados das coletas realizadas nos meses de abril e outubro de 2012, em 30 poços situados na área urbana de Macapá, foram elaborados para fins de classificação das águas, segundo a composição química, Diagramas de Stiff, através dos quais é possível visualizar facilmente por meio de polígonos, os íons predominantes em cada um dos poços analisados.

#### **Período chuvoso**

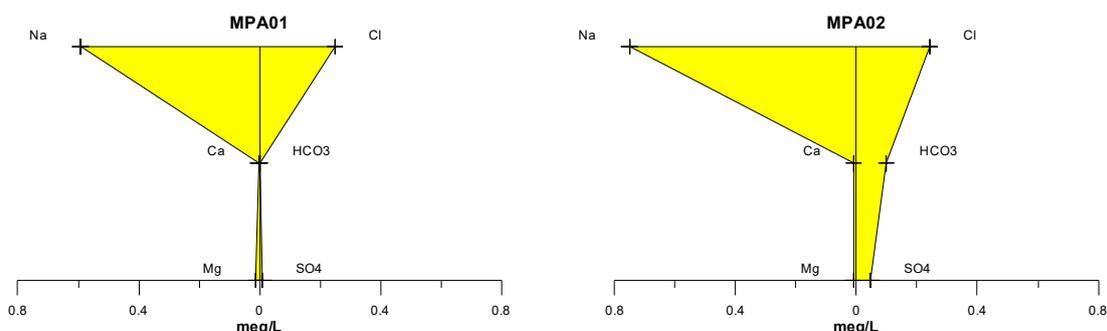
Os resultados da primeira campanha, assim como, a classificação das águas do aquífero Tucunaré, segundo a predominância de íons estão apresentados na **tabela 5.69**.

**Tabela 5.69** - Classificação das Águas do Aquífero Tucunaré, em Macapá de acordo com a predominância de íons - Período chuvoso (abril de 2012).

Classificação	Poços	%
Água Bicarbonatada Sódica	01	3,3
Água Cloretada Sódica	29	96,7

Verificou-se que as amostras de Tucunaré coletadas no período chuvoso, em abril de 2012, são 96,7% (29/30) cloretadas sódicas (**figura 5.58a**) e 3,3% (1/30) bicarbonatada sódica (**figura 5.58b**). Tais dados permitem classificar as águas do Aquífero Tucunaré, em abril de 2012 na sua maioria como *Cloretadas Sódicas*.

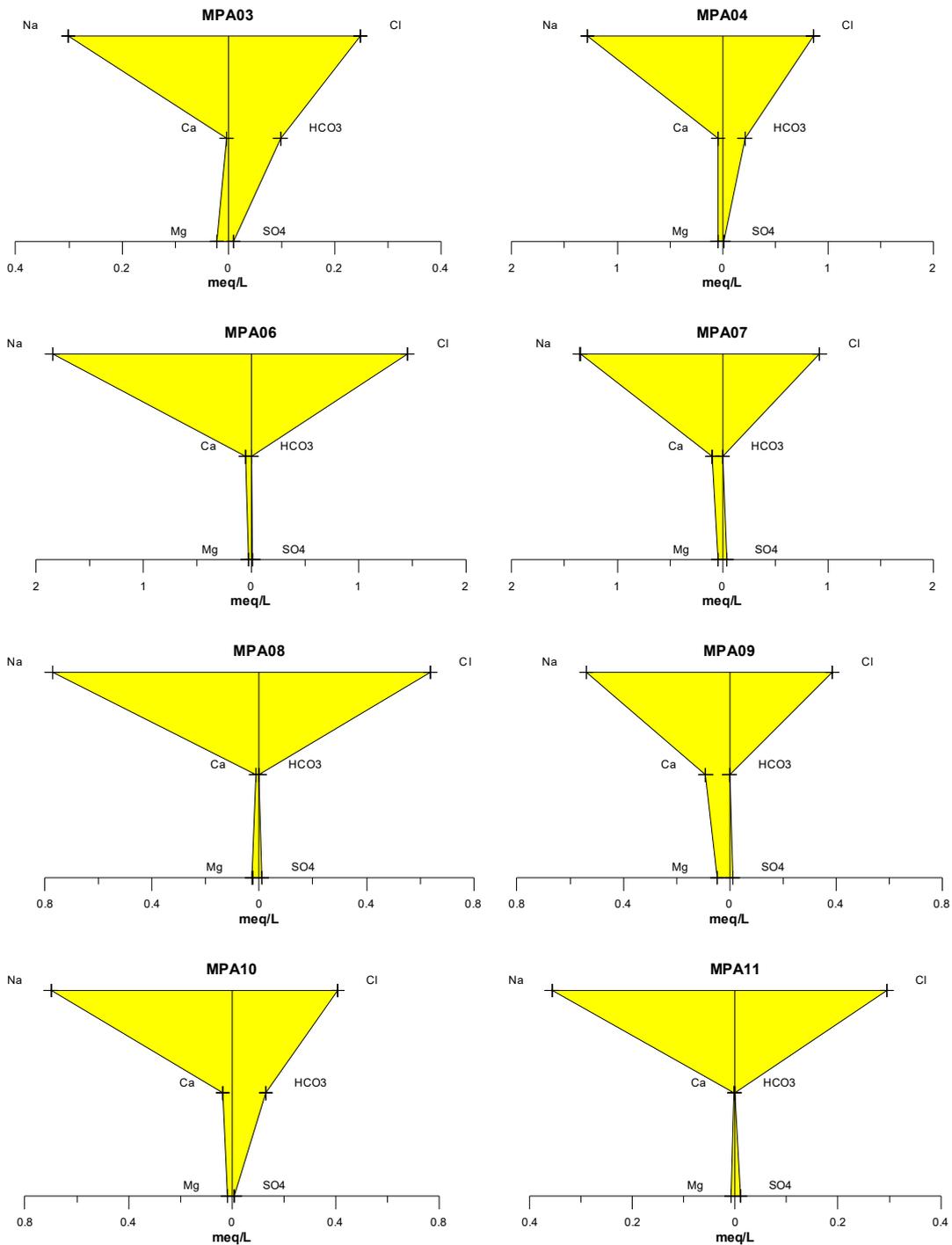
#### **Aquífero Tucunaré (Águas Cloretadas Sódicas) – abril de 2012**



**Figura 5.58a** – Águas cloretadas sódicas classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas em abril de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP.

**Continuação**

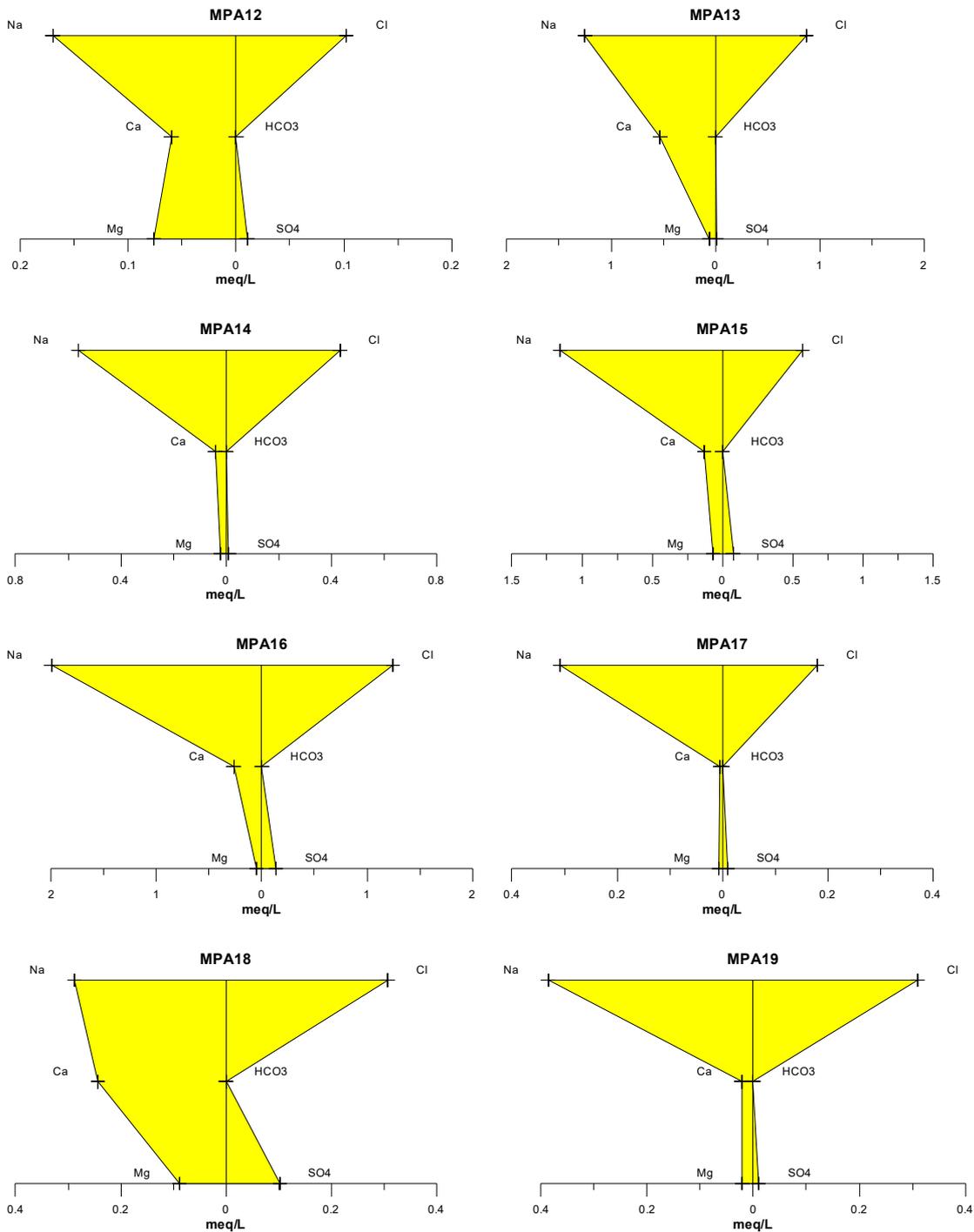
**Aquífero Tucunaré (Águas Cloretadas Sódicas) – abril de 2012**



**Figura 5.58a** – Águas cloretadas sódicas classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas em abril de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP (continuação).

**Continuação**

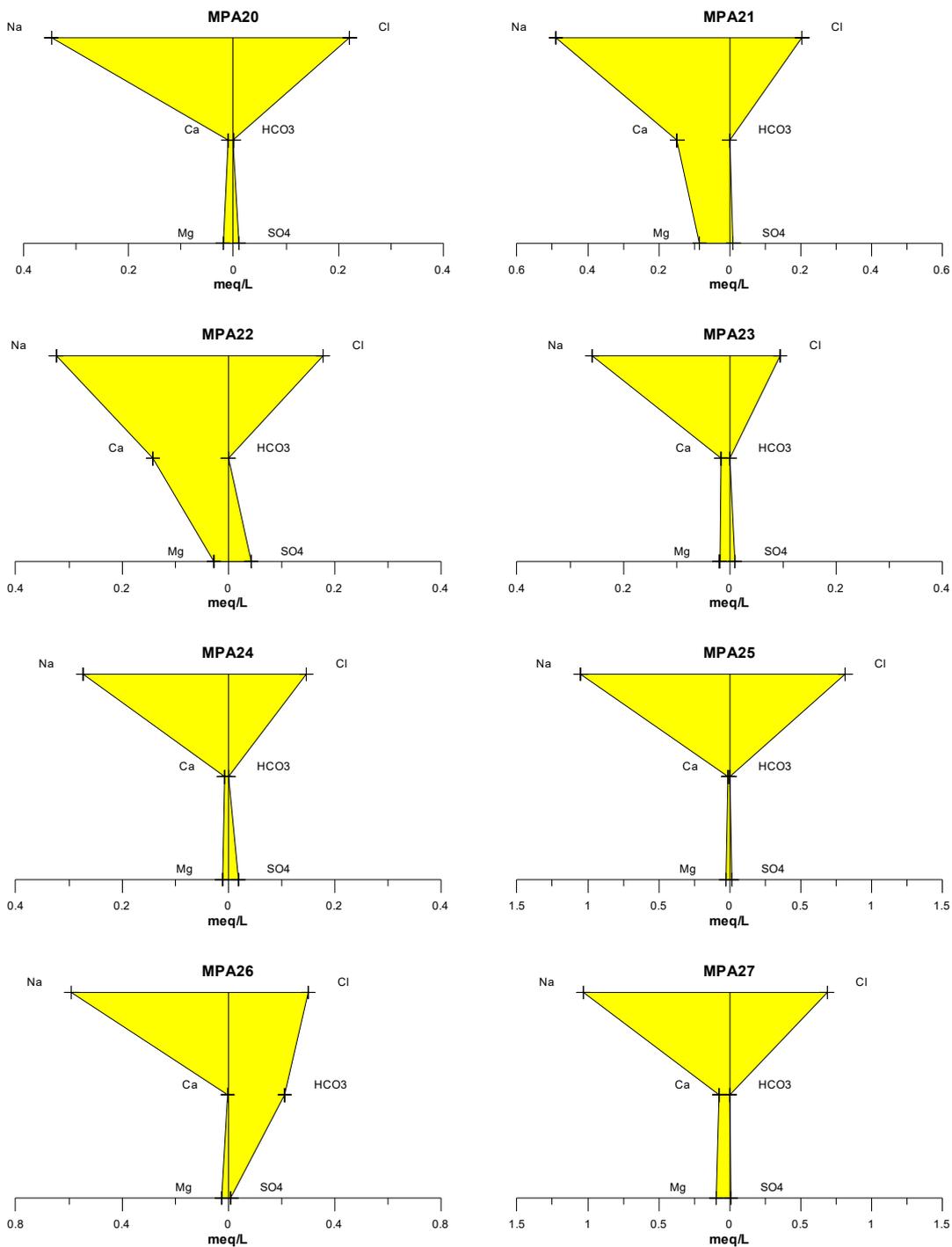
**Aquífero Tucunaré (Águas Cloretadas Sódicas) – abril de 2012**



**Figura 5.58a** – Águas cloretadas sódicas classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas em abril de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP (continuação).

**Continuação**

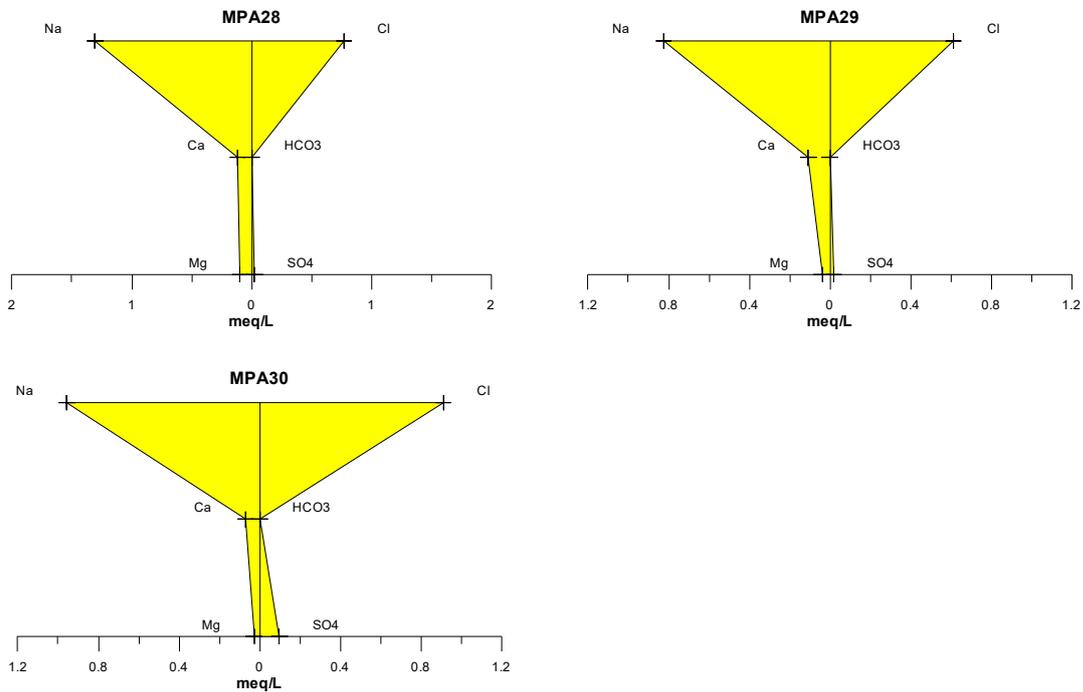
**Aquífero Tucunaré (Águas Cloretadas Sódicas) – abril de 2012**



**Figura 5.58a** – Águas cloretadas sódicas classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas em abril de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP (continuação).

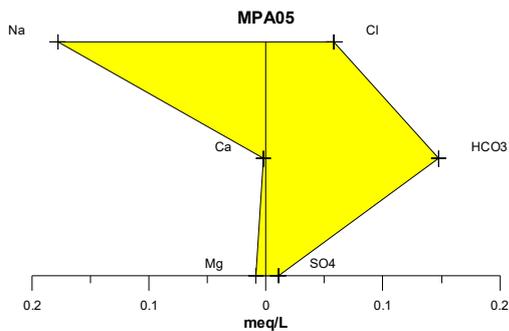
**Continuação**

**Aquífero Tucunaré (Águas Cloretadas Sódicas) – abril de 2012**



**Figura 5.58a** – Águas cloretadas sódicas classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas em abril de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP (continuação).

**Aquífero Tucunaré (Água Bicarbonatada Sódica) – abril de 2012**



**Figura 5.58b** – Água bicarbonatada sódica classificada segundo o Diagrama de Stiff, com base em amostra de água coletada em abril de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP.

### Período de estiagem

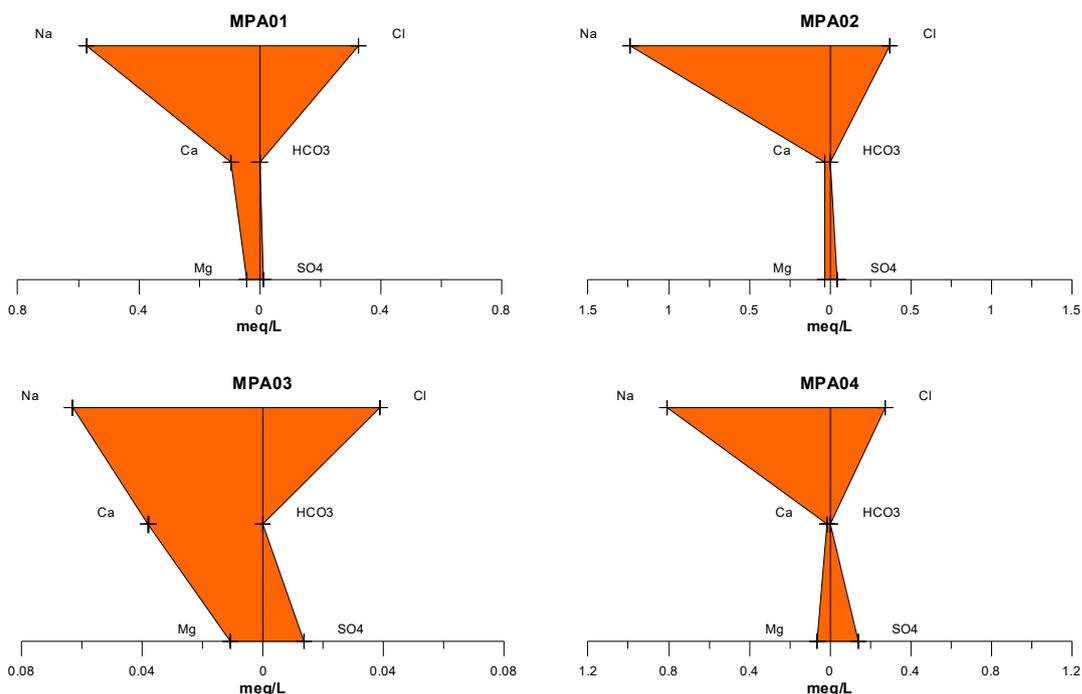
Os resultados da segunda campanha, assim como, a classificação das águas do aquífero Tucunaré, segundo a predominância de íons estão apresentados na **tabela 5.70**.

**Tabela 5.70** - Classificação das Águas do Aquífero Tucunaré, em Macapá de acordo com a predominância de íons - Período seco (outubro de 2012).

Classificação	Poços	%
Água Bicarbonatada Sódica	02	6,7
Água Cloretada Sódica	25	83,3
Água Bicarbonatada Cálcica	02	6,7
Água Cloretada Cálcica	01	3,3

Analisando os resultados das amostras de Macapá, coletadas no período seco, em outubro de 2012, verificou-se que 83,3% (25/30) das águas são classificadas como cloretadas sódicas (**figura 5.59a**); 6,7% (2/30) bicarbonatadas sódicas (**figura 5.59b**); 6,7% (2/30) bicarbonatadas cálcicas (**figura 5.59c**); e 3,3% (1/30) cloretada cálcica (**figura 5.59d**). Sendo, portanto, classificadas as águas do Aquífero Tucunaré em outubro de 2012, na sua maioria, como *Cloretadas Sódicas*.

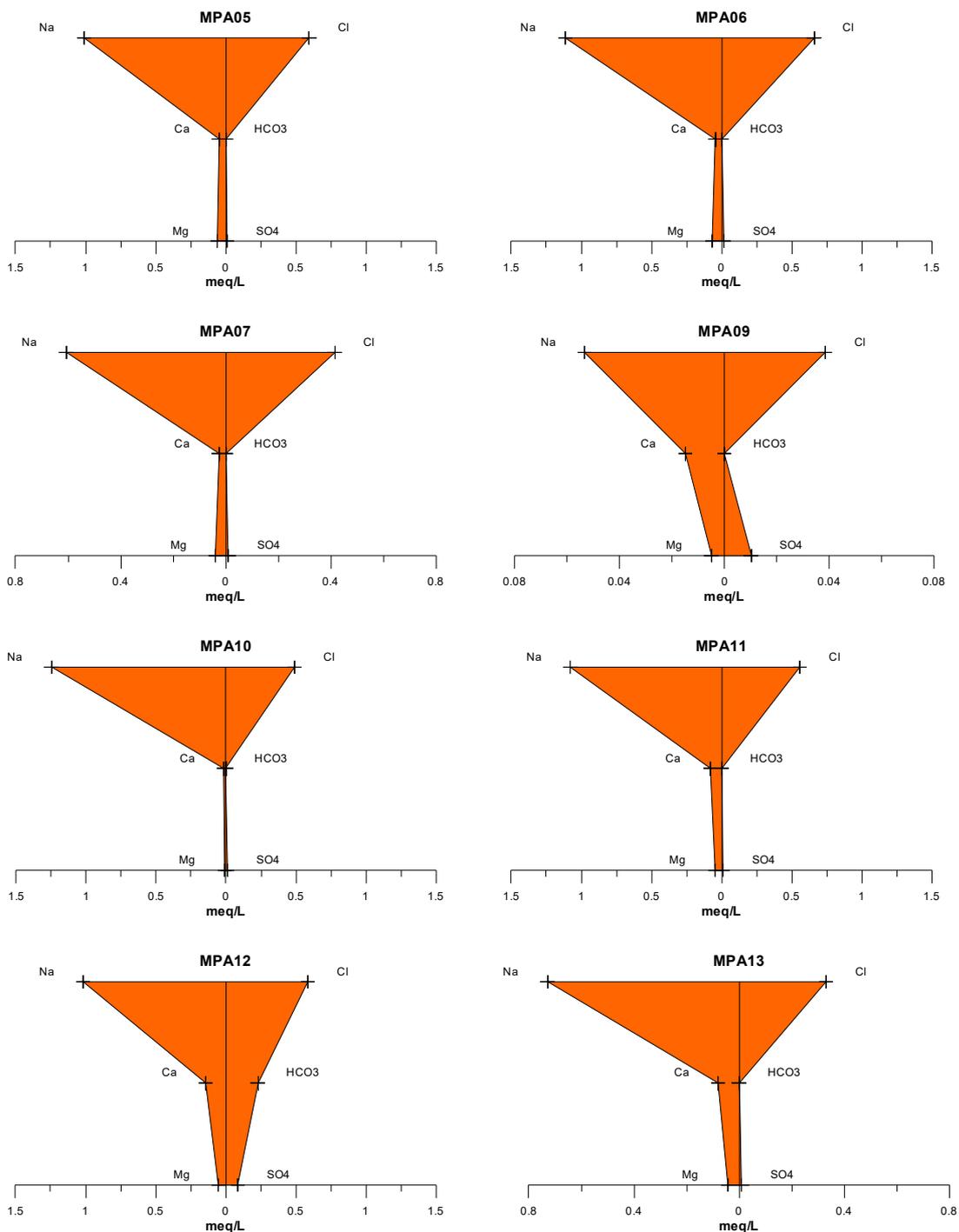
### Aquífero Tucunaré (Águas Cloretadas Sódicas) - outubro de 2012



**Figura 5.59a** – Águas cloretadas sódicas classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas no período de estiagem em outubro de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP.

**Continuação**

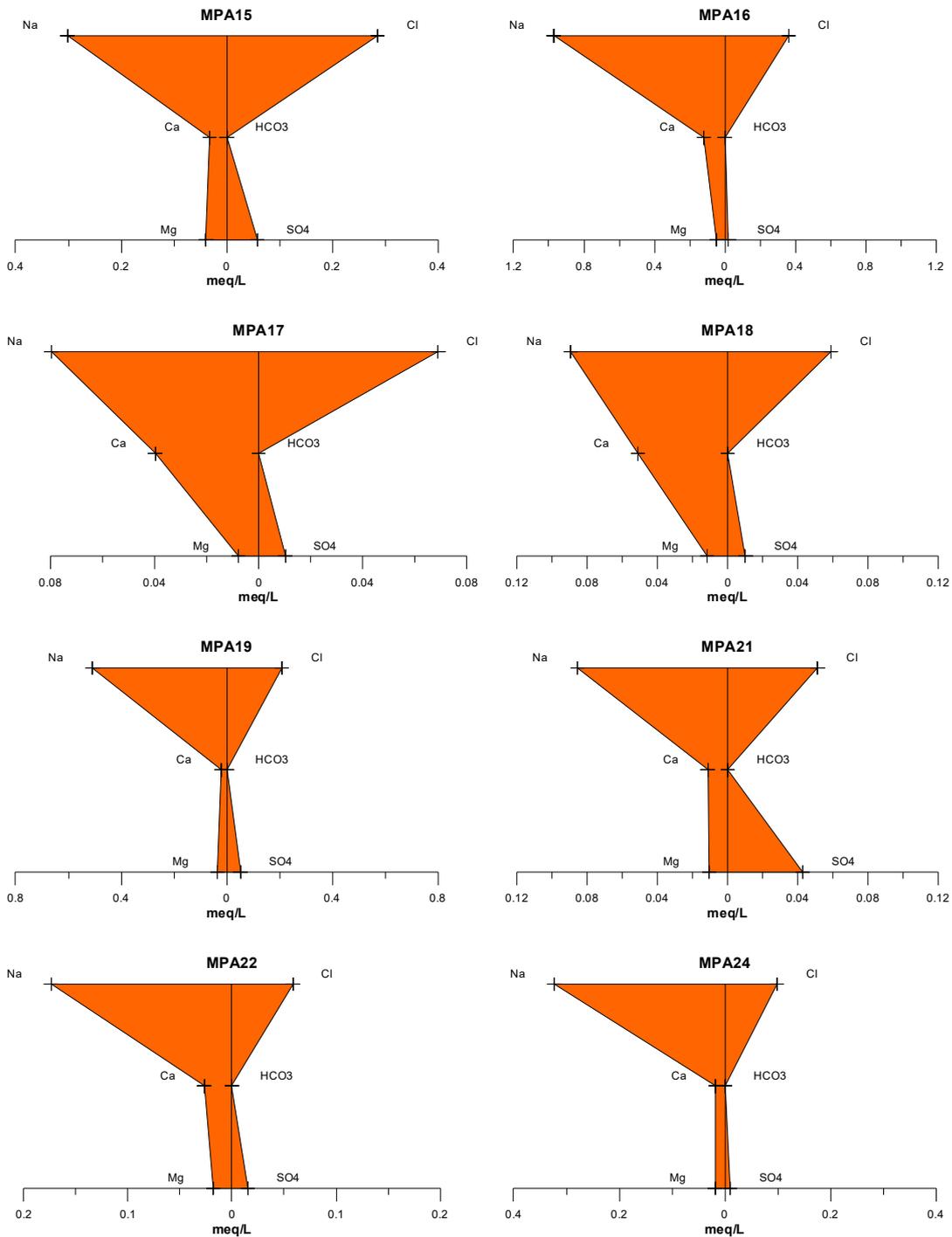
**Aquífero Tucunaré (Águas Cloretadas Sódicas) - outubro de 2012**



**Figura 5.59a** – Águas cloretadas sódicas classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas no período de estiagem em outubro de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP (continuação).

**Continuação**

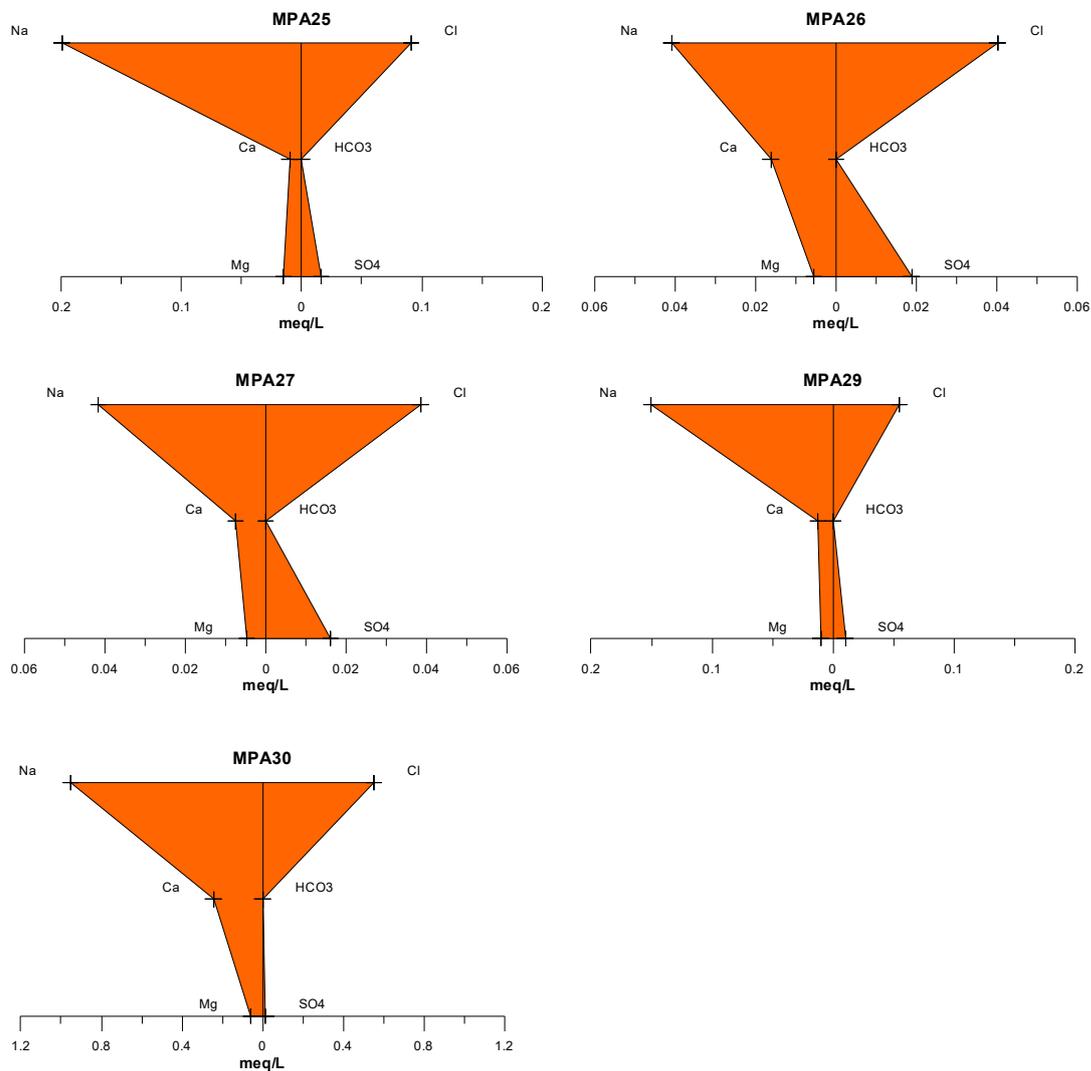
**Aquífero Tucunaré (Águas Cloretadas Sódicas) - outubro de 2012**



**Figura 5.59a** – Águas cloretadas sódicas classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas no período de estiagem em outubro de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP (continuação).

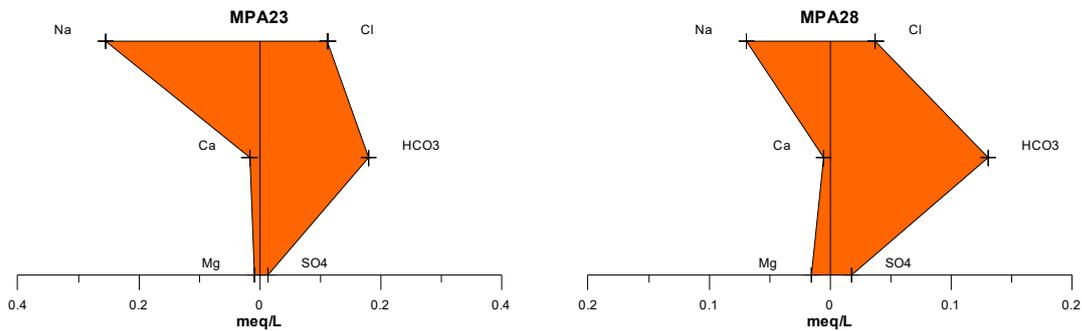
**Continuação**

**Aquífero Tucunaré (Águas Cloretadas Sódicas) - outubro de 2012**



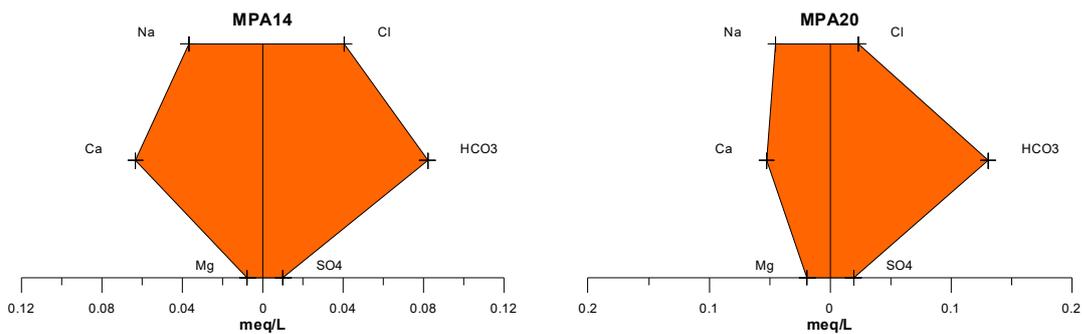
**Figura 5.59a** – Águas cloretadas sódicas classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas no período de estiagem em outubro de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP (continuação).

### **Aquífero Tucunaré (Águas Bicarbonatadas Sódicas) - outubro de 2012**



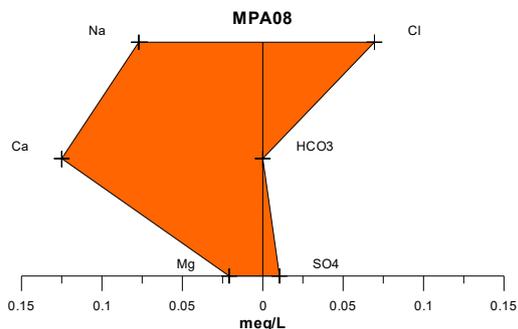
**Figura 5.59b** – Águas bicarbonatadas sódicas, classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas no período de estiagem em outubro de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP.

### **Aquífero Tucunaré (Águas Bicarbonatadas Cálcicas) - outubro de 2012**



**Figura 5.59c** – Águas bicarbonatadas cálcicas, classificadas segundo os Diagramas de Stiff, com base em amostras de água coletadas no período de estiagem em outubro de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP.

### **Aquífero Tucunaré (Água Cloretada Cálcica) - outubro de 2012**

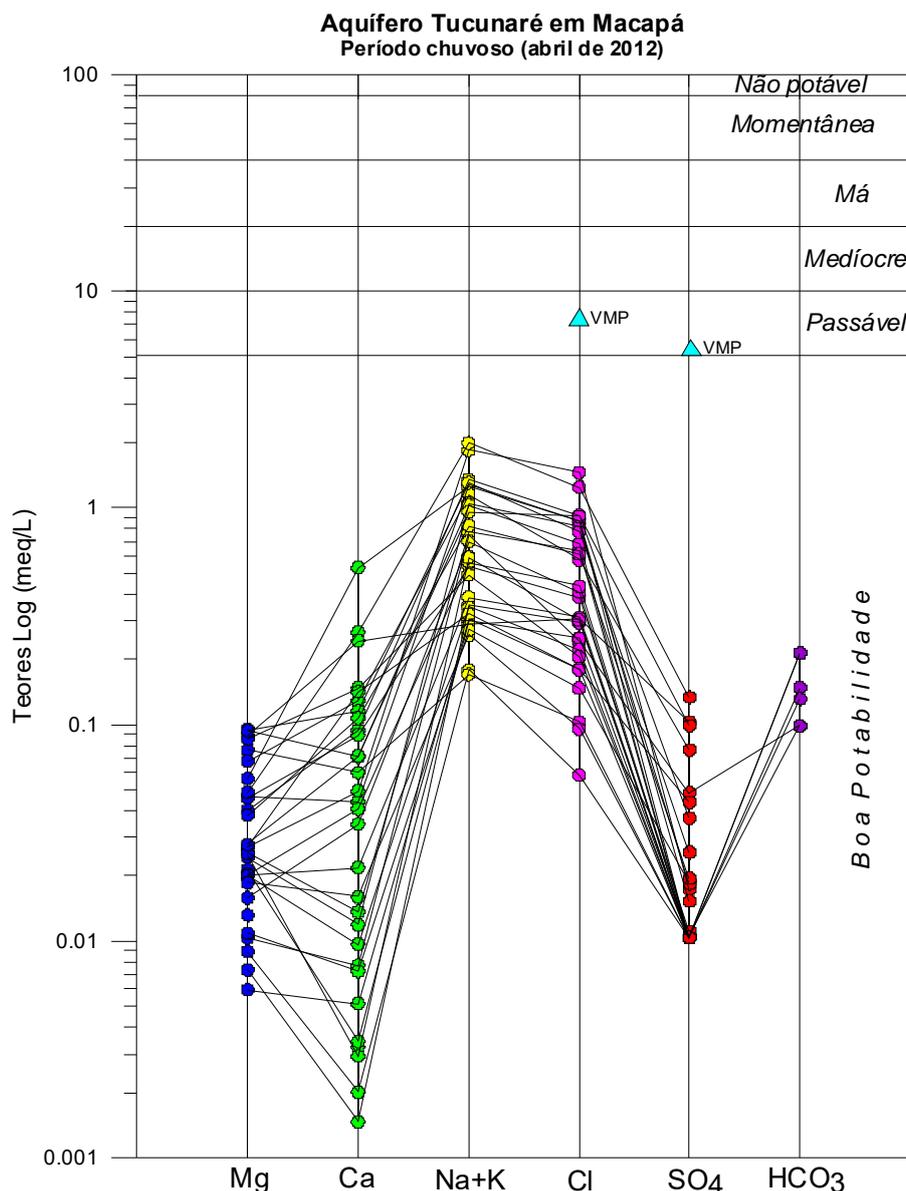


**Figura 5.59d** – Água cloretada cálcica, classificada segundo o Diagrama de Stiff, com base em amostra de água coletada no período de estiagem em outubro de 2012 no aquífero Tucunaré em Macapá – AP.

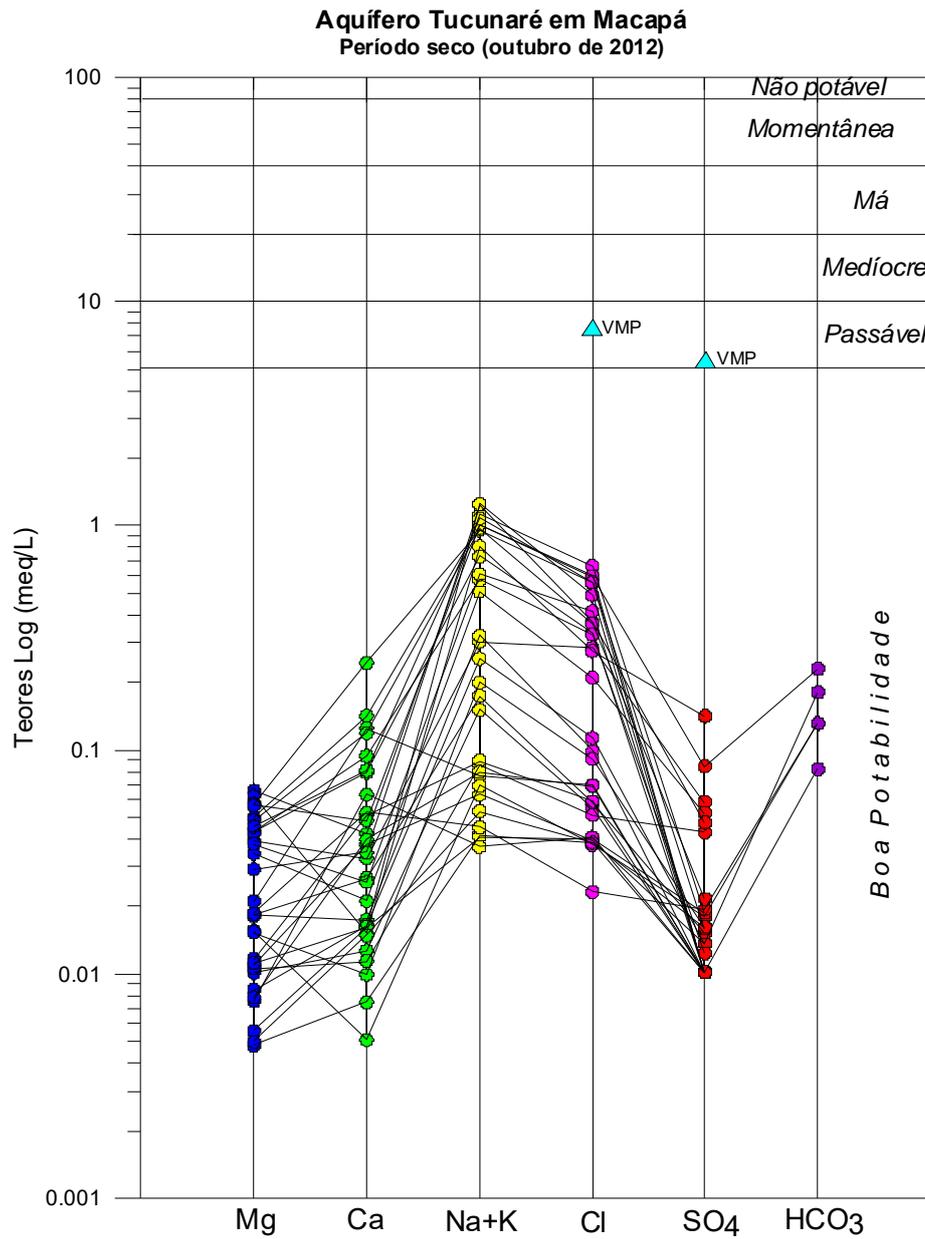
## 5.2.18 – Classificação das Águas Subterrâneas Segundo o Uso

### 5.2.18.1 – Diagramas de Schoeller-Berkaloff para Consumo Humano

A potabilidade das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá para consumo humano, avaliada através do Diagrama de Shoeller-Berkaloff, é apresentada na **figura 5.60** para o período chuvoso e na **figura 5.61** para o período de estiagem. Em ambos os períodos verifica-se que a potabilidade se classifica como boa.



**Figura 5.60** – Classificação da potabilidade das águas subterrâneas do aquífero Tucunaré em Macapá no período chuvoso segundo o Diagrama de Schoeller-Berkaloff.



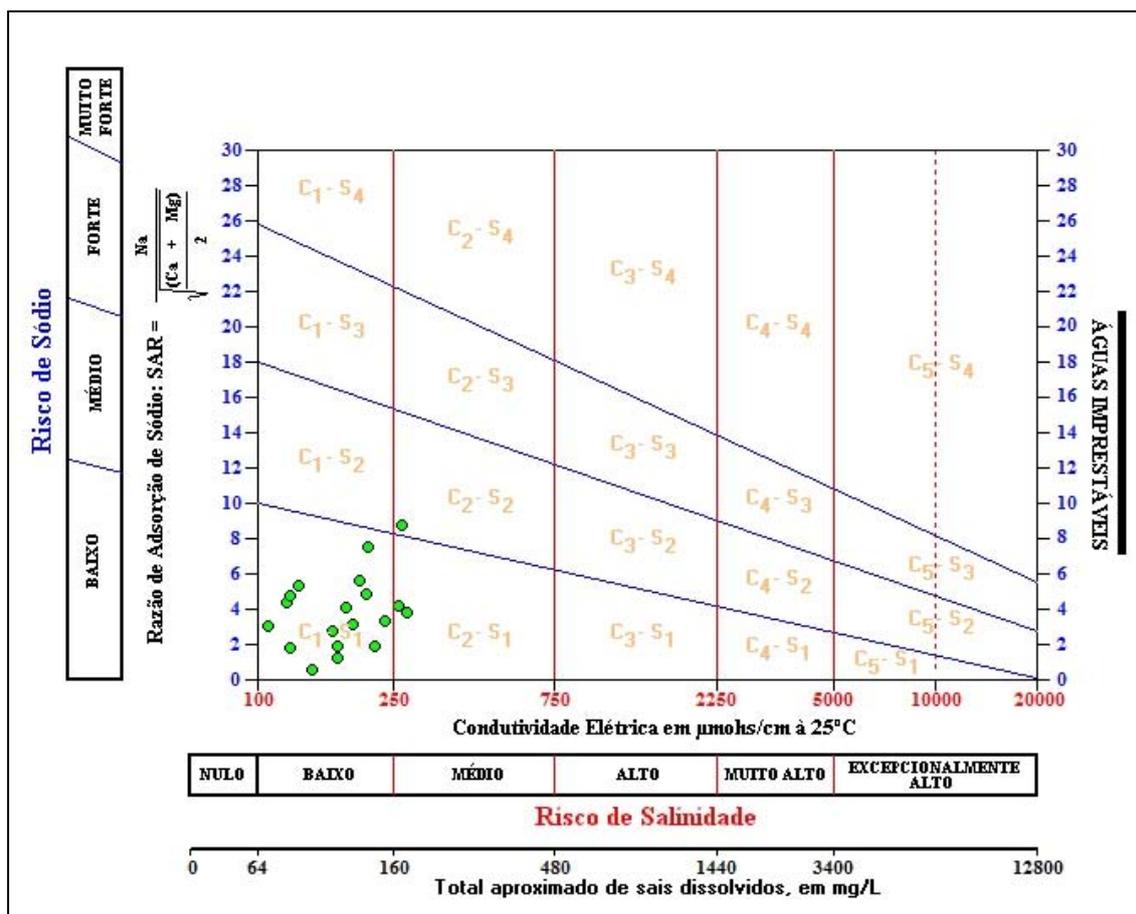
**Figura 5.61** – Classificação da potabilidade das águas subterrâneas do aquífero Tucunará em Macapá, no período de estiagem, segundo o Diagrama de Schoeller-Berkaloff.

### 5.2.18.2 – Diagramas de Risco de Sódio e Salinidade para Irrigação

Para a avaliação das águas do Aquífero Tucunaré em Macapá quanto ao uso na irrigação foi utilizada a classificação proposta pelo *United States Salinity Laboratory* (USSL), que se baseia na Razão de Adsorção de Sódio (SAR) e na condutividade elétrica da água para classificar as águas em categorias de acordo com a salinidade e o risco de sódio.

#### Período chuvoso

Com base na referida classificação, verificou-se que as amostras coletadas em abril de 2012 apresentaram risco de sódio baixo em 97% dos casos, ou seja, classificação S<sub>1</sub>, que significa águas fracamente sódicas, que podem ser utilizadas em quase todos os solos com fraco risco de formação de teores nocivos de sódio susceptível de troca, servindo para o cultivo de quase todos os vegetais. Os 3% restantes têm classificação S<sub>2</sub>, que indica águas medianamente sódicas, que apresentam perigo de sódio para os solos de textura fina e com forte capacidade de troca de cátions, e que podem ser utilizadas nos solos de textura grosseira ou ricos em matéria orgânica, com boa permeabilidade (**figura 5.62**).



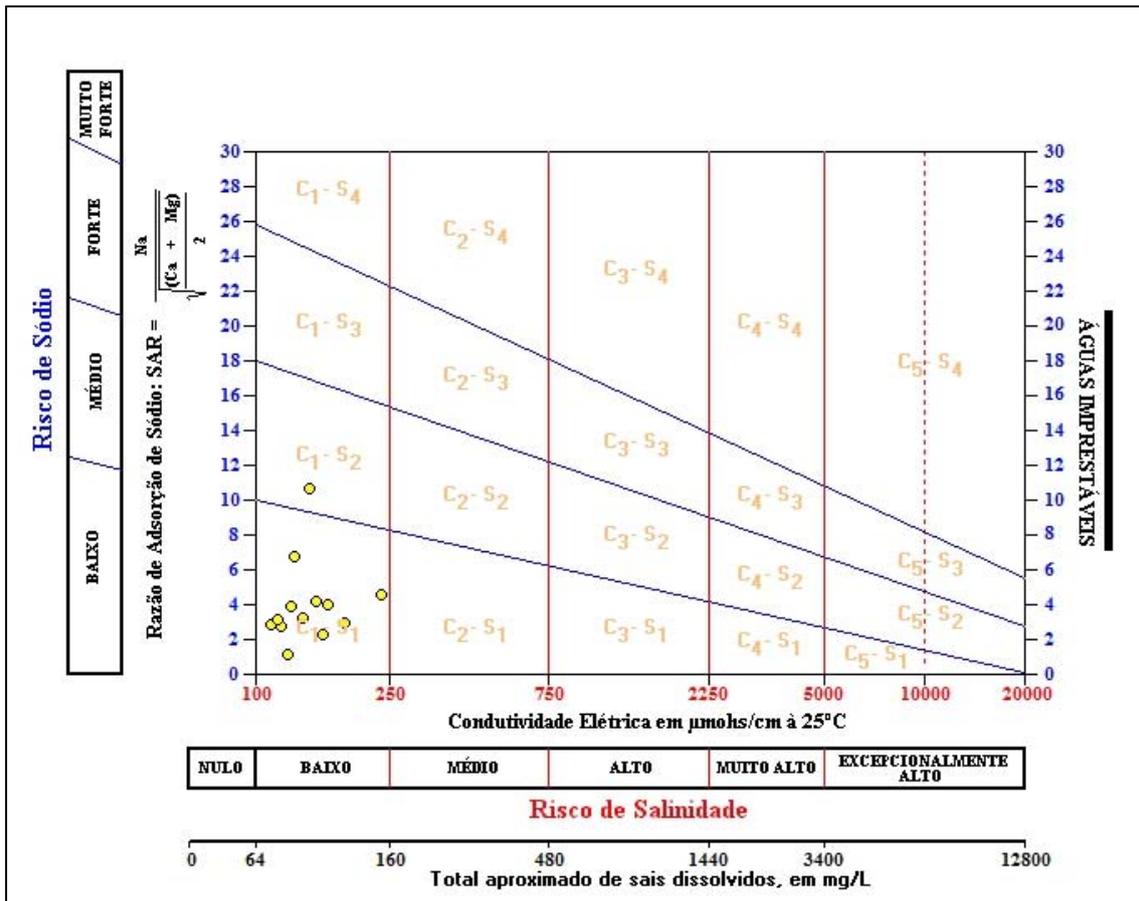
**Figura 5.62** – Classificação das águas do Aquífero Tucunaré em Macapá para fins de irrigação – Abril de 2012.

Quanto à salinidade, as amostras de abril de 2012, apresentaram em 53% dos casos a classificação C<sub>1</sub>, indicativa de que são águas de salinidade fraca, que podem ser utilizadas para irrigar a maioria das culturas, na maioria dos solos,

com pequeno risco de salinização do solo, exceto se a permeabilidade do solo for extremamente fraca; ao passo que 37% apresentaram classificação C<sub>0</sub>, que corresponde a águas de salinidade fraquíssima, que podem ser utilizadas sem restrições para irrigação. Os 10% restantes, com classificação C<sub>2</sub>, são águas de salinidade média, que devem ser usadas com precaução, podendo ser utilizadas em solos silte-arenosos, siltosos ou areno-argilosos quando houver uma lixiviação moderada do solo (figura 5.63).

**Período de estiagem**

Os resultados das amostras coletadas em outubro de 2012 revelaram que em 97% dos casos, as águas apresentaram risco de sódio baixo, o que corresponde à classificação S<sub>1</sub>, águas fracamente sódicas que podem ser usadas em quase todos os solos e servem para cultivar boa parte dos vegetais. Os 3% restantes possuem classificação S<sub>2</sub>, indicando águas medianamente sódicas, que apresentam perigo de sódio para os solos de textura fina e com forte capacidade de troca de cátions, e que podem ser utilizadas nos solos de textura grosseira ou ricos em matéria orgânica, com boa permeabilidade, como indica a figura 5.63.



**Figura 5.63** – Classificação das águas do Aquífero Tucunaré em Macapá para fins de irrigação – Outubro de 2012.

Com relação à salinidade, as amostras de outubro de 2012 apresentaram em 57% dos casos a classificação C<sub>0</sub>, que corresponde a águas de salinidade fraquíssima, que podem ser utilizadas sem restrições para irrigação; e em 43%

dos casos a classificação C<sub>1</sub>, ou seja, águas de salinidade fraca, que podem ser utilizadas para irrigar a maioria das culturas.

De modo geral, verifica-se que ambas as campanhas de amostragem apresentaram águas propícias para fins de irrigação, o que pode representar uma alternativa local de fonte de renda (**tabela 5.71**).

**Tabela 5.71** - Classificação das águas coletadas nas duas campanhas de amostragem de acordo com o risco de salinidade e de sódio, segundo USSL.

Poço	Período chuvoso (abril de 2012)			Período seco (outubro de 2012)		
	Classe USSL	Risco		Classe USSL	Risco	
		Salinidade	Sódio		Salinidade	Sódio
MPA01	C0-S1	Nulo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA02	C0-S1	Nulo	Baixo	C1-S1	Baixo	Baixo
MPA03	C0-S1	Nulo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA04	C1-S1	Baixo	Baixo	C1-S1	Baixo	Baixo
MPA05	C0-S1	Nulo	Baixo	C1-S1	Baixo	Baixo
MPA06	C2-S2	Médio	Médio	C1-S1	Baixo	Baixo
MPA07	C1-S1	Baixo	Baixo	C1-S1	Baixo	Baixo
MPA08	C1-S1	Baixo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA09	C1-S1	Baixo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA10	C1-S1	Baixo	Baixo	C1-S2	Baixo	Médio
MPA11	C0-S1	Nulo	Baixo	C1-S1	Baixo	Baixo
MPA12	C0-S1	Nulo	Baixo	C1-S1	Baixo	Baixo
MPA13	C1-S1	Baixo	Baixo	C1-S1	Baixo	Baixo
MPA14	C1-S1	Baixo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA15	C1-S1	Baixo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA16	C2-S1	Médio	Baixo	C1-S1	Baixo	Baixo
MPA17	C0-S1	Nulo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA18	C1-S1	Baixo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA19	C0-S1	Nulo	Baixo	C1-S1	Baixo	Baixo
MPA20	C0-S1	Nulo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA21	C1-S1	Baixo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA22	C0-S1	Nulo	Baixo	C1-S1	Baixo	Baixo
MPA23	C1-S1	Baixo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA24	C0-S1	Nulo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA25	C1-S1	Baixo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA26	C1-S1	Baixo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA27	C1-S1	Baixo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA28	C2-S1	Médio	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA29	C1-S1	Baixo	Baixo	C0-S1	Nulo	Baixo
MPA30	C1-S1	Baixo	Baixo	C1-S1	Baixo	Baixo

### 5.2.18.3 - Pecuária

A fim de avaliar se as águas coletadas nos trinta poços distribuídos pela área de estudo de Macapá nos períodos de abril e outubro de 2012 servem para pecuária, empregou-se a metodologia adotada por McKee & Wolf (1963), os quais determinam os limites máximos admissíveis de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) na água para cada tipo de animal, como pode ser observado na **tabela 5.72**.

**Tabela 5.72** – Padrões de STD para uso animal, segundo McKee & Wolf (1963).

Animal	STD (mg/L)
Aves	2.860
Porcos	4.290
Cavalos	6.435
Gado (leite)	7.180
Gado (corte)	10.000
Bodes e Carneiros	12.900

Sendo assim, com base na classificação acima é possível afirmar que as águas em ambos os períodos de coleta podem ser utilizadas para o consumo animal sem restrições, uma vez que os maiores teores encontrados de STD foram de 229 e 159 mg/L, respectivamente, para a 1ª e 2ª campanhas.

### 5.3 – Conclusões Gerais sobre a Qualidade das Águas Subterrâneas do Aquífero Tucunaré em Macapá

O estudo hidrogeoquímico das águas do aquífero Tucunaré na cidade piloto de Macapá indicou que de forma geral, os teores analisados se encontram em baixíssimas concentrações, devido ao clima chuvoso da Floresta Tropical Amazônica, e que alguns poucos valores extremos encontrados, inclusive acima do VMP estabelecido como de potabilidade pela Portaria MS 2914/2011, assim como, os usos preponderantes da água subterrânea definidos pela Resolução CONAMA 396/2008 se devem exclusivamente a fatores antrópicos.

Tal comportamento é facilmente identificado nos parâmetros de STD, sódio, cloreto, sulfato e nitrato, os quais no período chuvoso apresentaram altos teores quando comparados ao período de estiagem, o que se justifica, pois a área de estudo é muito plana e periodicamente é afetada por inundações, onde ocorre o transbordamento de fossas sépticas, cujos dejetos se misturam às águas superficiais, de modo que pode haver infiltração de água contaminada, no período chuvoso.

Aliado a isso, a avaliação dos parâmetros biológicos indicou a presença tanto de Coliformes totais, quanto de *E. Coli*, em ambas as campanhas, o que corresponde à contaminação das águas subterrâneas por fossas sépticas, devido à ausência de sistema de esgotamento sanitário na região, e também pelo fato de que os poços tubulares, em sua maioria são pouco profundos e construídos com técnicas inapropriadas, que deixam os espaços anelares sem a devida proteção sanitária. A ocorrência desses parâmetros biológicos é extremamente preocupante, pois pode ocasionar doenças de veiculação

hídrica na população ribeirinha, que utiliza dessas águas para os mais diversos usos, incluindo consumo humano.

Os altos teores de ferro dissolvidos em alguns pontos isolados nas águas do aquífero Tucunaré se devem a reações de oxidação-redução, atuantes sobre o ferro insolúvel residual do intemperismo químico regional resultante da alta pluviosidade associada a elevadas temperaturas e acidez das águas, as quais favoreceram a decomposição das rochas ao longo do tempo geológico.

Todas as amostras analisadas dos metais pesados arsênio, cádmio, cromo e mercúrio apresentaram teores abaixo do limite de detecção, ao passo que bário e zinco obtiveram teores abaixo do VMP definido pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

Alguns poços identificados nas proximidades de oficina mecânica e de áreas com presença de descarte inadequado de resíduos sólidos apresentaram teores de chumbo, cobre e níquel acima dos limites definidos pela Portaria MS 2914/2011 e da Resolução CONAMA 396/2008, não sendo suas águas indicadas para consumo humano.

No que se refere às análises de BTEX e fenóis todas as amostras respeitaram os limites de potabilidade definidos pela Portaria MS 2914/2011 e Resolução CONAMA 396/2008.

Os resultados dos isótopos ambientais revelaram que a recarga do aquífero Tucunaré, em Macapá, provém de águas meteóricas, de acordo com as análises de Oxigênio-18 e Deutério. Segundo as datações efetuadas com Trício as águas do aquífero estudado têm idade submoderna com recarga anterior a 1952 e mistura de água submoderna com recarga recente.

Quanto às idades convencionais de radiocarbono, há presença de águas modernas com menos de 200 anos, ou seja, águas mais rasas, e de paleoáguas com idade da ordem de 20.000 anos, o que indica águas mais profundas.

No que se refere à classificação das águas subterrâneas de acordo com a composição química é possível verificar que as águas do aquífero Tucunaré em sua maioria são Cloretadas Sódicas, e de boa potabilidade, segundo indicação dos diagramas de Piper, Stiff e Schoeller-Berkaloff.

No que concerne à avaliação das águas para irrigação verifica-se que as águas do aquífero Tucunaré possuem risco de sódio que varia de baixo a médio, e salinidade entre fraquíssima a média, indicando que as águas podem ser usadas para o cultivo de boa parte dos vegetais.

As águas podem ser utilizadas para a dessedentação animal sem restrições, haja vista que os teores de STD encontrados em ambas as campanhas foram baixíssimos.

Além dos fatores antrópicos que influenciam bastante a área de estudo, também é importante destacar o aumento significativo em alguns parâmetros, tais como, STD, sódio, potássio, magnésio, cloreto e condutividade elétrica no período chuvoso, o que sugere uma elevada quantidade de íons nas águas, indicativos da intrusão de águas marinhas, através das "áreas de ressaca" na região, que são as planícies aluviais, as quais são periodicamente inundadas

pelo rio Amazonas, que também representa uma fonte de recarga do aquífero Tucunaré. Aliado a isso, tem-se ainda a hipótese de que a recarga por precipitações se verifica, sobretudo, no trimestre maio-julho, motivo pelo qual as águas subterrâneas no período de estiagem, se apresentam mais diluídas do que no período chuvoso.

#### **5.4 - Vulnerabilidade Natural do Aquífero Tucunaré**

A avaliação da vulnerabilidade de um aquífero é um tema relativamente complexo e depende do tratamento integrado de diferentes tipos de informação colhidos na área de estudo. Essa vulnerabilidade é função, principalmente, das condições geológicas e hidrogeológicas do próprio aquífero, além da topografia e do tipo de solo. Existem atualmente vários métodos para a avaliação da vulnerabilidade de aquíferos. Alguns métodos foram idealizados para a determinação da vulnerabilidade de um aquífero a qualquer tipo de contaminante, ou seja, a vulnerabilidade geral, enquanto outros podem ser aplicados para se avaliar a vulnerabilidade de um aquífero a contaminantes específicos, tais como, resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos, etc.

Por definição, vulnerabilidade é a sensibilidade da qualidade da água subterrânea ante uma carga contaminante imposta, determinada pelas características intrínsecas do aquífero e do seu recobrimento.

Na determinação da vulnerabilidade natural ou intrínseca dos aquíferos, os métodos mais utilizados são o DRASTIC (Aller *et al.*, 1985) e o GOD (Foster & Hirata, 1988).

##### **5.4.1 – Método DRASTIC**

Foi desenvolvido por Aller *et al.* (1985) para a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos. É um dos métodos mais usados, tanto para a avaliação qualitativa quanto para o mapeamento regional, sendo considerado um bom indicador de áreas que necessitam de avaliação hidrogeológica detalhada. Baseia-se na atribuição de pesos (variáveis de 1 a 5) e de índices de classe (variáveis de 1 a 10) de acordo com as características e o comportamento das variáveis consideradas no acrônimo DRASTIC:

- D** – *Depth of water* – profundidade da água freática
- R** – *Recharge (net)* – recarga
- A** – *Aquifer media* – litologia do aquífero
- S** – *Soil media* – tipo de solo
- T** – *Topography* – declividade do terreno
- I** – *Impact of vadose zone* – litologia da zona não saturada
- C** – *Conductivity hydraulic* – condutividade hidráulica

A combinação desses parâmetros é feita através de um sistema de atribuição de índices numéricos segundo duas categorias: pesos (de 1 a 5) e classes (de 1 a 10).

A cada um dos sete parâmetros propostos pelo método é atribuído um peso de acordo com a sua influência ou importância relativa à vulnerabilidade. Esses pesos variam de 1 (menor potencial de contaminação) a 5 (maior potencial de contaminação). O maior peso (5) é atribuído à profundidade da água (D) e ao impacto da zona não saturada (I) e o menor (1) à topografia (T). Quando se

trata de pesticidas a atribuição dos pesos sofre ligeira modificação (**tabela 5.73**).

**Tabela 5.73** – Ponderação dos parâmetros do método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Parâmetro	Símbolo	Peso	Peso Pesticida
Profundidade da água	D	5	5
Recarga	R	4	4
Meio aquífero	A	3	3
Solo	S	2	5
Topografia	T	1	3
Impacto da zona não saturada	I	5	4
Condutividade hidráulica	C	3	2

No sistema de atribuição de índices de classe, indicativos do potencial de contaminação da água subterrânea, as variáveis são classificadas de acordo com a sua natureza em intervalos numéricos (aplicáveis aos parâmetros D, R, T, C) conforme mostra a **tabela 5.74**, ou em tipos de solos e tipos de rochas (aplicáveis aos parâmetros A, S, I), como se vê na **tabela 5.75**.

**Tabela 5.74** – Parâmetros classificados por faixa de variação numérica (D, R, T, C).

D		R		T		C	
Profundidade (m)		Recarga (mm/ano)		Topografia (m)		Condutividade Hidráulica (m/dia)	
Intervalo	Classe	Intervalo	Classe	Intervalo	Classe	Intervalo	Classe
0 – 1,5	10	0 – 50	1	0 -20	10	0,04 – 4	1
1,5 – 5	9	50 – 100	3	20 – 60	9	4 – 12	2
5 – 10	7	100 – 180	6	60 – 120	5	12 – 28	4
10 – 15	5	180 – 250	8	120 – 180	3	28 – 40	6
15 – 23	3	> 250	9	> 180	1	40 – 80	8
23 – 30	2					> 80	10
> 30	1						

O resultado final indicativo da vulnerabilidade de cada domínio hidrogeológico ou área geográfica é um valor numérico compreendido entre 23 e 230 obtido usando a equação seguinte:

$$\text{INDICE DRASTIC} = D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c$$

O subscrito *p* se refere ao “peso” da variável (**tabela 5.73**) enquanto que o subscrito *c* é indicativo da “classe” da variável (**tabelas 5.74 e 5.75**).

**Tabela 5.75** – Parâmetros classificados por tipo de solo ou tipo de rocha (A, S, I).

A			S		I		
Meio Aquífero			Solo		Material da Zona Não Saturada		
Tipo de rocha	Classe	Classe típica	Tipo de solo	Classe	Tipo de rocha	Classe	Classe típica
Argila compacta	1 – 3	2	Delgado ou ausente	10	Camada confinante	1	1
Metamórfica/ígnea	2 – 5	3	Cascalho	10	Silte/argila	2 – 6	3
Metamórfica/ ígnea alterada	3 – 5	4	Areia	9	Argilito	2 – 5	3
Tilito	4 – 6	5	Turfa	8	Calcário	2 – 7	6
Intercalações de arenitos, calcários e argilitos	5 – 9	6	Argila expansiva e/ou agregada	7	Arenito	4 – 8	6
Arenito compacto	4 – 9	6	Franco arenoso	6	Intercalações de argilito, calcário, arenito	4 – 8	6
Calcário compacto	4 – 9	8	Franco	5	Areia e cascalho com bastante silte e argila	4 – 8	6
Areia e cascalho	4 - 9	8	Franco siltoso	4	Metamórfica/ígnea	2 – 8	4
Basalto	2 – 10	9	Franco argiloso	3	Areia e cascalho	6 – 9	8
Calcário cárstico	9 - 10	10	Lama, lodo, vasa	2	Basalto	2 – 10	9
			Argila não expansiva e/ou não agregada	1	Carst	8 - 10	10

De acordo com o valor do índice DRASTIC a vulnerabilidade do meio aquífero pode ser classificada em:

<23	23-119	120-149	150-179	180-230
DESPREZÍVEL	BAIXA	MODERADA	ALTA	EXTREMA

Nos mapas as cores correspondentes a esses graus de vulnerabilidade são definidas de maneira a chamar a atenção para as áreas em vermelho.

O índice DRASTIC estimado para o aquífero Tucunaré, em ambos os períodos de amostragem, assim como, todos os pesos e índices das classes utilizados podem ser verificados na **tabela 5.76**.

A vulnerabilidade do aquífero Tucunaré em Macapá variou de moderada a alta, no período chuvoso (abril de 2012), onde o índice DRASTIC apresentou resultados entre 131 a 159 (**figura 5.64a**); enquanto que no período de estiagem (outubro de 2012), os resultados do índice variaram de 131 a 149, configurando a vulnerabilidade do aquífero em moderada (**figura 5.64b**).

### **Descrição do Cálculo do Índice DRASTIC**

O cálculo do índice DRASTIC é feito usando a **equação (5.3)**:

$$\text{INDICE DRASTIC} = D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c \quad (5.3)$$

Como se pode observar, a **equação 5.3** é dada pela soma dos 7 (sete) produtos dos termos correspondentes a cada um dos 7 (sete) símbolos ou letras que compõem o acrônimo DRASTIC. Para cada produto (por exemplo,  $D_p D_c$ ) a letra contém um subscrito  $p$  (obtido da coluna **peso** ou da coluna **peso pesticida**, conforme for o caso, na **tabela 5.73**) e um subscrito  $c$  (obtido da coluna **classe**, conforme mostrado nas **tabelas 5.74 e 5.75**).

No caso de Macapá, para as 7 (sete) diferentes letras, os pesos e as classes selecionadas foram:

- D → independente de efeito pesticida, o valor de  $D_p$ , ou seja, do peso da profundidade da água é igual a 5, conforme **tabela 5.73**. O valor de  $D_c$ , ou seja, da classe da profundidade da água é selecionado verificando, na respectiva coluna **intervalo** da **tabela 5.74**, em qual dos intervalos se encontra a profundidade medida do nível estático de cada poço, na primeira e na segunda campanha e daí anotando o valor da classe correspondente. Por exemplo, para uma profundidade no intervalo de 5 a 10 m,  $D_c = 7$ . Assim sendo, o produto  $D_p D_c = 5 \times 7 = 35$  como pode ser observado na **tabela 5.76**, para as profundidades do nível da água situadas nessa faixa.
- R → independente de efeito pesticida, o valor de  $R_p$ , ou seja, do peso da recarga é igual a 4, conforme **tabela 5.73**. O valor de  $R_c$ , ou seja, da classe da recarga é selecionado verificando na respectiva coluna **intervalo** da **tabela 5.74**, em qual dos intervalos se encontra a recarga estimada e daí anotando o valor da classe correspondente. Por exemplo, a recarga estimada foi de 364 mm/ano e, portanto, esse valor se encontra no intervalo > 250 mm/ano, que corresponde à classe  $R_c = 9$ . Assim sendo o produto  $R_p R_c = 4 \times 9 = 36$ , como pode ser observado na **tabela 5.76**.
- A → independente de efeito pesticida, o valor de  $A_p$ , ou seja, do peso do meio aquífero, é igual a 3, conforme **tabela 5.73**. O valor de  $A_c$ , ou seja, da classe do meio aquífero é selecionado verificando na respectiva coluna **tipo de rocha** da **tabela 5.75**, em qual dos tipos se enquadra a litologia da região e daí anotando o valor da classe correspondente. Por exemplo, em Macapá a litologia é caracterizada por intercalações de arenitos e argilitos, que se enquadram nas classes de 5 a 9 e correspondem à classe típica  $A_c = 6$ . Assim sendo o produto  $A_p A_c = 3 \times 6 = 18$ , como pode ser observado na **tabela 5.76**.
- S → O valor de  $S_p$ , ou seja, do peso do solo depende do efeito pesticida, que quando presente é igual a 5 e no caso de Macapá não

existe e por isso é igual a 2, conforme **tabela 5.73**. O valor de  $S_c$ , ou seja, da classe do solo é selecionado verificando na respectiva coluna **tipo de solo** da **tabela 5.75**, em qual dos tipos se enquadra o solo da região e daí anotando o valor da classe correspondente. Por exemplo, em Macapá o solo pode ser considerado em duas classes: franco argiloso que se enquadra na classe  $S_c = 3$  e de argila expansiva ou argila agregada na classe  $S_c = 7$  (poços MPA02, MPA13 e MPA23), assim sendo o produto  $S_p S_c = 2 \times 3 = 6$  e  $S_p S_c = 2 \times 7 = 14$ , como pode ser observado na **tabela 5.76**.

- T → O valor de  $T_p$ , ou seja, do peso da topografia depende do efeito pesticida, que quando presente é igual a 3 e no caso de Macapá não existe e por isso é igual a 1, conforme **tabela 5.73**. O valor de  $T_c$ , ou seja, da classe da topografia (declividade em m/km) é selecionado verificando na respectiva coluna **intervalo** da **tabela 5.74**, em qual dos intervalos se encontra a declividade estimada e daí anotando o valor da classe correspondente. Por exemplo, a declividade geral em Macapá foi enquadrada na faixa de 0 a 20 m/km, que corresponde à classe  $T_c = 10$ . Assim sendo o produto  $T_p T_c = 1 \times 10 = 10$ , como pode ser observado na **tabela 5.76**.
- I → O valor de  $I_p$ , ou seja, do peso do impacto da zona não saturada depende do efeito pesticida, que quando presente é igual a 4 e no caso de Macapá não existe e por isso é igual a 5, conforme **tabela 5.73**. O valor de  $I_c$ , ou seja, da classe do impacto da zona não saturada é selecionado verificando na respectiva coluna **tipo de rocha** da **tabela 5.75**, em qual dos tipos se enquadra a litologia da região e daí anotando o valor da classe correspondente. Por exemplo, em Macapá a litologia é caracterizada por ocorrência de areia e cascalho com bastante silte e argila, que se enquadram nas classes de 4 a 8, que corresponde à classe típica  $I_c = 6$ . Assim sendo o produto  $I_p I_c = 5 \times 6 = 30$ , como pode ser observado na **tabela 5.76**.
- C → O valor de  $C_p$ , ou seja, do peso da condutividade hidráulica depende do efeito pesticida, que quando presente é igual a 2 e no caso de Macapá não existe e por isso é igual a 3, conforme **tabela 5.73**. O valor de  $C_c$ , ou seja, da classe da condutividade hidráulica é selecionado verificando na respectiva coluna **intervalo** da **tabela 5.74**, em qual dos intervalos se encontra a condutividade hidráulica estimada e daí anotando o valor da classe correspondente. Por exemplo, a condutividade hidráulica estimada (6 m/dia) se encontra no intervalo de 4 a 12 m/dia, que corresponde à classe  $C_c = 2$ . Assim sendo o produto  $C_p C_c = 3 \times 2 = 6$ , como pode ser observado na **tabela 5.76**.

**Tabela 5.76 – Índice DRASTIC indicativo de vulnerabilidade DRASTIC do aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012) e de estiagem (outubro de 2012) na cidade de Macapá – AP.**

Poço	X	Y	Z	Profundidade da Água (m)		Pesos x Índices de classe							Índice DRASTIC		
				Abril/2012	Outubro/2012	5xD1	5xD2	4xR	3xA	2xS	1xT	5xI	3xC	Chuvoso	Estiagem
MPA01	-51,0509	0,0292	17	10	13,35	25	25	36	18	6	10	30	6	131	131
MPA02	-51,0403	0,0963	22	8	11,82	35	25	36	18	14	10	30	6	149	139
MPA03	-51,0862	0,0923	32	7,25	11,6	35	25	36	18	6	10	30	6	141	131
MPA04	-51,0628	0,0730	29	6,7	11,6	35	25	36	18	6	10	30	6	141	131
MPA05	-51,0542	0,0472	22	4,78	8,22	45	35	36	18	6	10	30	6	151	141
MPA06	-51,0542	0,0547	17	4,15	6,85	45	35	36	18	6	10	30	6	151	141
MPA07	-51,0632	0,0126	14	3,28	5,34	45	35	36	18	6	10	30	6	151	141
MPA08	-51,0898	0,0048	15	6,4	8,57	35	35	36	18	6	10	30	6	141	141
MPA09	-51,0725	0,0068	11	4,24	8,69	45	35	36	18	6	10	30	6	151	141
MPA10	-51,0760	0,0417	20	3,9	6,65	45	35	36	18	6	10	30	6	151	141
MPA11	-51,0748	0,0288	21	5,75	7,92	35	35	36	18	6	10	30	6	141	141
MPA12	-51,0713	0,0198	20	5,74	8	35	35	36	18	6	10	30	6	141	141
MPA13	-51,0439	0,0785	29	2,45	6,45	45	35	36	18	14	10	30	6	159	149
MPA14	-51,1341	0,0776	27	7,1	10,94	35	25	36	18	6	10	30	6	141	131
MPA15	-51,0591	0,0383	24	3,45	6,35	45	35	36	18	6	10	30	6	151	141
MPA16	-51,0832	0,0376	23	8,1	10,88	35	25	36	18	6	10	30	6	141	131
MPA17	-51,0930	0,0367	49	7,9	11,32	35	25	36	18	6	10	30	6	141	131
MPA18	-51,1194	0,0454	22	8,42	12,98	35	25	36	18	6	10	30	6	141	131
MPA19	-51,1329	0,0421	17	4,67	8,92	45	35	36	18	6	10	30	6	151	141
MPA20	-51,0698	0,0496	17	8,5	12,33	35	25	36	18	6	10	30	6	141	131
MPA21	-51,0664	0,0910	21	8,38	10,6	35	25	36	18	6	10	30	6	141	131
MPA22	-51,0847	0,1039	29	5,5	7,85	35	35	36	18	6	10	30	6	141	141
MPA23	-51,0468	0,1020	35	4,2	6,98	45	35	36	18	14	10	30	6	159	149
MPA24	-51,0918	0,0719	17	9,62	12,5	35	25	36	18	6	10	30	6	141	131
MPA25	-51,0815	0,0773	24	6,48	9,52	35	35	36	18	6	10	30	6	141	141
MPA26	-51,0543	0,1140	16	5,6	8,95	35	35	36	18	6	10	30	6	141	141
MPA27	-51,1173	0,0910	18	4,8	8,85	45	35	36	18	6	10	30	6	151	141
MPA28	-51,0992	0,0889	17	4,67	8,75	45	35	36	18	6	10	30	6	151	141
MPA29	-51,0488	0,0851	15	4,93	9,27	45	35	36	18	6	10	30	6	151	141
MPA30	-51,0643	0,1040	28	3,6	5,75	45	35	36	18	6	10	30	6	151	141

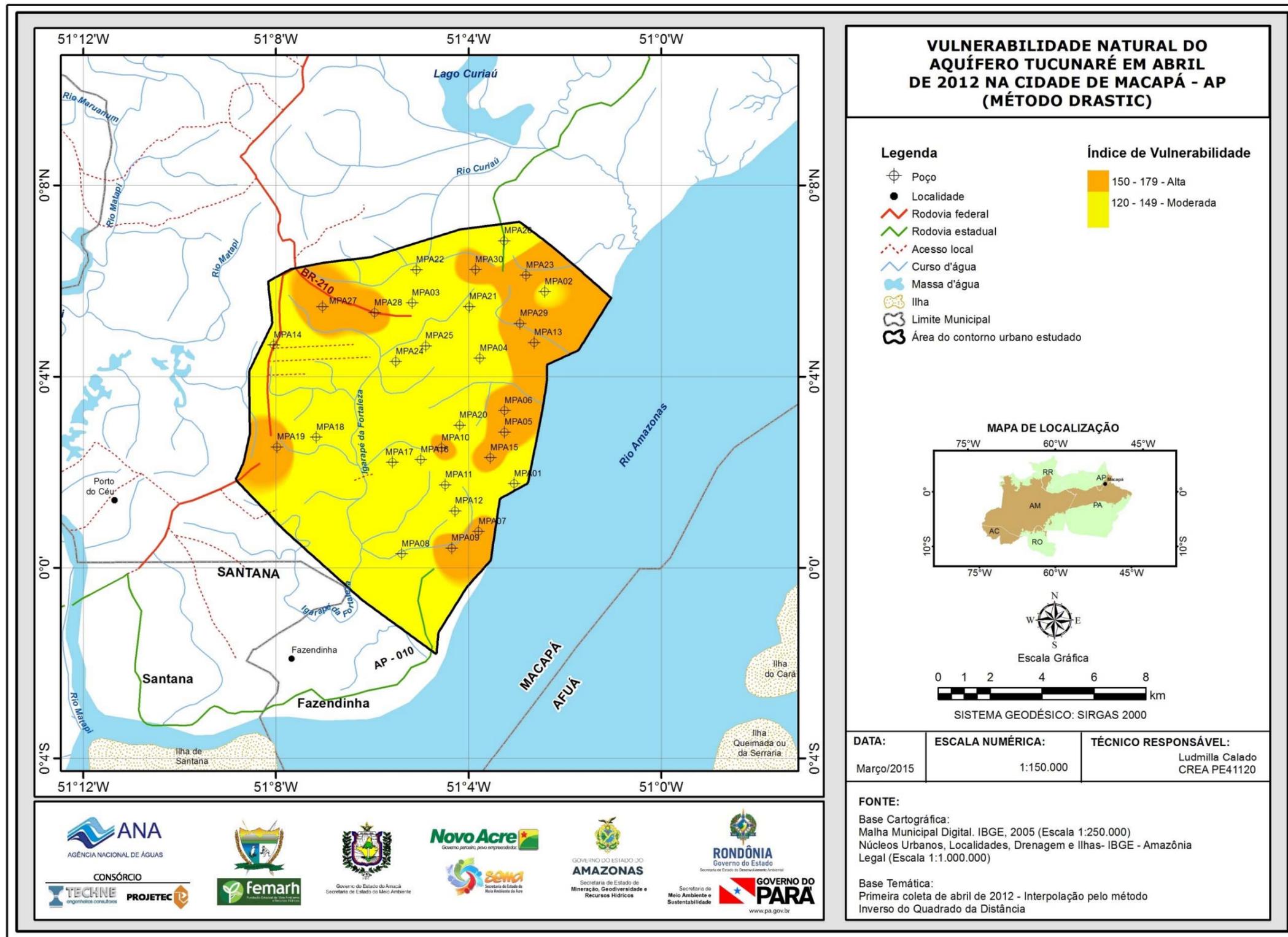


Figura 5.64a – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá na coleta de abril de 2012 – Método DRASTIC.

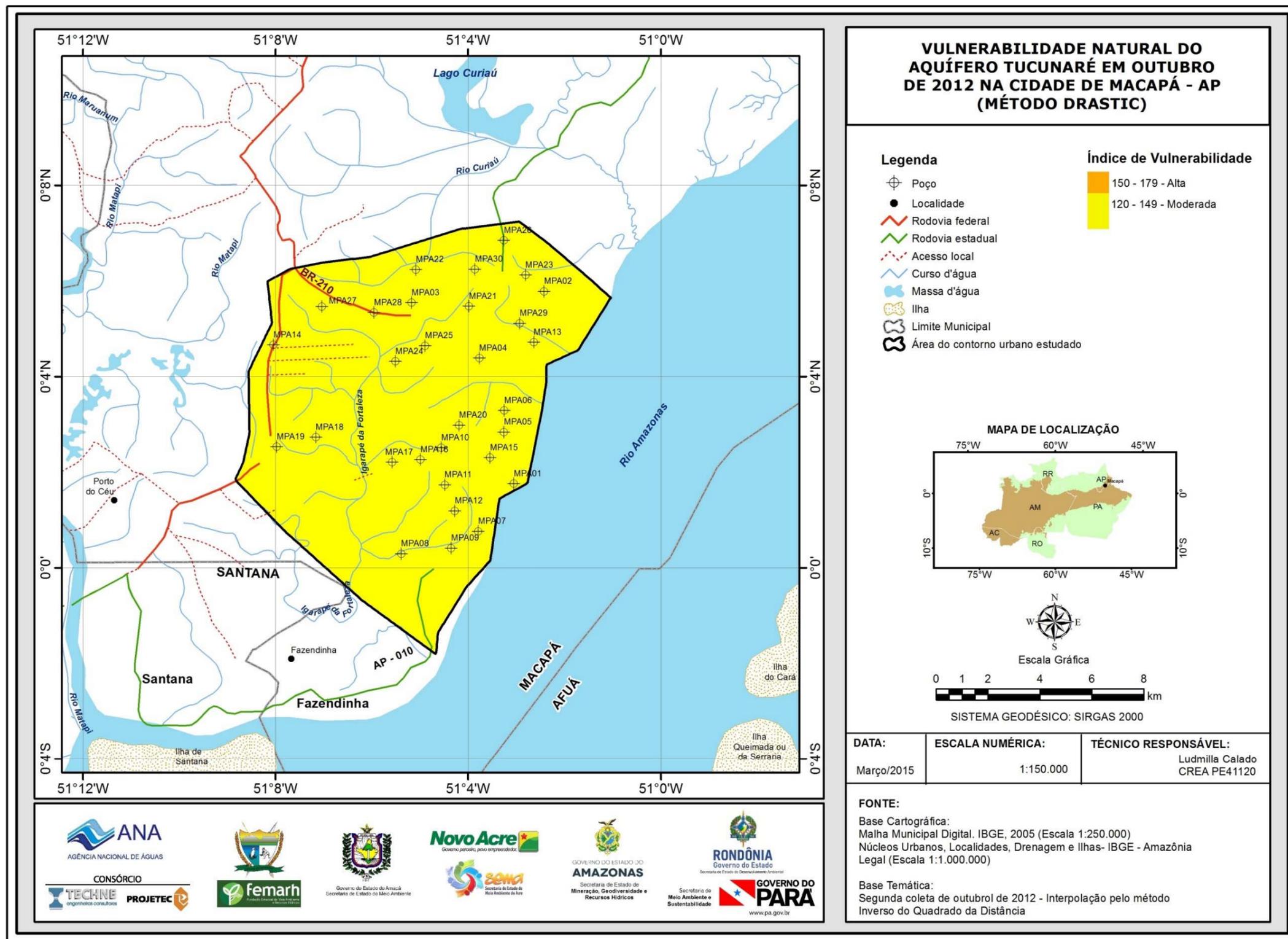
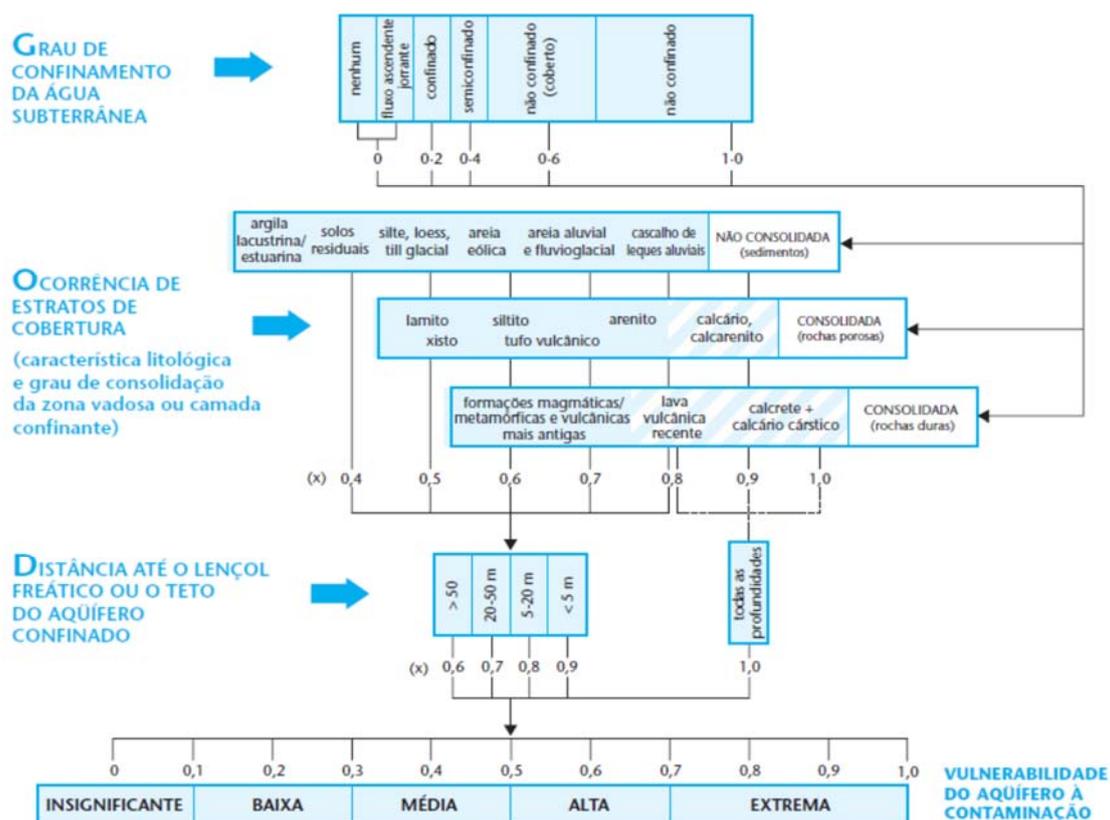


Figura 5.64b – Zoneamento da vulnerabilidade do aquífero Tucunaré na zona urbana de Macapá coleta de outubro de 2012 – Método DRASTIC.

## 5.4.2 – Método GOD

Outro método mais simples e mais adequado para estudos de reconhecimento e avaliações regionais, é o GOD (Foster & Hirata, 1988), que utiliza como parâmetros para a avaliação da vulnerabilidade apenas três características envolvendo o aquífero e seu recobrimento (**figura 5.65**): **Groundwater occurrence** – Tipo de aquífero; **Overall Aquifer Class** – Litologia do aquífero; e **Depth** – Profundidade da água do aquífero.



**Figura 5.65** - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster & Hirata, 1988).

O procedimento recomendado pelo método GOD para a estimativa da vulnerabilidade natural de um aquífero à contaminação envolve três estágios distintos:

- Primeiro: avaliar o parâmetro **G** com base na condição hidráulica da água subterrânea, ou seja, de acordo com o tipo de aquífero (**tabela 5.77**).
- Segundo: avaliar o parâmetro **O** de acordo com a ocorrência dos estratos de cobertura da zona saturada do aquífero e natureza da sua litologia, conforme **tabela 5.78**.
- Terceiro: estimar o parâmetro **D** considerando a profundidade até a superfície freática (**tabela 5.79**).

**Tabela 5.77 – Valores para o parâmetro G do índice GOD (Foster, 1987).**

Parâmetro G (ocorrência de águas subterrâneas)	Valor
Nenhum	0
Confinado artesianosurgente (não drenante)	0,1
Confinado não surgente (não drenante)	0,2
Confinado drenante coberto (semi-confinado)	0,3
Confinado drenante (semi-confinado)	0,4
Não confinado coberto (freático)	0,6
Não confinado (freático)	1

**Tabela 5.78 – Valores para o parâmetro O do índice GOD (Foster, 1987).**

Parâmetro O (Classificação do material sobre o aquífero)	Valor
<b>Rochas não consolidadas</b>	
Solos residuais (argila, argila siltosa, silte argiloso)	0,4
Aluviões siltsos	0,5
Areias eólicas	0,6
Areias e cascalheiras aluvionares e fluviais	0,7
Cascalheiras coluvionares	0,8
<b>Rochas consolidadas (Rochas Porosas)</b>	
Argilitos	0,5
Siltitos	0,5
Tufos vulcânicos	0,7
Arenitos	0,8
Calcários e calcarenitos	0,9
<b>Rochas consolidadas (Rochas Duras)</b>	
Xistos	0,5
Formações ígneas/metamórficas	0,6
Lavas vulcânicas recentes	0,8
Outros calcários	1,0

**Tabela 5.79 – Valores para o parâmetro D do índice GOD (Foster, 1987).**

Parâmetro D (Profundidade da água subterrânea)	Valor
> 50 m	0,6
20-50 m	0,7
5-20 m	0,8
< 5 m	0,9

### Descrição do Cálculo do Índice GOD

O cálculo do índice GOD é feito usando a **equação (5.4)**:

$$\text{INDICE GOD} = G \times O \times D \quad (5.4)$$

No caso de Macapá, para as 3 (três) diferentes letras ou símbolos do acrônimo GOD, os valores a elas relacionados, foram:

- $G \rightarrow$  O aquífero Tucunaré é interpretado como de aquífero livre (não confinado). Para essa condição o valor do parâmetro  $G$  varia de 0,6 a 1,0 (**tabela 5.77**), o que levou a adotar como melhor alternativa, o valor médio de  $G = 0,8$ .
- $O \rightarrow$  A litologia do aquífero é composta por aluviões siltsos representados pela ocorrência de argilitos ( $O = 0,5$ ), siltitos ( $O = 0,5$ ) e arenitos ( $O = 0,8$ ), o que justifica a adoção do valor médio de  $O = 0,6$  (**tabela 5.78**).
- $D \rightarrow$  Com o valor da profundidade do nível de água do aquífero Tucunaré, medido nas campanhas de campo, se pode selecionar na **tabela 5.79**, o respectivo intervalo e nele o valor de  $D$  correspondente. Por exemplo, para uma profundidade no intervalo de 5 a 20 m, o valor  $D = 0,8$ . No caso de Macapá, o parâmetro  $D$  variou entre 0,9 (níveis estáticos  $< 5$  m) e 0,8 (níveis estáticos  $\geq 5$  e níveis estáticos  $< 20$  m).

O resultado do produto destes três parâmetros é colocado em termos qualitativos em índice de vulnerabilidade, segundo a **tabela 5.80**, em extrema; alta; média; baixa e insignificante.

**Vulnerabilidade baixa** - significa que o aquífero é vulnerável a apenas compostos extremamente móveis e persistentes, como sais, nitratos e alguns solventes organo-sintéticos.

**Vulnerabilidade média** - o aquífero é susceptível a contaminantes moderadamente móveis e persistentes, como hidrocarbonetos halogenados ou não e alguns metais pesados. Sais menos solúveis são também incluídos nesse grupo.

**Vulnerabilidade alta** - indica aquífero vulnerável a muitos contaminantes exceto aqueles que são muito absorvíveis e/ou facilmente transformáveis.

**Vulnerabilidade extrema** - aplicável ao aquífero que possui sensibilidade para contaminantes degradáveis, como bactérias e vírus, sendo vulnerável a maioria dos contaminantes da água com um impacto relativamente rápido em muitos cenários de poluição.

**Tabela 5.80** – Índices GOD e classes de vulnerabilidade.

Índice GOD	Grau de vulnerabilidade
0,7 -1,0	Extrema
0,5 - 0,7	Alta
0,3 - 0,5	Média
0,1 - 0,3	Baixa
0,0 - 0,1	Insignificante

Mediante avaliação dos parâmetros utilizados pelo método GOD foi possível estimar o Índice de Vulnerabilidade Natural do Aquífero Tucunaré na cidade de Macapá, o qual assumiu valores que variaram de 0,38 a 0,43 na primeira campanha (abril de 2012) e um valor constante de 0,38 na segunda campanha (outubro de 2012), como apresentado na **tabela 5.81**.

**Tabela 5.81** - Parâmetros para avaliação do Índice de Vulnerabilidade GOD do aquífero Tucunaré em Macapá.

Poço	X	Y	Z	Profundidade do nível d'água		Índices					
				NE1	NE2	G	O	D (IV1)*	D(IV2)**	IV1	IV2
MPA04	493014	8070	17,3	6,7	5,34	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA27	486952	10058	23,4	4,8	5,75	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA08	490004	529	4,5	6,4	6,345	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA28	488961	9825	16,7	4,67	6,445	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA06	493972	6050	17,4	4,15	6,65	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA17	489656	4056	12,4	7,9	6,85	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA15	493424	4234	7,5	3,45	6,98	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA14	485084	8578	21,6	7,1	7,85	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA07	492987	1392	13,4	3,28	7,92	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA18	486717	5023	18	8,42	8	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA20	492235	5483	17,5	8,5	8,22	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA21	492614	10061	18,3	8,38	8,57	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA05	493966	5216	16,5	4,78	8,685	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA26	493961	12601	16,7	5,6	8,75	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA25	490928	8547	16,4	6,48	8,845	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA11	491681	3184	15,3	5,75	8,915	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA24	489780	7945	14,2	9,62	8,95	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA16	490748	4159	14,8	8,1	9,265	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA23	494795	11269	19,2	4,2	9,52	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA13	495112	8677	7,2	2,45	10,595	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA09	491931	747	5,4	4,24	10,88	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA22	490574	11479	7,3	5,5	10,935	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA10	491549	4614	18,3	3,9	11,32	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA19	485209	4651	14,8	4,67	11,595	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA03	490409	10206	18	7,25	11,6	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA02	495515	10638	11,4	8	11,82	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA12	492067	2186	18	5,74	12,33	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38
MPA30	492846	11490	18,3	3,6	12,5	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA29	494568	9411	6,5	4,93	12,98	0,8	0,6	0,9	0,8	0,43	0,38
MPA01	494340	3232	3,7	10	13,35	0,8	0,6	0,8	0,8	0,38	0,38

\*D(IV1) – valor do parâmetro D usado no cálculo do índice de vulnerabilidade da primeira campanha (IV1)

\*\*D(IV2) – valor do parâmetro D usado no cálculo do índice de vulnerabilidade da segunda campanha (IV2)

### **Zoneamento da Vulnerabilidade do Aquífero Tucunaré – Método GOD**

A distribuição espacial dos resultados corresponde à vulnerabilidade média, em ambos os períodos de coleta: abril de 2012 (**figura 5.66a**) e outubro de 2012 (**figura 5.66b**).

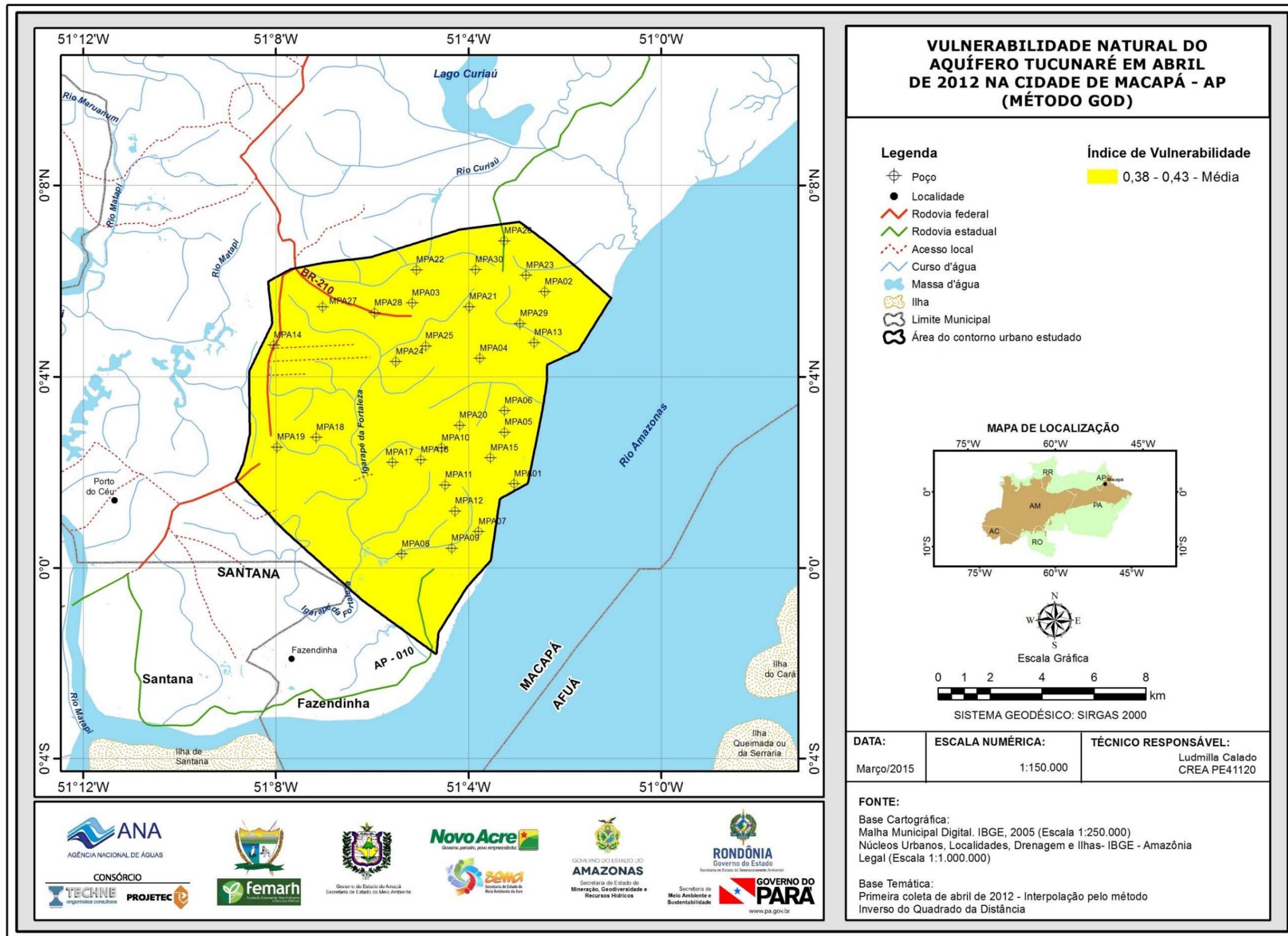


Figura 5.66a – Distribuição espacial da vulnerabilidade média do Aquífero Tucunaré no período chuvoso (abril de 2012) na cidade de Macapá – AP pelo método GOD.

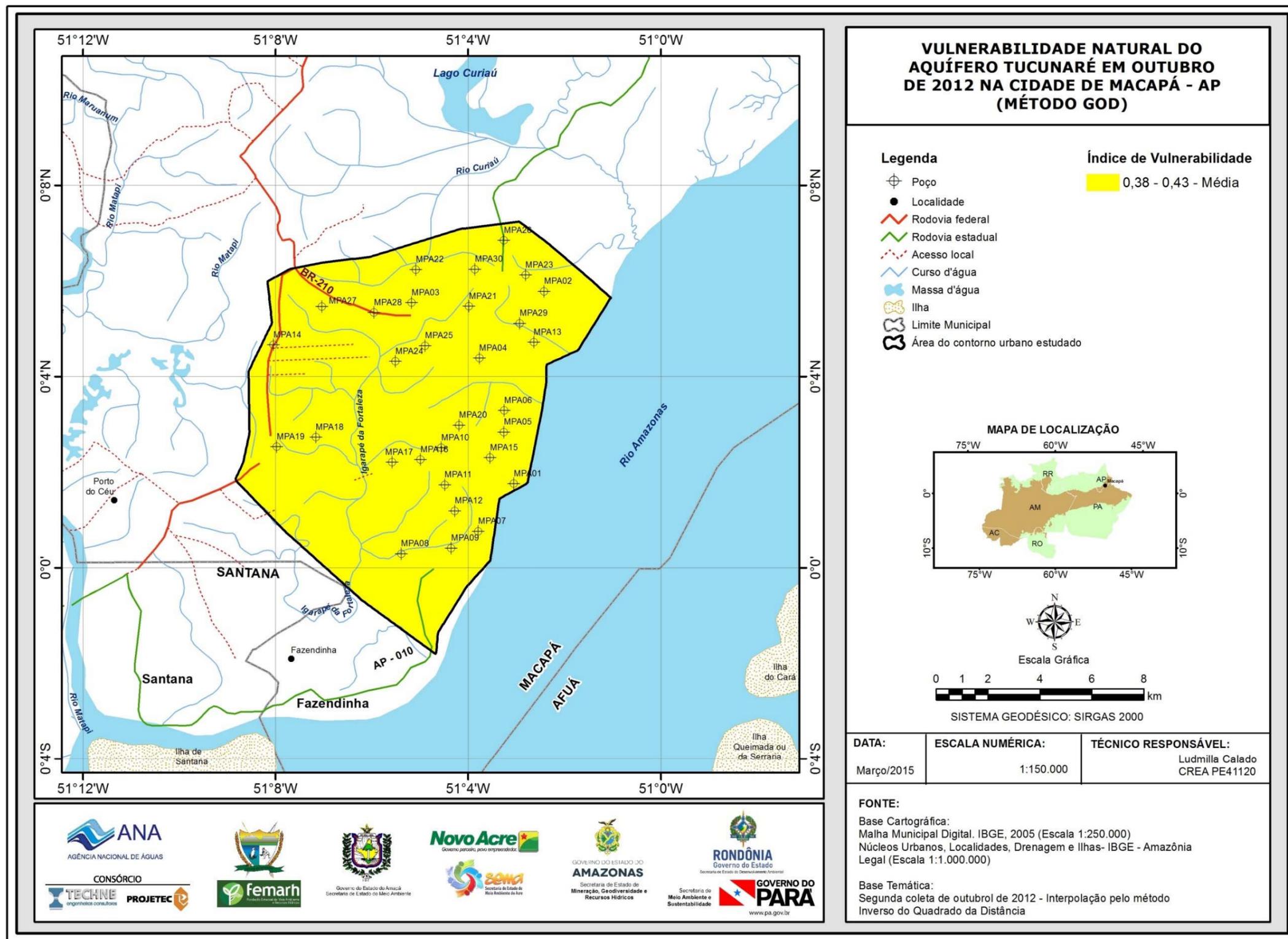


Figura 5.66b – Distribuição espacial da vulnerabilidade média do Aquífero Tucunaré no período seco (outubro de 2012) na cidade de Macapá – AP pelo método GOD.

### 5.4.3 - Conclusão sobre a vulnerabilidade natural

No período chuvoso os índices de vulnerabilidade do método DRASTIC sugerem para o aquífero Tucunaré uma **vulnerabilidade moderada** em 57% (17/30) dos poços e **alta** em 43% (13/30) dos poços (**figura 5.64a**). No período de estiagem, em 100% dos poços a vulnerabilidade se caracteriza como **moderada** (**figura 5.64b**).

Pelo método GOD, tanto no período chuvoso quanto na estiagem, no ano de 2012, os índices de vulnerabilidade se mantiveram na faixa de 0,38 a 0,43 (**figuras 5.66a e 5.66b**), indicando que a vulnerabilidade do aquífero Tucunaré na área de estudo pode ser classificada como **média**.

## **6. Referências Bibliográficas**

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil: 2013**. Brasília: ANA, 2013. 432p.

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J. Drastic: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. **United States Environmental Protection Agency (EPA)**, USA, 600/2-85/018, 1985.

APPELO, C. A. J.; POSTMA, D. **Geochemistry, groundwater and pollution**. USA: CRC Press, 1993, 536p.

BARBOSA, J. P. O.; CHAVES, C. L.; NETO, M. C. C.; ANJOS, G. C.; COSTA, L. T. R. **Mapa Geológico Folha Macapá - NA.22-Y-D. Escala 1:250.000**. Brasília: CPRM. CD-ROM. 2013.

BARCELONA, M. J.; GIBB, J. P.; HELFRICH, J. A.; Garske, E. E. Practical Guide for Ground-Water Sampling. **Illinois State Water Survey Champaign**, Illinois - USA, 1985.

BATU, V. **Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis**. USA: John Wiley & Sons, 1998. 752p.

BITENCOURT, D. P.; QUADRO, M. F. L.; NURI, O. C. Análise de dois casos de ressaca no litoral da região Sul no verão de 2002. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002, Foz do Iguaçu - PR. **Anais**. Foz do Iguaçu: SBMET, 2002. p.3910-3917.

BOHN, H. L. Redox potentials. **Soil Science**, v. 112, nº 1, p.39-45, 1970.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Resolução CONAMA nº 396, de 03 de abril de 2008**. Brasília, DF, Diário oficial da União nº 66, de 07 de abril de 2008, Seção 1, páginas 64-68.

BRITO, F. V.; OLIVEIRA, A. S.; NEVES, H. C.; AZEVEDO, J. A. T.; BHERING, D. L.; REIS, S. M.; MACHADO, M. C. S.; AZEVEDO, G. C.; CARVALHAES, G. K. Estudo da Contaminação de Águas Subterrâneas por BTEX oriundas de postos de distribuição no Brasil. In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005, Salvador – BA. **Anais**. Salvador: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP) e UNIFACS, 2005.

CAMPOS, T. S.; ROHLFS, D. B. Avaliação dos valores de nitrato em águas subterrâneas e sua correlação com atividades antrópicas no município de Águas Lindas de Goiás. In: V Mostra de Produção Científica da Pós-Graduação Lato Sensu da PUC Goiás, 2010, São Paulo - SP. **Anais**. São Paulo: PUC, 2010.

CELLIGOI, A. Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas. **Revista Geografia**, Londrina, vol. 8, n. 1, p. 91-97, 1999.

CLARK, I.; FRITZ, P. **Environmental Isotopes in hydrogeology**. USA: Lewis Publishers, 1997. 328p.

COLVARA, J. G.; LIMA, A. S.; SILVA, W. P. Avaliação da contaminação de água subterrânea em poços artesianos no sul do Rio Grande do Sul. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, II SSA, 2009.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Ficha de Informação Toxicológica: Níquel e seus compostos**. São Paulo: Divisão de Toxicologia, Genotoxicidade e Microbiologia Ambiental, 2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Ficha de Informação Toxicológica: Zinco**. São Paulo: Divisão de Toxicologia, Genotoxicidade e Microbiologia Ambiental, 2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Ficha de Informação Toxicológica: Fenol**. São Paulo: Divisão de Toxicologia, Genotoxicidade e Microbiologia Ambiental, 2010.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo - Série Relatórios - Apêndice A: Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2009. 43p.

COOPER, H. H. Jr.; JACOB, C. E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field story. **Transactions Am. Geophysical Union**, USA, vol. 27, p.526-534, 1946.

COSTA, J. B. S.; HASUI, Y.; BEMERGUY, R. I.; SOARES JUNIOR, A. V.; VILLEGAS, J. M. Tectonic and Paleogeography of the Marajó Region, Northern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 74, p.519-531. 2002.

COSTA, M. R. M.; ÁVILA, P. F. **Geoquímica das águas subterrâneas: Parte I: Reações de equilíbrio: conceitos teóricos e exercícios de aplicação**. Vila Real: UTAD, 2010.

CRAIG, H. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science, New Series*, vol. 133, nº 3465, p.1702-1703, 1961.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia Subterrânea**. Madrid: Omega, vol. 2, 1983. 2359p.

DEUTSCH, C.V.; JOURNAL, A. G. GSLIB. **Geostatistical Software Library and User's Guide**. Oxford University Press, 1998. 1 CD-ROM.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 602p.

FARACO, M. T. L.; MARINHO, P. A. C.; COSTA, E. J. S.; VALE, A. G. Folha NA.22- MACAPÁ e NB.22. IN: SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J. H.; SANTOS, J. O. S.; ABRAM, M. B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G. M. M.; VIDOTTI, R. M.; RAMOS M. A. B.; JESUS, J. D. A. (EDS.). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**. Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. Brasília: CPRM. CD-ROM. 2004.

FAZZIO, A. L.; SILVA, F. V.; XAVIER, H. V. S.; FERREIRA, I. V. L.; FREIRE, C. C. Avaliação da Contaminação das Águas Subterrâneas na Cidade de Maceió. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande - MS. **Anais**. Campo Grande: ABAS, 2009. p.1-18.

FEITOSA, F. A. C.; Manoel Filho, J. (Org.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM-UFPE, 2000. 412p.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Org.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM – LABHID, 2008. 812p. 3ª Edição.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação. 1999. 212p. **Tese de Doutorado em Computação Aplicada** - INPE, São José dos Campos, 1999.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. New York: Prentice Hall, 1994. 691p.

FORTUNATO, J. M. **Comportamento dos íons chumbo, cobre, níquel e zinco em área de manguezal associado a antigo lixão no município de Santos - SP**. 2009. 64 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências - USP, São Paulo, 2009.

FOSTER, S. S. D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: VAN DUIJVANBOODEN, W.; VAN WAEGENINGH, H. G. (Eds.). **Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution, Proceedings and Information**. Nº. 38 of the International Conference held in the Netherlands, in 1987, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. Lima: Pan American center for sanitary engineering and environmental sciences (CEPIS), 1988. 88 p.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS - FUNCEME. **Software Qualigraf**, 2010.

GALVÃO, M. V. G. **Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Marajó**. Aracaju: Fundação Paleontológica Phoenix, 2004. (Série Bacias Sedimentares brasileiras, ano 6, n. 7).

GONÇALVES, K. M. **Caracterização da dinâmica da comunidade de bacterioplâncton no estuário do rio Amazonas (Canal do Norte) – AP.** 2009. 94p. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical da Universidade Federal do Amapá) - Universidade Federal do Amapá – UNIFAP, Macapá, 2009.

GOOVAERTS, P. **Applied Geostatistics Series: Geostatistics for Natural Resources Evaluation.** New York: Oxford, 1997. 489p.

HEM, J. D. Restraints on dissolved ferrous iron imposed by bicarbonate, redox potential, and pH. **U.S. Geological Survey Water-Supply Paper**, 1459-B, p.33-55, 1960.

HEM, J. D. **Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water.** USA: U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 2254, 1985. 248p.

HINDI, E. C. Caracterização hidroquímica e hidrogeológica das fontes cársticas das bacias dos rios Tumiri, Água Comprida, Fervida e das Onças – Colombo - PR. **Boletim Paranaense de Geociências.** Editora da UFPR, n.9, p. 95-114, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico de 2010.** Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 30 maio 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Dados da Base do INMET.**

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Normais Climatológicas do Brasil: 1961-1990.** Brasília: INMET, 2009. 465p.

KAO, C. M.; WANG, C. C. Control of BTEX Migration by Intrinsic Bioremediation at a Gasoline Spill Site. **Water Research**, vol. 34, n.13, p. 3413-3423, 2000.

KAUFMAN, S.; LIBBY, W. F. The natural distribution of tritium. **Phys. Review**, vol. 93, nº 6, p.1337-1344, 1954.

KEITH, L. H. **Compilation of Epa's Sampling and Analysis Methods.** USA: CRC Press, 1996. 1696p.

KUNTASAL, O. O.; KARMAN, D.; WANG, D.; TUNCEL, S. G.; TUNCEL, G. Determination of volatile organic compounds in different microenvironments by multibed adsorption and short-path thermal desorption followed by gas chromatographic-mass spectrometric analysis. **Journal of Chromatography**, vol.1099, n.1-2, p.43-54, 2005.

LENZI, E.; FAVERO, L. O. B.; LUCHESE, E. B. **Introdução à Química da Água: Ciência, vida e sobrevivência.** Rio de Janeiro: LTC, 2009.

LIMA, H. N.; MELLO, J. W. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C. Dinâmica da mobilização de elementos em solos da Amazônia submetidos à inundação. **Revista Acta Amazônica**, Manaus - AM, vol.35, nº 3, p.317-330, 2005.

LIMA, M. I. C.; BEZERRA, P. E. L.; ARAÚJO, H. J. T. Sistematização da Geologia do Estado do Amapá. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3, 1991, Belém - PA. **Anais**. Belém: SBG, 1991. p.322-335.

LOGAN, J. **Interpretação de análises químicas d'água**. Recife: U.S Agency for International Development - USAID, 1965. 67p.

LOPES, F. C. C.; LIMA, J. R.; LIMA, J. O. G.; FRANÇA, A. M. M.; LOIOLA, H. G.; LEITÃO, J. C. Comportamento anual da alcalinidade em águas subterrâneas de Crateús - CE. In: 5º Congresso Norte-Nordeste de Química & 3º Encontro Norte-Nordeste de Ensino de Química, 2013, Natal - RN. **Anais**. Natal: UFRN, 2013.

MANOEL FILHO, J. **Modernas Técnicas de Avaliação e Produção de Água Subterrânea**. Recife: UFPE, 2007. 88p.

MCKEE, J. E.; WOLF, H. W. Water Quality Criteria. **State Water Quality Control Board**, Sacramento, California, Pub. 3-A, 1963.

MELLO, F. A. F.; BRASIL SOBRINHO, M. O. C.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R. I.; NETTO, A. C.; KIEHL, J. **Fertilidade do solo**. São Paulo: Ed. Distribuidora, 1984. 400p.

MERKEL, B. J.; FRIEDRICH, B. P. **Groundwater geochemistry: a Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems**. USA: Springer, 2008. 230p.

METCALF & Eddy, Inc. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse**. New York: McGraw-Hill, 1991.

MONTEIRO, I. L. G.; GIODA, A. Estudo da composição química de aerossóis e precipitação coletados na Região Amazônica e sua correlação com fontes locais e transporte de longa distância. In: PIBIC - Programa Institucional de Iniciação Científica do CNPq, XIX, 2011, Rio de Janeiro - RJ. **Anais**. Rio de Janeiro: PUC, 2011. 8p.

MÜNNICH, K. O. Messungs des  $^{14}\text{C}$  gehaltes von hartem grundwasser. **Naturwiss**, 44, p. 32-39, 1957.

NARCISO, M. G.; GOMES, L. P. Qualidade da água subterrânea para abastecimento público na Serra das Areias, Aparecida de Goiânia - GO. **Revista Técnica da Sanepar**, Curitiba, vol.21, nº 21, p.4-18, 2004.

NEUMAN, S. P. **Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response**. USA: Water Resources Research, vol. 11, nº 1, p.329-342, 1975.

NIELSEN, D. M.; NIELSEN, G. L. **The Essential Handbook of Ground-water Sampling**. New York: CRC Press, 2007. 310 p.

OBIEFUNA, G. I.; SHERIFF, A. Assessment of Shallow Ground Water Quality of Pindiga Gombe Area, Yola Area, NE, Nigeria for Irrigation and Domestic Purposes. **Research Journal of Environmental and Earth Sciences**, vol.3, p.131-141, 2011.

OLIVEIRA, M. J.; SOUTO, F. A. F.; ROSÁRIO, J. M. L.; SACASA, R. J. V.; MOURA, H. P. Vulnerabilidade natural e sazonalidade do aquífero livre no loteamento Marabaixo-III, Macapá-AP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, 2004, Cuiabá - MT. **Anais**. Cuiabá: ABAS, 2004. p.277.

PARRON, L. M.; MUNIZ, D. H. F.; PEREIRA, C. M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2011. 67p.

PEREIRA, P. Macapá, a capital sem água nem esgoto. *Jornal O Estado de São Paulo*, São Paulo, 03 set. 2013. Disponível em: <<http://marsemfim.com.br/macapa-a-capital-sem-agua-nem-esgoto-03092013/>>. Acesso em: 03 abril 2014.

PEREIRA, S.; CAVALCANTE, I. N.; GOMES, D. F.; GOMES, M. C. R.; MOURA, I. B. M. A qualidade das águas subterrâneas na porção Oeste da faixa costeira do município de Fortaleza, Ceará. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2008, Natal - RN. **Anais**. Natal: ABAS, 2008. p.1-16.

PULS, R. W.; BARCELONA, M. J. Ground Water Sampling for Metals Analysis. In: BOULDING, J. R. (Edited by). **EPA - Environmental Assessment Sourcebook**. USA: Ann Arbor Press, p.337-345, 1989.

RESENDE, A. V. **Agricultura e qualidade da água: contaminação da água por nitrato**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2002. 29p.

ROSSETTI, D. F.; VALERIANO, M. M. Evolution of the lowest amazon basin modeled from the integration of geological and SRTM topographic data. **Catena**, 70, p.253–265. 2007.

SANTOS FILHO, H. **Mapeamento e classificação das áreas de ressaca na região metropolitana de Macapá utilizando imagens do satélite CBERS-2B**. 2011. 125f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.

SANTOS, V. F.; COSTA, W. J. P.; SILVA, M. S.; SILVEIRA, O. F. M.; TORRES, A. M.; SILVA, A. Q.; MARTINS, M. H. A. **Projeto: Zoneamento Ecológico-Econômico do Setor Costeiro Estuarino do Estado do Amapá - ZEEC-AP. Tema I - Meio Natural: Capítulo 2 – Geologia**. Amapá: IEPA, 2004.

SCHMIDT, C. A. B. **Remediação in situ de solos e águas subterrâneas contaminados por líquidos orgânicos não miscíveis em água (NAPLs). Série Temática: Resíduos Sólidos e Geotecnia Ambiental – Volume 1.** Rio de Janeiro: COAMB / FEN / UERJ / 2010. 62 p.

SCHOELLER, H. **Géochimie des Eaux Souterraines.** Paris: Revue de l'Institut Français du Pétrol, vol. 10, p. 230-244, 1955.

SCHOELLER, H. **Les Eaux Souterraines.** Paris: Masson, 1962.

SCHWARZBACH, M. S. R.; MORANDI, I. C. Avaliação da variabilidade temporal das características físicoquímicas das águas subterrâneas dos poços tubulares profundos do município de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. In: 1st Joint World Congress on Groundwater, 2000, Fortaleza – CE. **Anais.** Fortaleza: ABAS, 2000. p.1-18.

SECRETARIA DO ESTADO DO MEIO AMBIENTE DO AMAPÁ - SEMA. **Ressacas, por que protegê-las?** Amapá: SEMA-AP, 2006. 24p.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. Sistema de Informações de **Águas Subterrâneas - SIAGAS.** Brasília: CPRM, 2010. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>>. Acesso em: 30 out 2010.

SILVA, F. A. S. ASSISTAT: versão 7.7. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

SILVA, R. C. A.; ARAÚJO, T. M. Qualidade da água do manancial subterrâneo em áreas urbanas de Feira de Santana (BA). **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, vol.8, n.4, p.1019-1028, 2003.

SNOEYINK, V. L.; JENKINS, D. **Water Chemistry.** New York: John Wiley & Sons, 1980. 463p.

SOARES JÚNIOR, A. V.; HASUI, Y.; BEMERGUY, R. L. **O Rio Amazonas.** Belém: IESA, 2013. Disponível em: <[http://portal.iesampa.edu.br/PortalAcademico/quem\\_somos.php](http://portal.iesampa.edu.br/PortalAcademico/quem_somos.php)>. Acesso em: 02 nov. 2012.

SOUZA FILHO, H.; ALMEIDA, M. G.; RIBEIRO, M. M. Mapeamento e classificação das áreas de ressaca na região metropolitana de Macapá – AP, utilizando imagens do satélite CBERS-2B. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2013, Foz do Iguaçu - PR. **Anais.** Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p.2211-2217.

SZIKSZAY, M. **Geoquímica das Águas.** São Paulo: Scielo. Boletim IG-USP, Série Didática, n° 5, p.1-166, 1993. Disponível em: <<http://pgegeo.igc.usp.br/pdf/bigsd/n5/01.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2014.

TAKIYAMA, L. R.; NERI, M. W. L.; SILVA, M. L. **Projeto zoneamento ecológico econômico urbano das áreas de ressacas de Macapá e**

**Santana, Estado do Amapá: relatório técnico final.** Macapá: IEPA, 2012. 84p.

TAKIYAMA, L. R.; SILVA, Q. Q. **Diagnóstico das ressacas do estado do Amapá: Bacias do Igarapé da Fortaleza e Rio Curiaú.** Macapá: CPAQ/IEPA e DGEO/SEMA - AP, 2003.

TANCREDI, A. C. F. N. S. **Água Mineral das Fontes Araguari, Amazonas e Matapi.** Equador: Pesquisa Hidrogeológica. Relatório inédito. 2006. 74 p.

TANCREDI, A. C. F. N. S.; OLIVEIRA, W. **Água Mineral Equinócio: Fontes Equinócio, Cristal e do Vale.** Equador: Pesquisa Hidrogeológica. Relatório inédito. 2004. 54 p.

TANCREDI, A. C. F. N. S.; TAGLIARINI, E. M. **Água Mineral.** Equador: Pesquisa Hidrogeológica. Relatório Inédito. 2002. 48 p.

TEIXEIRA, I. E. M. Águas da formação Açú. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002, Florianópolis - SC. **Anais.** Florianópolis: ABAS, 2002. p.1-25.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568p.

TENORIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. Controle Ambiental de Resíduos. In: PHILLIPI JUNIOR, A.; ROMÉRIO, M. A.; BRUNA G. C. **Curso de Gestão Ambiental.** São Paulo: USP – Faculdade de Saúde Pública, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e Núcleo de Informações em Saúde Ambiental. 2004.

TORRES, A. M.; OLIVEIRA, D. M. Caracterização Sedimentológica e Variáveis Ambientais das Áreas Úmidas Costeiras das Bacias Hidrográficas do Igarapé da Fortaleza e do Rio Curiaú, Municípios de Santana e Macapá. In: TAKIYAMA, L. R.; SILVA, A. Q. (Org.). **Diagnóstico das Ressacas do Estado do Amapá: Bacias do Igarapé da Fortaleza e Rio Curiaú.** Macapá: CPAQ/IEPA e DGEO/SEMA, 2003. p.155-166. cap. 9.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Vol. 1.** Belo Horizonte: Editora Universitária, 2005. vol. 1. 452p.

ZALÁN, P. V.; MATSUDA, N. S. Bacia do Marajó. **Boletim de Geociências da Petrobras,** Rio de Janeiro, v. 15, p.311-310. 2007.

ZOBY, J. L. G. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. **Revista Águas Subterrâneas,** Natal, Supl. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008.

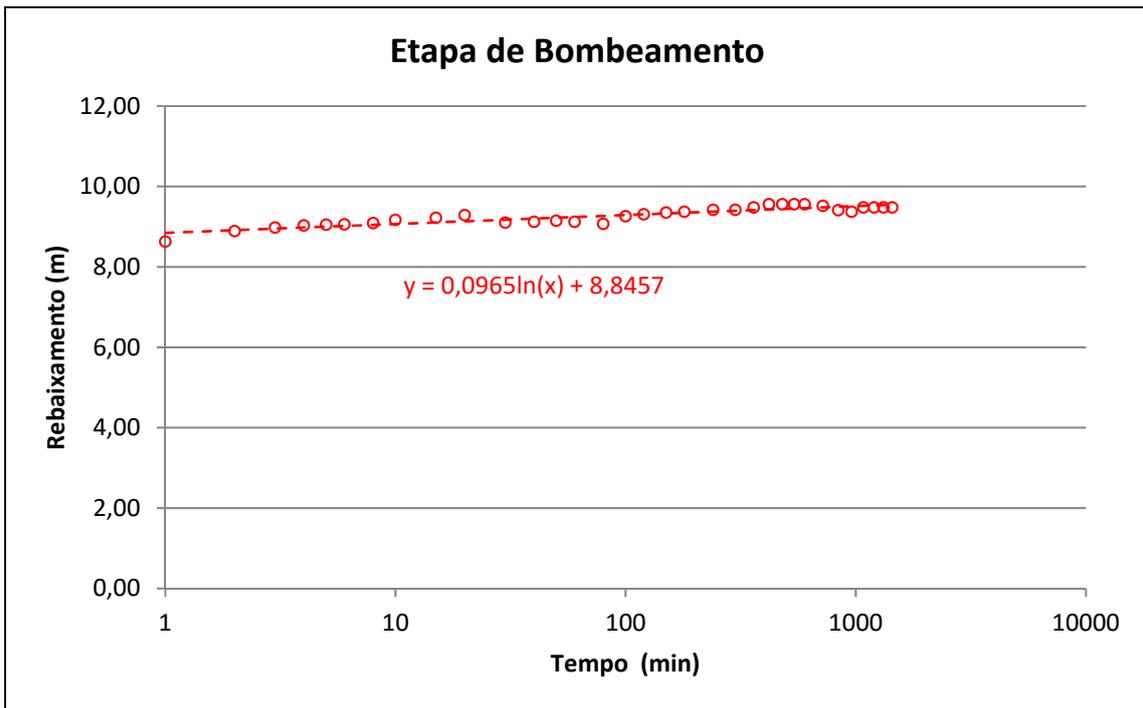
## **7 – Anexos**

## **7.1 – Testes de Bombeamento – Planilhas, Gráficos e Valores Obtidos de T, K, S**

### 7.1.1 – Planilha do Poço ID299 – Macapá- AP

ENSAIO DE BOMBEAMENTO - Poço bombeado									
REFERÊNCIA DO POÇO: ID299-CAESA 1			PROF: 160,00 m		EQUIPAMENTO: B.Submersa				
MUNICÍPIO: MACAPÁ			N.E.: 11,44 m		AQUÍFERO: Tucunaré				
ESTADO: AMAPÁ			N.D.: 20,92 m		EMPRESA: COSTA Consultoria				
LOCAL: SEDE DA CAESA			Crivo: 40,00 m		DATA INÍCIO: 24/7/2012-17:00h				
PROPRIETÁRIO: CAESA			Rio do poço: 0,1 m		DATA TÉRMINO: 25/7/2012- 20:00h				
GPS:	Longitude	51°03'15,8"		Latitude	0°01'58,2"		Altitude	10 m	
REBAIXAMETO						RECUPERAÇÃO			
HORA	t (min)	N.D. (m)	s (m)	Q (m³/h)	Q/s (m³/h/m)	t' (min)	N.D. (m)	s (m)	tb/t' + 1
17:01	1	20,07	8,63	85,00	9,85	1	12,47	1,03	1441,00
17:02	2	20,33	8,89			2	12,22	0,78	721,00
17:03	3	20,42	8,98			3	12,15	0,71	481,00
17:04	4	20,47	9,03			4	12,08	0,64	361,00
17:05	5	20,49	9,05	80,00	8,84	5	12,06	0,62	241,00
17:06	6	20,50	9,06			6	12,03	0,59	181,00
17:08	8	20,53	9,09			8	11,99	0,55	145,00
17:10	10	20,61	9,17			10	11,94	0,50	97,00
17:15	15	20,66	9,22			15	11,88	0,44	73,00
17:20	20	20,73	9,29	75,00	8,07	20	11,84	0,40	49,00
17:30	30	20,54	9,10			30	11,80	0,36	49,00
17:40	40	20,56	9,12			40	11,76	0,32	37,00
17:50	50	20,59	9,15			50	11,73	0,29	29,80
18:00	60	20,56	9,12			60	11,71	0,27	25,00
18:20	80	20,51	9,07	75,00	8,27	80	11,69	0,25	19,00
18:40	100	20,70	9,26			100	11,64	0,20	15,40
19:00	120	20,75	9,31			120	11,59	0,15	13,00
19:30	150	20,79	9,35			150	11,50	0,06	10,60
20:00	180	20,81	9,37			180	11,44	0,00	9,00
21:00	240	20,86	9,42	75,00	7,96	240			
22:00	300	20,86	9,42			300			
23:00	360	20,92	9,48			360			
00:00	420	21,00	9,56			420			
01:00	480	21,00	9,56	75,00	7,85	480			
02:00	540	21,00	9,56			540			
03:00	600	21,00	9,56			600			
05:00	720	20,96	9,52			720			
07:00	840	20,85	9,41						
09:00	960	20,81	9,37	75,00	8,00				
11:00	1080	20,92	9,48						
13:00	1200	20,92	9,48						
15:00	1320	20,92	9,48						
17:00	1440	20,92	9,48	75,00	7,91				

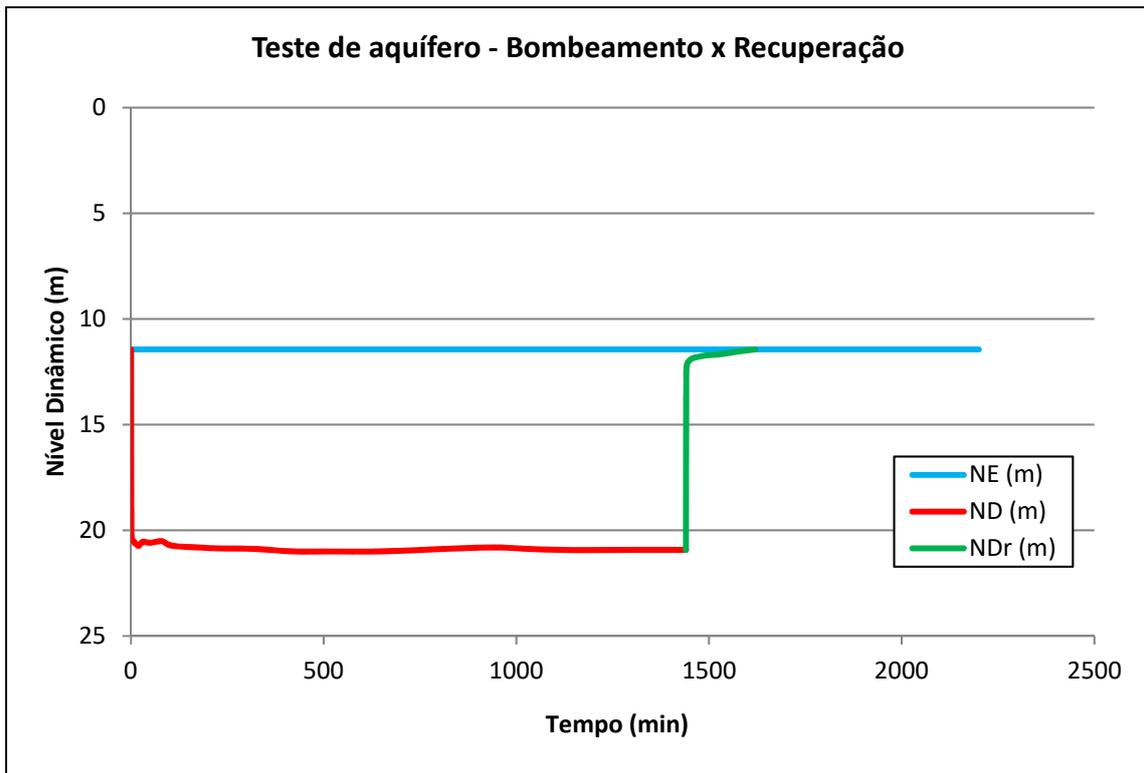
### 7.1.2 – Gráficos e Valores Obtidos de T, K, S do Poço ID299 – Macapá.



7.1.2.1 - Curva de Rebaixamento do poço ID299 durante o bombeamento.



7.1.2.2 - Recuperação do poço ID299 após o bombeamento.



7.1.2.3 – Evolução do nível dinâmico nas fases de rebaixamento e de recuperação no poço ID299.

7.1.2.4 - Valores encontrados para T, K, S no poço ID299 - Macapá - AP

Etapas	T			K		S
	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /min	m <sup>2</sup> /h	m/s	m/h	
Bombeamento	1,72E-02	1,03E+00	6,18E+01	9,10E-05	3,28E-01	2,17E-02
Recuperação	9,67E-03	5,80E-01	3,48E+01	5,13E-05	1,85E-01	
<b>Média</b>	<b>1,34E-02</b>	<b>8,05E-01</b>	<b>4,83E+01</b>	<b>7,11E-05</b>	<b>2,56E-01</b>	

**Nota:** A avaliação aproximada do coeficiente S de armazenamento do aquífero no próprio poço bombeado é feita a 1 m de distância do mesmo, supondo que o seu raio é infinitamente pequeno (ou seja, supondo que o armazenamento no poço é desprezível).

**Cálculo dos parâmetros hidráulicos supondo o aquífero do tipo livre, homogêneo e anisotrópico e poço totalmente penetrante, modelo de Neuman (1975).**

**Gráficos e resultados obtidos**

Valores obtidos no ponto de superposição da curva de campo à curva  $\beta = 0,004$  da família de curvas Tipo B (gráfico 7.1.2.5):

Poço	Trecho Tipo	t min	s (m)	ts	ty	SD	$\beta$
Caesa 1	B	420	9	-	1	4,3	0,004

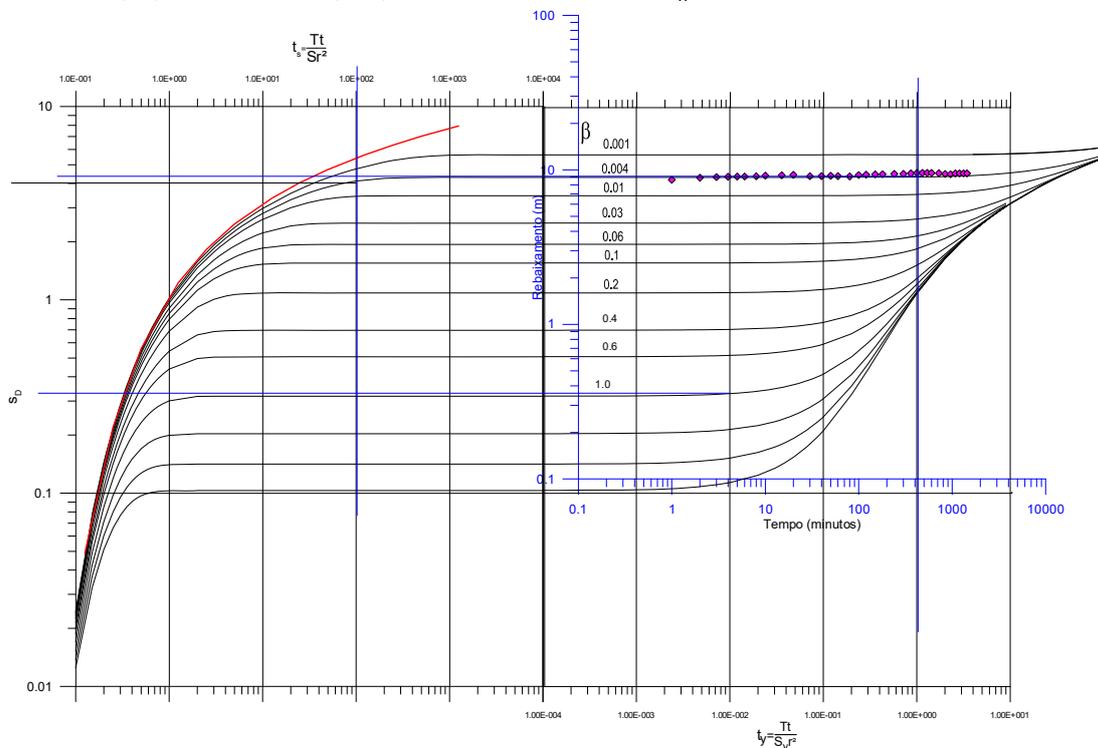
Por hipótese a razão de penetração  $\rho = \frac{h_s}{b} = 1 \rightarrow b = h_s = 24\text{ m}$  (a espessura do aquífero equivale à zona de admissão de água do poço).

$$T = \frac{0,021 \times 4,3}{4\pi \times 9} = 8,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s} \rightarrow K_h = \frac{T}{b} = 3,3 \times 10^{-5} \text{ m} / \text{s} \rightarrow 2,9 \text{ ml} / \text{dia}$$

Na falta de poço de observação:  $r = b = 24\text{ m}$

$$S_y = \frac{Tt}{t_y b^2} = \frac{8 \times 10^{-4} \times 420 \times 60}{1 \times 24^2} = 0,035$$

$$K_D = \beta \left( \frac{r}{b} \right)^2 = 0,004 \times \left( \frac{24}{24} \right)^2 = 0,004 \rightarrow K_D = \frac{K_v}{K_h} = \frac{1}{250}$$



7.1.2.5 – Curva de rebaixamento do poço CAESA 1 superposta à curva padrão Tipo B de Neuman para tempo longo.

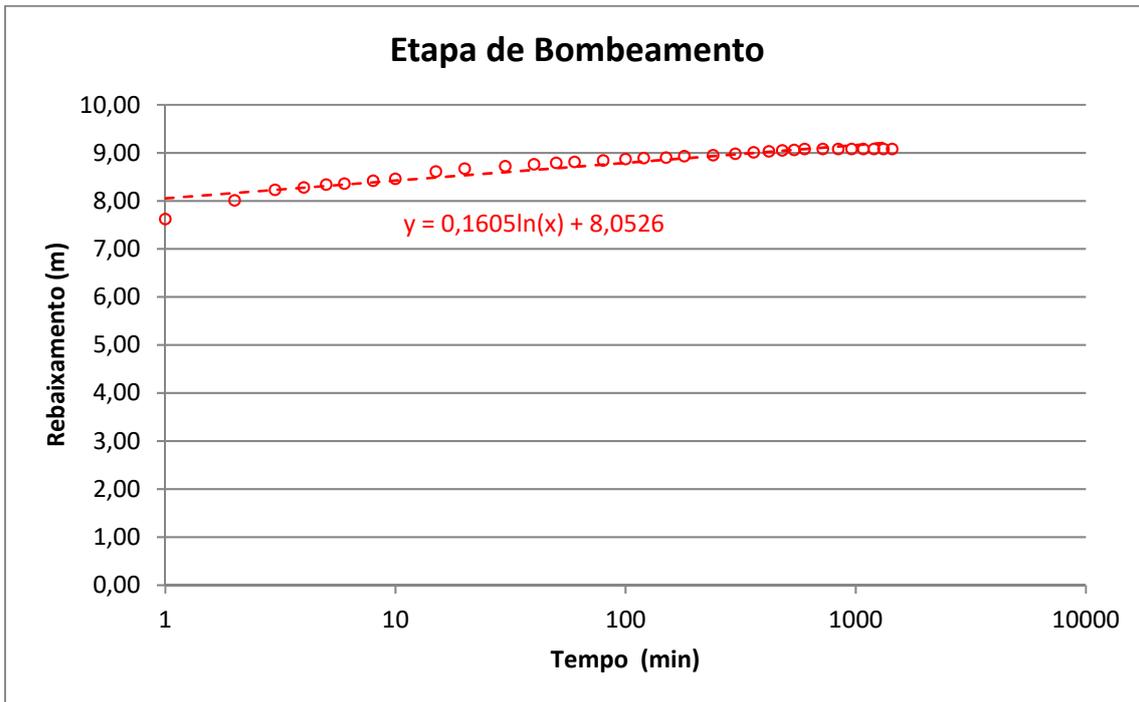
7.1.2.6 - Resultados encontrados no poço CAESA 1 supondo o aquífero do tipo livre, anisotrópico com poços totalmente penetrantes e com drenagem retardada.

PARÂMETROS TESTE CAESA 1	Símbolo	Unidade	Curva Tipo	
			A	B
Vazão	Q	m <sup>3</sup> /d		1814
Rebaixamento	s	m		9,0
Tempo do rebaixamento	t	d		0,292
Distância do poço bombeado*	r	m		24
Rebaixamento adimensional	SD	adim		4,3
Tempo adimensional antes da drenagem retardada ts	ts	adim		-
Tempo adimensional com drenagem retardada ty	ty	adim		1
Fator de drenagem retardada $\beta = r/b$	$\beta$	adim		0,004
Coefficiente de transmissividade	T	m <sup>2</sup> /d		69,1
Coefficiente de armazenamento	S	adim		-
Porosidade efetiva	Sy	adim		0,04
Espessura do aquífero	b	m		24
Condutividade hidráulica horizontal	Kh	m/dia		2,9
Grau de anisotropia do aquífero	KD	adim		1/250
Condutividade hidráulica vertical	Kv	m/dia		0,004

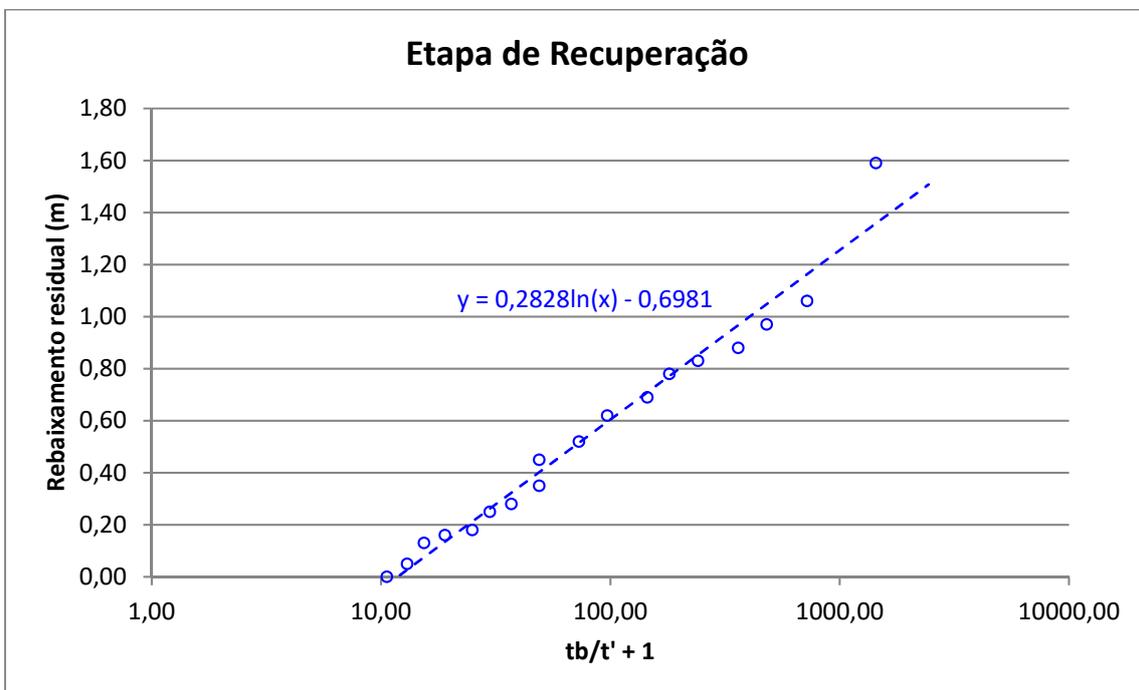
### 7.1.3 – Planilha do Poço ID300 – Macapá- AP

ENSAIO DE BOMBEAMENTO - Poço bombeado									
REFERÊNCIA DO POÇO: ID300-CAESA 2			PROF: 158,00 m		EQUIPAMENTO: B.Submersa				
MUNICÍPIO: MACAPÁ			N.E.: 13,26 m		AQUÍFERO: Tucunaré				
ESTADO: AMAPÁ			N.D.: 22,34 m		EMPRESA: COSTA Consultoria				
LOCAL: CONGÓS			Crivo: 42,00 m		DATA INÍCIO: 3/8/2012-17:00h				
PROPRIETÁRIO: CAESA			Rio do poço: 0,1 m		DATA TÉRMINO: 4/8/2012- 24:00h				
GPS:	Longitude	51°04'36,15"		Latitude	0°02'4,2"		Altitude	13 m	
REBAIXAMETO					RECUPERAÇÃO				
HORA	t (min)	N.D. (m)	s (m)	Q (m³/h)	Q/s (m³/h/m)	t' (min)	N.D. (m)	s (m)	tb/t' + 1
14:01	1	20,88	7,62	255,00	33,46	1	14,85	1,59	1441,00
14:02	2	21,27	8,01			2	14,32	1,06	721,00
14:03	3	21,49	8,23			3	14,23	0,97	481,00
14:04	4	21,54	8,28			4	14,14	0,88	361,00
14:05	5	21,60	8,34	250,00	29,98	5	14,09	0,83	241,00
14:06	6	21,62	8,36			6	14,04	0,78	181,00
14:08	8	21,68	8,42			8	13,95	0,69	145,00
14:10	10	21,72	8,46			10	13,88	0,62	97,00
14:15	15	21,87	8,61			15	13,78	0,52	73,00
14:20	20	21,93	8,67			20	13,71	0,45	49,00
14:30	30	21,98	8,72	245,00	28,10	30	13,61	0,35	49,00
14:40	40	22,02	8,76			40	13,54	0,28	37,00
14:50	50	22,05	8,79			50	13,51	0,25	29,80
15:00	60	22,07	8,81			60	13,44	0,18	25,00
15:20	80	22,10	8,84			80	13,42	0,16	19,00
15:40	100	22,13	8,87	240,00	27,06	100	13,39	0,13	15,40
16:00	120	22,15	8,89			120	13,31	0,05	13,00
16:30	150	22,16	8,90			150	13,26	0,00	10,60
17:00	180	22,19	8,93			180			
18:00	240	22,21	8,95			240			
19:00	300	22,24	8,98	240,00	26,73	300			
20:00	360	22,27	9,01			360			
21:00	420	22,29	9,03			420			
22:00	480	22,31	9,05			480			
23:00	540	22,32	9,06			540			
00:00	600	22,34	9,08	240,00	26,43	600			
02:00	720	22,34	9,08			720			
04:00	840	22,34	9,08						
06:00	960	22,34	9,08						
08:00	1080	22,34	9,08						
10:00	1200	22,34	9,08						
12:00	1320	22,34	9,08						
14:00	1440	22,34	9,08	240,00	26,43				

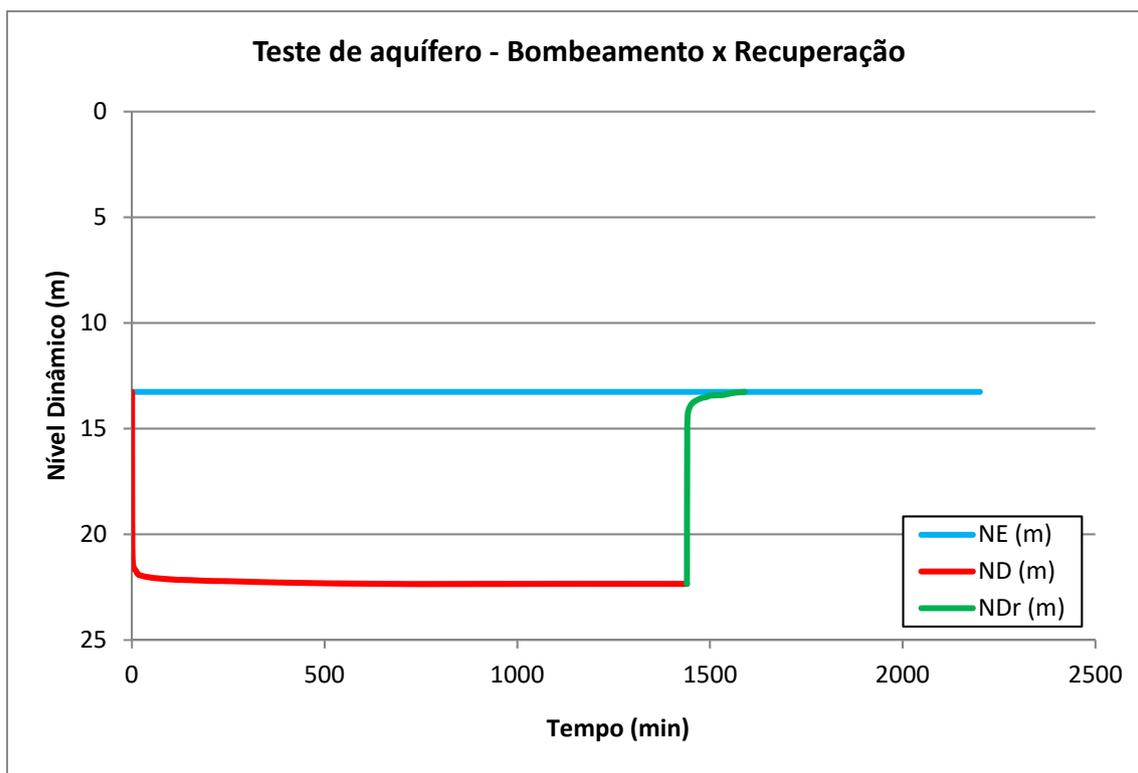
**7.1.4 – Gráficos e Valores Obtidos de T, K, S do Poço ID300 – Macapá - AP.**



7.1.4.1 - Rebaixamento do poço ID300 Congós pelo bombeamento.



7.1.4.2 - Recuperação do poço ID300, após o bombeamento.



7.1.4.3 – Evolução do nível dinâmico durante as fases de rebaixamento e de recuperação no poço ID300.

7.1.4.4 - Valores encontrados para T, K, S no poço ID300 – Macapá – AP.

Etapas	T			K		S
	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /min	m <sup>2</sup> /h	m/s	m/h	
Bombeamento	3,30E-02	1,98E+00	1,19E+02	1,77E-04	6,36E-01	4,22E-02
Recuperação	1,87E-02	1,12E+00	6,74E+01	1,00E-04	3,61E-01	
<b>Média</b>	<b>2,59E-02</b>	<b>1,55E+00</b>	<b>9,31E+01</b>	<b>1,39E-04</b>	<b>4,99E-01</b>	

**Nota:** A avaliação aproximada do coeficiente S de armazenamento do aquífero no próprio poço bombeado é feita a 1 m de distância do mesmo, supondo que o seu raio é infinitamente pequeno (ou seja, supondo que o armazenamento no poço é desprezível).

Valores obtidos no ponto de superposição da curva de campo à curva  $\beta = 0,004$  da família de curvas Tipo B (**figura 7.1.4.5**):

Poço	Trecho Tipo	t min	s (m)	ts	ty	SD	$\beta$
Caesa 2	B	1000	9	-	1	4,3	0,004

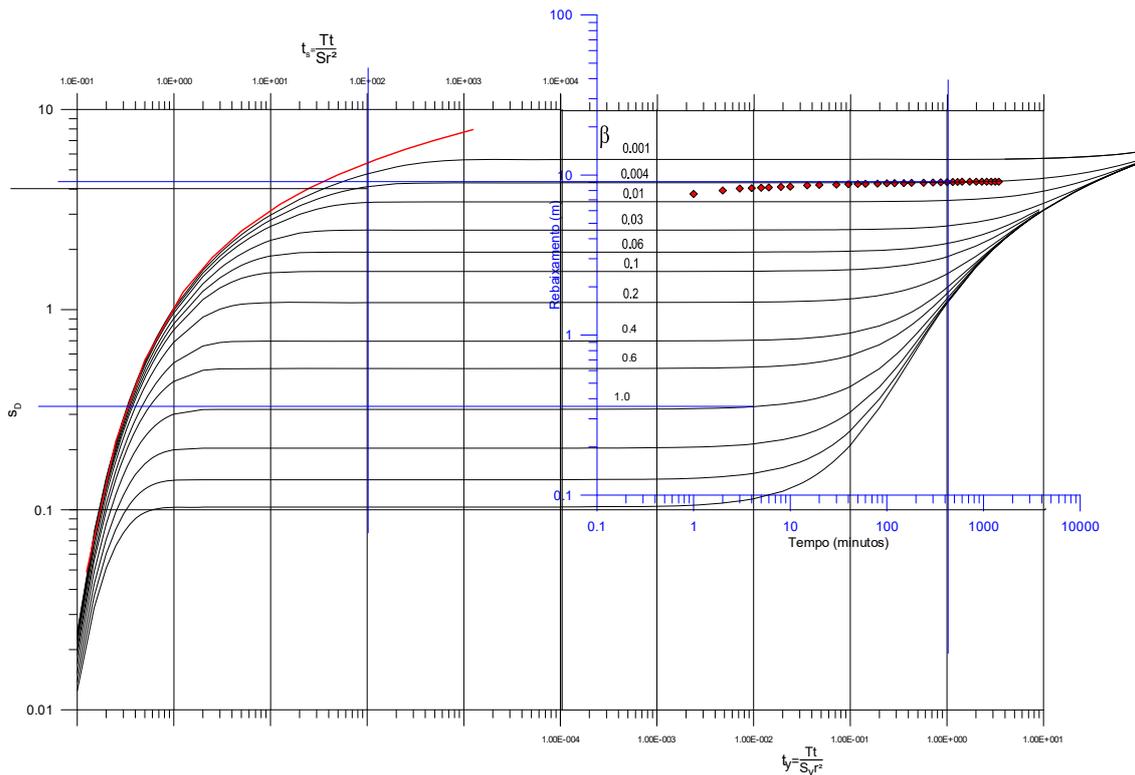
Por hipótese a razão de penetração  $\rho = \frac{h_s}{b} = 1 \rightarrow b = h_s = 24\text{ m}$

$$T = \frac{0,067 \times 4,3}{4\pi \times 9} = 2,55 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s} \rightarrow K = \frac{T}{b} = 1,06 \times 10^{-4} \text{ ml s} \rightarrow 9,2 \text{ ml dia}$$

Na falta de poço de observação:  $r = b = 24\text{ m}$

$$S_y = \frac{Tt}{t_y r^2} = \frac{2,55 \times 10^{-3} \times 420 \times 60}{1 \times 24^2} = 0,112$$

$$K_D = \beta \left( \frac{r}{b} \right)^2 = 0,004 \times \left( \frac{24}{24} \right)^2 = 0,004 \rightarrow K_D = \frac{K_v}{K_h} = \frac{1}{250}$$



7.1.4.5 – Curva de rebaixamento do poço CAESA 2 superposta à curva padrão Tipo B de Neuman para tempo longo

7.1.4.6 - Resultados encontrados no poço CAESA 2 supondo o aquífero do tipo livre, anisotrópico com poços totalmente penetrantes e com drenagem retardada.

PARÂMETROS TESTE CAESA 2	Símbolo	Unidade	Curva Tipo	
			A	B
Vazão	Q	m <sup>3</sup> /d		5788
Rebaixamento	s	m		9,0
Tempo do rebaixamento	t	d		0,292
Distância do poço bombeado*	r	m		24
Rebaixamento adimensional	SD	adim		4,3
Tempo adimensional antes da drenagem retardada ts	ts	adim		-
Tempo adimensional com drenagem retardada ty	ty	adim		1
Fator de drenagem retardada $\beta = r/b$	$\beta$	adim		0,004
Coefficiente de transmissividade	T	m <sup>2</sup> /d		220,3
Coefficiente de armazenamento	S	adim		-
Porosidade efetiva	Sy	adim		0,11
Espessura do aquífero	b	m		24
Condutividade hidráulica horizontal	Kh	m/dia		9,2
Grau de anisotropia do aquífero	KD	adim		1/250
Condutividade hidráulica vertical	Kv	m/dia		0,004

**7.2 – Dados dos Poços Cadastrados pela ANA-PHA e Catalogados do SIAGAS/CPRM 2010 em Macapá**

**7.2.1 – Identificação, localização e parâmetros selecionados para a estatística dos 136 poços constantes do SIG-ANA-PHA em Macapá**

7.2.1 – Identificação, localização e parâmetros selecionados para a estatística dos 136 poços constantes do SIG-ANA-PHA em Macapá.

Item	Ponto	Órgão	Proprietário	Município	UF	Longitude	Latitude	Profundidade (m)	Altura da boca (cm)	Diâmetro do Revestimento (mm)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão (m³/h)	Situação	Operação horas/dia	Tipo Bomba	Uso da Água	Tipo de Reservatório
1	MP001	ANA	Posto	Macapá	AP	51° 3' 3,113" W	0° 1' 45,267" N	-	30	100	-	-	-	Abandonado	12	Bomba submersa	Abastecimento urbano	Fibra de Vidro
2	MP002	ANA	Condomínio Novo Horizonte	Macapá	AP	51° 2' 25,100" W	0° 5' 46,482" N	43	50	100	-	-	5,7	Bombeando	5	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
3	MP003	ANA	CIOSP	Macapá	AP	51° 2' 59,975" W	0° 5' 33,682" N	40	-	100	-	-	2,5	Bombeando	2	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
4	MP004	ANA	Residencial Arco Iris	Macapá	AP	51° 3' 8,937" W	0° 4' 24,014" N	38	90	100	-	-	1	Bombeando	3	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
5	MP005	ANA	Alércio Cardoso	Macapá	AP	51° 2' 55,672" W	0° 4' 4,928" N	35	10	100	-	-	1,3	Bombeando	2	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
6	MP006	ANA	Valdir Ferreira Dias	Macapá	AP	51° 2' 55,737" W	0° 4' 11,833" N	35	5	-	-	-	6,3	Bombeando	4	Bomba Centrífuga	Abastecimento urbano	Fibra de Vidro
7	MP007	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 5' 10,290" W	0° 5' 32,411" N	-	30	100	-	-	5	Abandonado	20	Bomba injetora	Abastecimento urbano	Fibra de Vidro
8	MP008	ANA	Prefeitura Municipal de Macapá	Macapá	AP	51° 5' 17,893" W	0° 5' 23,617" N	40	10	100	-	-	2,5	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
9	MP009	ANA	Raul Cezar	Macapá	AP	51° 4' 50,135" W	0° 5' 31,467" N	26	12	100	-	-	3	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
10	MP010	ANA	Marco Antônio	Macapá	AP	51° 4' 23,573" W	0° 4' 52,676" N	-	-	100	-	-	3	Bombeando	15	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
11	MP011	ANA	Antonia Cláudia Santiago	Macapá	AP	51° 4' 24,026" W	0° 4' 52,969" N	32	12	100	-	-	1	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
12	MP012	ANA	Emanuel Costa e Silva	Macapá	AP	51° 4' 26,517" W	0° 4' 55,184" N	32	18	75	-	-	-	Bombeando	15	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
13	MP013	ANA	Maria das Graças Paranhos	Macapá	AP	51° 4' 23,962" W	0° 5' 3,880" N	30	10	75	-	-	0,6	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
14	MP014	ANA	Maria da Conceição Soares	Macapá	AP	51° 3' 53,971" W	0° 0' 28,759" N	37	16	100	-	-	1	Bombeando	-	Bomba injetora	-	-
15	MP015	ANA	Ajax Ferreira Gomes	Macapá	AP	51° 3' 54,424" W	0° 4' 48,930" N	37	32	100	-	-	-	Abandonado	-	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
16	MP016	ANA	Francisco Alves Brito	Macapá	AP	51° 3' 50,218" W	0° 4' 48,963" N	36	5	100	-	-	1	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
17	MP017	ANA	Prefeitura Municipal de Macapá	Macapá	AP	51° 3' 49,604" W	0° 4' 44,826" N	40	18,5	100	-	-	1,6	Bombeando	12	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
18	MP018	ANA	Posto Ipiranga	Macapá	AP	51° 3' 49,571" W	0° 5' 37,948" N	46	17,5	100	-	-	4,5	Bombeando	-	Bomba injetora	Abastecimento urbano	Tijolos
19	MP019	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 3' 37,730" W	0° 4' 22,159" N	26	15	150	-	-	-	Abandonado	10	Bomba injetora	Abastecimento urbano	Fibra de Vidro
20	MP020	ANA	Prefeitura Municipal de Macapá	Macapá	AP	51° 3' 46,012" W	0° 4' 22,841" N	42	7	150	-	-	4	Bombeando	12	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
21	MP021	ANA	Posto São José	Macapá	AP	51° 3' 20,778" W	0° 4' 19,487" N	42	6	150	-	-	2,5	Bombeando	12	Bomba Centrífuga	Doméstico	Fibra de Vidro
22	MP022	ANA	Sávio Botelho	Macapá	AP	51° 3' 20,551" W	0° 3' 21,023" N	37	-	100	-	-	-	Bombeando	-	Bomba injetora	-	-
23	MP023	ANA	José Alcolumbre	Macapá	AP	51° 3' 16,669" W	0° 3' 25,941" N	9	-	100	-	-	-	Abandonado	10	Bomba injetora	Doméstico	Plástico
24	MP024	ANA	Marcelo Pacheco	Macapá	AP	51° 2' 59,199" W	0° 3' 32,618" N	13	31	75	-	-	0,5	Bombeando	24	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
25	MP025	ANA	Kennedy Marciel de Brito	Macapá	AP	51° 3' 42,421" W	0° 3' 0,471" N	20	20	100	-	-	6,3	Bombeando	-	Bomba injetora	-	-
26	MP026	ANA		Macapá	AP	51° 3' 42,680" W	0° 3' 0,471" N	30	120	100	-	-	-	Abandonado	16	Bomba injetora	-	Fibra de Vidro
27	MP027	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 3' 40,124" W	0° 3' 0,341" N	36	3	100	-	-	2,2	Bombeando	-	Bomba injetora	-	-
28	MP028	ANA	Evandro Machado	Macapá	AP	51° 3' 15,213" W	0° 2' 49,886" N	9	11,5	100	-	-	-	Abandonado	15	Bomba Centrífuga	Abastecimento urbano	Fibra de Vidro
29	MP029	ANA	Prefeitura Municipal de Macapá	Macapá	AP	51° 3' 13,013" W	0° 3' 22,196" N	27	22	200	-	-	4	Bombeando	24	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
30	MP030	ANA	Valdiney Vieira Dos Santos	Macapá	AP	51° 3' 40,674" W	0° 3' 10,015" N	21	20	100	-	-	0,5	Bombeando	24	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
31	MP031	ANA	Célia Cordeiro da Silva	Macapá	AP	51° 3' 39,671" W	0° 2' 47,932" N	15	28	100	-	-	1	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
32	MP032	ANA	Lourival Augusto Dias	Macapá	AP	51° 3' 36,048" W	0° 2' 43,568" N	27	23	100	-	-	1,5	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
33	MP033	ANA	Jorge Moreira	Macapá	AP	51° 3' 42,906" W	0° 2' 5,721" N	24	25	150	-	-	0,8	Bombeando	-	Bomba injetora	-	-

7.2.1 – Identificação, localização e parâmetros selecionados para a estatística dos 136 poços constantes do SIG-ANA-PHA em Macapá (continuação).

Item	Ponto	Órgão	Proprietário	Município	UF	Longitude	Latitude	Profundidade (m)	Altura da boca (cm)	Diâmetro do Revestimento (mm)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão (m³/h)	Situação	Operação horas/dia	Tipo Bomba	Uso da Água	Tipo de Reservatório
34	MP034	ANA	Ione Vasconcelos	Macapá	AP	51° 3' 42,259" W	0° 1' 34,812" N	-	-	-	-	-	2	Abandonado	24	Bomba injetora	Doméstico	Plástico
35	MP035	ANA	Elizabeth Costa Ribeiro	Macapá	AP	51° 3' 18,190" W	0° 4' 8,804" N	15	7	100	-	-	2	Bombeando	24	Bomba Centrífuga	Doméstico	Caixa de concreto
36	MP036	ANA	Escola Sesi	Macapá	AP	51° 3' 42,551" W	0° 1' 41,065" N	15	100	-	-	-	13	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
37	MP037	ANA	Odovaldo Francisco Marques	Macapá	AP	51° 3' 15,019" W	0° 3' 17,050" N	19	7	100	-	-	1,5	Bombeando	24	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
38	MP038	ANA	Antonio Almeida	Macapá	AP	51° 3' 23,204" W	0° 3' 29,296" N	33	5	100	-	-	2	Bombeando	22	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
39	MP039	ANA	Valdeci Leite Barbosa	Macapá	AP	51° 3' 47,533" W	0° 0' 45,338" N	13	12	100	-	-	0,3	Bombeando	12	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
40	MP040	ANA	Wellington Ribeiro	Macapá	AP	51° 4' 2,318" W	0° 0' 7,915" N	21	26	100	-	-	2	Bombeando	24	Bomba Centrífuga	Doméstico	Fibra de Vidro
41	MP041	ANA	Ruth Lopes	Macapá	AP	51° 3' 31,777" W	0° 3' 3,728" N	6	36	100	-	-	1	Bombeando	16	Bomba injetora	Abastecimento urbano	Fibra de Vidro
42	MP042	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 3' 52,256" W	0° 0' 29,313" N	16	11,5	150	-	-	1	Bombeando	15	Bomba injetora	Abastecimento urbano	Fibra de Vidro
43	MP043	ANA	Prefeitura Municipal de Macapá	Macapá	AP	51° 4' 6,362" W	0° 0' 23,581" N	17	7	100	-	-	3,3	Bombeando	16	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
44	MP044	ANA	Derby	Macapá	AP	51° 4' 23,379" W	0° 0' 17,230" N	20	42	175	-	-	4	Bombeando	-	Bomba Centrífuga	-	-
45	MP045	ANA	Sargento Alves	Macapá	AP	51° 4' 21,050" W	0° 0' 24,330" N	15	15	100	-	-	-	Abandonado	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
46	MP046	ANA	José Maria	Macapá	AP	51° 3' 56,139" W	0° 2' 51,710" N	18	19,5	100	-	-	2	Bombeando	15	Bomba injetora	Abastecimento urbano	Fibra de Vidro
47	MP047	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 4' 11,732" W	0° 2' 31,777" N	22	26	100	-	-	-	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
48	MP048	ANA	Juarez Barbosa Avelar	Macapá	AP	51° 4' 33,408" W	0° 2' 30,279" N	18	49	100	-	-	3	Bombeando	12	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
49	MP049	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 4' 29,138" W	0° 1' 43,703" N	18	10,5	100	-	-	4	Bombeando	24	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
50	MP050	ANA	Igreja	Macapá	AP	51° 4' 8,562" W	0° 2' 14,319" N	-	21	50	-	-	3	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
51	MP051	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 4' 6,394" W	0° 2' 10,704" N	24	16	100	-	-	1,7	Bombeando	15	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
52	MP052	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 4' 11,538" W	0° 0' 51,428" N	24	60	100	-	-	5	Bombeando	24	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
53	MP053	ANA	Elza Rocha	Macapá	AP	51° 4' 10,018" W	0° 1' 15,530" N	24	17	100	-	-	2,7	Bombeando	12	Bomba injetora	Abastecimento urbano	Fibra de Vidro
54	MP054	ANA	Edson Dias de Andrade	Macapá	AP	51° 4' 6,815" W	0° 1' 19,764" N	22	14,5	100	-	-	4	Bombeando	24	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
55	MP055	ANA	José Jair Rabelo da Silva	Macapá	AP	51° 4' 16,650" W	0° 1' 11,198" N	24	10	100	-	-	2	Bombeando	-	Bomba injetora	-	-
56	MP056	ANA	Luiza Helena de Almeida	Macapá	AP	51° 7' 58,068" W	0° 4' 48,181" N	46	-	150	-	-	-	Abandonado	1,5	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
57	MP057	ANA	Paulo Henrique Pacheco	Macapá	AP	51° 2' 38,138" W	0° 4' 42,612" N	33	16	150	-	-	4	Bombeando	1,5	Bomba Centrífuga	Doméstico	Fibra de Vidro
58	MP058	ANA	Paulo Henrique Pacheco	Macapá	AP	51° 8' 2,565" W	0° 4' 39,387" N	42	11,5	150	-	-	4	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
59	MP059	ANA	Manoel João da Costa	Macapá	AP	51° 3' 32,748" W	0° 2' 17,902" N	12	65	100	-	-	1,6	Bombeando	24	Bomba Centrífuga	Doméstico	Fibra de Vidro
60	MP060	ANA	Sarah Uchoa	Macapá	AP	51° 4' 5,553" W	0° 2' 16,241" N	22	-	-	-	-	2	Bombeando	24	Bomba Centrífuga	Doméstico	Fibra de Vidro
61	MP061	ANA	José Rocha	Macapá	AP	51° 4' 59,322" W	0° 2' 15,459" N	30	9	100	-	-	10	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
62	MP062	ANA	Prefeitura Municipal de Macapá	Macapá	AP	51° 5' 26,919" W	0° 2' 13,766" N	25	4,5	100	-	-	7,5	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
63	MP063	ANA	Transportadora	Macapá	AP	51° 5' 34,651" W	0° 2' 12,105" N	19	-	100	-	-	2	Bombeando	24	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
64	MP064	ANA	Carlos Alberto Junior	Macapá	AP	51° 6' 0,597" W	0° 1' 59,858" N	50	10	100	-	-	0,8	Bombeando	15	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
65	MP065	ANA	Sônia Maria Malafaia	Macapá	AP	51° 7' 51,371" W	0° 2' 12,072" N	28	10	100	-	-	4	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
66	MP066	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 7' 47,003" W	0° 2' 22,950" N	33	14	100	-	-	1,5	Bombeando	24	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro

7.2.1 – Identificação, localização e parâmetros selecionados para a estatística dos 136 poços constantes do SIG-ANA-PHA em Macapá (continuação).

Item	Ponto	Órgão	Proprietário	Município	UF	Longitude	Latitude	Profundidade (m)	Altura da boca (cm)	Diâmetro do Revestimento (mm)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão (m³/h)	Situação	Operação horas/dia	Tipo Bomba	Uso da Água	Tipo de Reservatório
67	MP067	ANA	Maria Claudete	Macapá	AP	51° 7' 52,665" W	0° 2' 32,331" N	36	-	-	-	-	2	Bombeando	12	Bomba Centrífuga	Doméstico	Fibra de Vidro
68	MP068	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 7' 40,501" W	0° 2' 40,799" N	54	4	150	-	-	8,5	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
69	MP069	ANA	Sergio Menezes	Macapá	AP	51° 7' 6,531" W	0° 2' 47,117" N	34	3,5	100	-	-	1,8	Bombeando	20	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
70	MP070	ANA	Barroso	Macapá	AP	51° 7' 9,734" W	0° 2' 43,600" N	33	-	100	-	-	2	Bombeando	12	Bomba submersa	Doméstico	Fibra de Vidro
71	MP071	ANA	Diocese de Macapá	Macapá	AP	51° 7' 30,569" W	0° 2' 49,072" N	36	2,5	175	-	-	2,5	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
72	MP072	ANA	Denilson Oliveira	Macapá	AP	51° 7' 58,521" W	0° 2' 31,484" N	36	16	150	-	-	2	Bombeando	6	Bomba submersa	Doméstico	Fibra de Vidro
73	MP073	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 8' 1,659" W	0° 2' 17,413" N	36	18,5	100	-	-	-	Bombeando	-	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
74	MP074	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 7' 40,436" W	0° 2' 16,599" N	16	6	100	-	-	1,2	Bombeando	24	Bomba submersa	Abastecimento urbano	Fibra de Vidro
75	MP075	ANA	INFRAERO	Macapá	AP	51° 4' 11,215" W	0° 2' 58,582" N	29	16	150	-	-	3,3	Bombeando	24	Bomba submersa	Abastecimento urbano	Fibra de Vidro
76	MP076	ANA	INFRAERO	Macapá	AP	51° 3' 58,630" W	0° 2' 54,869" N	39	36	150	-	-	-	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
77	MP077	ANA		Macapá	AP	51° 3' 55,200" W	0° 4' 49,777" N	37	9	100	-	-	2	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
78	MP078	ANA	Serviço Social do Comércio	Macapá	AP	51° 3' 58,953" W	0° 5' 27,689" N	41	15	150	-	-	0,3	Bombeando	4	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
79	MP079	ANA	Raimundo de Souza Santos	Macapá	AP	51° 3' 50,218" W	0° 5' 44,918" N	30	16	100	-	-	0,8	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
80	MP080	ANA	Edina Vieira Moraes	Macapá	AP	51° 3' 47,954" W	0° 6' 13,873" N	27	19	100	-	-	1,2	Bombeando	1	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
81	MP081	ANA	Sirlan Viana	Macapá	AP	51° 3' 48,407" W	0° 6' 13,026" N	24	12,5	100	-	-	1,5	Bombeando	4	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
82	MP082	ANA	Alexandre Gusmão	Macapá	AP	51° 5' 2,008" W	0° 4' 32,906" N	31	5	150	-	-	4	Bombeando	3	Bomba submersa	Doméstico	Fibra de Vidro
83	MP083	ANA	Alexandre Gusmão	Macapá	AP	51° 5' 3,819" W	0° 4' 30,626" N	48	6,3	150	-	-	2,5	Bombeando	0,7	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
84	MP084	ANA	José Donaldison Barros	Macapá	AP	51° 5' 8,705" W	0° 4' 29,160" N	40	50	100	-	-	1,5	Bombeando	14	Bomba Sapo	Doméstico	Fibra de Vidro
85	MP085	ANA	Jucineide Costa Dias	Macapá	AP	51° 5' 8,705" W	0° 4' 29,160" N	14	31	-	-	-	1	Bombeando	2	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
86	MP086	ANA	Maria Helena Ferreira	Macapá	AP	51° 5' 30,639" W	0° 4' 18,770" N	19	50	100	-	-	3	Bombeando	24	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
87	MP087	ANA	Prefeitura Municipal de Macapá	Macapá	AP	51° 4' 9,565" W	0° 4' 46,553" N	36	115	150	-	-	1,3	Bombeando	9	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
88	MP088	ANA	Posto Açaí	Macapá	AP	51° 4' 45,023" W	0° 4' 59,483" N	39	6	100	-	-	2,5	Bombeando	12	Compressor	Doméstico	Fibra de Vidro
89	MP089	ANA	Posto Açaí	Macapá	AP	51° 4' 46,932" W	0° 5' 0,818" N	42	3	100	-	-	2,5	Bombeando	8	Bomba Sapo	Doméstico	Fibra de Vidro
90	MP090	ANA	José Alberto Guedes Figueira	Macapá	AP	51° 4' 49,390" W	0° 4' 51,275" N	18	-	-	-	-	1,5	Bombeando	14	Bomba Sapo	Doméstico	Fibra de Vidro
91	MP091	ANA	Edson Benedito Moraes Costa	Macapá	AP	51° 4' 53,499" W	0° 4' 38,377" N	14	33	-	-	-	3	Bombeando	16	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
92	MP092	ANA	Maria Joaquina Santos	Macapá	AP	51° 3' 41,677" W	0° 2' 59,885" N	24	9	100	-	-	2	Bombeando	16	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
93	MP093	ANA	Maria do Socorro Santos	Macapá	AP	51° 3' 41,580" W	0° 2' 58,061" N	24	27,5	100	-	-	2	Bombeando	20	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
94	MP094	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 3' 23,851" W	0° 4' 37,954" N	36	27,5	150	-	-	3,3	Bombeando	20	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
95	MP095	ANA	Governo do Estado do Amapá	Macapá	AP	51° 3' 58,921" W	0° 4' 37,303" N	18	3	100	-	-	2,6	Bombeando	20	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
96	MP096	ANA	Maria Joaquina Santos	Macapá	AP	51° 3' 15,375" W	0° 6' 50,417" N	25	42	100	-	-	1,3	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
97	MP097	ANA	Maria Santos Nascimento	Macapá	AP	51° 3' 16,410" W	0° 6' 43,349" N	35	44	100	-	-	1,5	Bombeando	16	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
98	MP098	ANA	Ana Maria da Conceição	Macapá	AP	51° 3' 28,348" W	0° 5' 36,190" N	40	3	100	-	-	1	Bombeando	15	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
99	MP099	ANA	Luziam Magno Pires	Macapá	AP	51° 5' 2,040" W	0° 5' 8,765" N	33	6	100	-	-	1,7	Bombeando	16	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro

7.2.1 – Identificação, localização e parâmetros selecionados para a estatística dos 136 poços constantes do SIG-ANA-PHA em Macapá (continuação).

Item	Ponto	Órgão	Proprietário	Município	UF	Longitude	Latitude	Profundidade (m)	Altura da boca (cm)	Diâmetro do Revestimento (mm)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão (m³/h)	Situação	Operação horas/dia	Tipo Bomba	Uso da Água	Tipo de Reservatório
100	MP100	ANA	Nivaldo Cardoso Sanches	Macapá	AP	51° 5' 4,952" W	0° 5' 3,489" N	36	32	100	-	-	1	Bombeando	8	Bomba Centrífuga	Doméstico	Fibra de Vidro
101	MP101	ANA	Igreja Nossa Senhora de Nazaré	Macapá	AP	51° 7' 2,131" W	0° 5' 27,591" N	30	24	100	-	-	2	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
102	MP102	ANA	Leandro Silva de Souza	Macapá	AP	51° 5' 57,136" W	0° 5' 20,002" N	33	5	100	-	-	3	Bombeando	15	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
103	MP103	ANA	Keuly Ednei Queiroz Alves	Macapá	AP	51° 4' 52,723" W	0° 4' 36,521" N	36	15	100	-	-	1	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
104	MP104	ANA	Joana Serra	Macapá	AP	51° 3' 30,710" W	0° 4' 39,583" N	18	25	100	-	-	-	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
105	MP105	ANA	Alan da Costa Aragão	Macapá	AP	51° 3' 48,148" W	0° 5' 20,132" N	36	14	100	-	-	2	Bombeando	8	Bomba Sapó	Doméstico	Caixa de Polipropileno
106	MP106	ANA	Leôncio Ferreira de Souza	Macapá	AP	51° 4' 7,559" W	0° 5' 54,787" N	12	9	-	-	-	0,8	Bombeando	8	Bomba Sapó	Doméstico	Caixa de concreto
107	MP107	ANA	Eloilson	Macapá	AP	51° 3' 41,710" W	0° 5' 44,560" N	19	110	-	-	-	0,8	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
108	MP108	ANA	Ivaldo	Macapá	AP	51° 3' 54,715" W	0° 6' 13,906" N	36	2	100	-	-	1	Bombeando	8	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
109	MP109	ANA	Joséane Oliveira Gomes	Macapá	AP	51° 3' 51,448" W	0° 6' 14,232" N	36	15	100	-	-	1,5	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
110	MP110	ANA	Teresinha Rodrigues Corrêa	Macapá	AP	51° 3' 39,477" W	0° 6' 0,259" N	39	15	100	-	-	1	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
111	MP111	ANA	Izaque	Macapá	AP	51° 3' 35,627" W	0° 5' 41,629" N	-	10,5	100	-	-	1	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Caixa de Polipropileno
112	MP112	ANA	Rosa Maria Pereira	Macapá	AP	51° 3' 41,710" W	0° 6' 17,782" N	24	21	100	-	-	1	Bombeando	10	Bomba injetora	Doméstico	Caixa de Polipropileno
113	MP113	ANA	Gilson Teles Viana	Macapá	AP	51° 3' 41,224" W	0° 6' 17,749" N	-	-	100	-	-	1,5	Bombeando	2	Bomba injetora	Doméstico	Fibra de Vidro
114	MP114	ANA	Bruno Eduarado Silva	Macapá	AP	51° 3' 40,383" W	0° 6' 18,205" N	24	16	100	-	-	1,2	Bombeando	-	-	-	-
115	1500003774	CPRM	CAESA - Companhia de Águas e Esgotos do Amapá	Macapá	AP	51° 06' 44" W	00° 02' 49" S	160	-	304,8	38	52	90	Equipado	-	-	Abastecimento múltiplo	-
116	1500003775	CPRM	CAESA - Companhia de Águas e Esgotos do Amapá	Macapá	AP	51° 06' 45" W	00° 02' 50" S	140	-	254	34	44	77	Equipado	-	-	Abastecimento múltiplo	-
117	1500003776	CPRM	CAESA - Companhia de Águas e Esgotos do Amapá	Macapá	AP	51° 06' 46" W	00° 02' 52" S	155	-	254	36	48	82	Equipado	-	-	Abastecimento urbano	-
118	1500003792	CPRM	Roberto Abraão	Macapá	AP	51° 06' 58" W	00° 05' 39" S	40	-	152,4	7	11	16	Equipado	-	-	Doméstico	-
119	1500003794	CPRM	CAESA - Companhia de Águas e Esgotos do Amapá	Macapá	AP	51° 04' 52" W	00° 01' 24" N	160	-	152,4	36	41	30	Equipado	-	Bomba submersa	Abastecimento urbano	-
120	1500003801	CPRM		Macapá	AP	51° 10' 12" W	00° 01' 06" N	31	-	203,2	8	11	13	Equipado	-	Bomba submersa	-	-
121	1500003802	CPRM		Macapá	AP	51° 06' 45" W	00° 02' 49" N	150	-	-	27	38	90	Equipado	-	Bomba submersa	-	-
122	1500003808	CPRM		Macapá	AP	51° 04' 52" W	00° 01' 04" N	160	-	152,4	32	44	90	Equipado	-	Bomba submersa	-	-
123	1500004297	CPRM		Macapá	AP	51° 07' 23" W	00° 21' 34" N	36	-	152,4	14	17,5	2	Equipado	-	Bomba submersa	Abastecimento urbano	-
124	1500004298	CPRM		Macapá	AP	51° 07' 28" W	00° 21' 34" N	22	-	101,6	4	5,5	2	Equipado	-	Bomba submersa	Abastecimento urbano	-
125	1500004299	CPRM		Macapá	AP	51° 07' 27" W	00° 21' 27" N	22	-	101,6	3	5,5	3	Equipado	-	Bomba submersa	Abastecimento urbano	-
126	1500004300	CPRM		Macapá	AP	51° 01' 02" W	00° 16' 50" N	24	-	101,6	2	4,4	3	Equipado	-	Bomba submersa	Abastecimento urbano	-
127	1500004301	CPRM		Macapá	AP	51° 01' 11" W	00° 16' 55" N	26	-	152,4	4,2	8,1	7,5	Equipado	-	Bomba submersa	Abastecimento urbano	-

7.2.1 – Identificação, localização e parâmetros selecionados para a estatística dos 136 poços constantes do SIG-ANA-PHA em Macapá (continuação).

Item	Ponto	Órgão	Proprietário	Município	UF	Longitude	Latitude	Profundidade (m)	Altura da boca (cm)	Diâmetro do Revestimento (mm)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão (m³/h)	Situação	Operação horas/dia	Tipo Bomba	Uso da Água	Tipo de Reservatório
128	1500004302	CPRM		Macapá	AP	51° 03' 32" W	00° 07' 33" N	16	-	152,4	3	6	27	Equipado	-	Bomba Centrífuga	Abastecimento urbano	-
129	1500004303	CPRM		Macapá	AP	50° 52' 25" W	00° 20' 15" N	30	-	152,4	2,5	5	15	Equipado	-	Bomba Centrífuga	Abastecimento urbano	-
130	1500004304	CPRM		Macapá	AP	50° 54' 45" W	00° 16' 13" N	24	-	152,4	4	6,7	10	Equipado	-	Bomba Centrífuga	Abastecimento urbano	-
131	1500004305	CPRM		Macapá	AP	50° 57' 38" W	00° 14' 35" N	36	-	152,4	4,4	7	5	Equipado	-	Bomba submersa	Abastecimento urbano	-
132	1500004306	CPRM		Macapá	AP	50° 57' 37" W	00° 14' 35" N	30	-	101,6	3	5,7	5	Equipado	-	Bomba submersa	Abastecimento urbano	-
133	1500004307	CPRM		Macapá	AP	50° 57' 30" W	00° 14' 32" N	25	-	152,4	6,3	9,1	2,5	Equipado	-	Bomba submersa	Doméstico	-
134	1500004308	CPRM		Macapá	AP	50° 55' 15" W	00° 15' 56" N	23	-	101,6	5,7	8,2	4	Equipado	-	Bomba submersa	Abastecimento urbano	-
135	1500004431	CPRM		Macapá	AP	50° 55' 08" W	00° 16' 04" N	36	-	152,4	4,4	7,7	15	Equipado	-	Bomba injetora	Abastecimento urbano	-
136	1500004486	CPRM		Macapá	AP	51° 08' 49" W	00° 08' 28" N	42	-	101,6	6	8,5	12	Equipado	-	Bomba Centrífuga	Abastecimento urbano	-

**7.2.2 – Resumo das Características Técnicas dos 11 Poços Catalogados da CPRM/SIAGAS 2010 em Macapá, com Perfis Litológicos, Perfis Construtivos e Produtividade**

7.2.2 – Poços Catalogados da CPRM/SIAGAS 2010 com Perfis Litológicos, Perfis Construtivos e Produtividade em Macapá – AP.

Siagas	UTM_E	UTM_N	Proprietário	Profundidade (m)	Revestimento (m)	Diâmetro (m)	Filtro				Litologia			NE (m)	ND (m)	Vazão (m³/h)	Observação	Altura saturada (m)
							De	Até	Extensão (m)	Material	De	Até	Material					
1500003774	487513	9994811	CAESA	160	160	762 304,8	95 135	107 147	12 12	Aço sem costura 10" Aço sem costura 10"	0 5 22 36 54 70 88 95 107 130 135 147	5 22 36 54 70 88 95 107 130 135 147 160	Solo laterítico Areia argilosa Argila arenosa Argila Areia argilosa Argila arenosa Areia argilosa Areia média Areia argilosa Areia fina Areia grossa Areia argilosa	38	52	90	Após estabilização	108
1500003775	487482	9994780	CAESA	140	140	762 204,8	105 128	117 134	12 6	Aço sem costura 10" Aço sem costura 10"	0 5 23 38 56 60 74 90 97 105 117 122 128 134	5 23 38 56 60 74 90 97 105 117 122 128 134 140	Solo laterítico Areia argilosa Argila arenosa Areia argilosa Areia muito fina Areia argilosa Argila arenosa Areia argilosa Areia fina Areia média Areia argilosa Argila arenosa Areia média Areia argilosa	34	44	77	Após estabilização	96
1500003776	487450	9994719	CAESA	155	155	762 304,8	95 132	107 144	12 12	Aço sem costura 10" Aço inox com rosca e luva 10"	0 5 24 42 47 53 66 79 90 95 107 124 132 144	5 24 42 47 53 66 79 90 95 107 124 132 144 155	Solo laterítico Areia argilosa Argila arenosa Areia argilosa Areia muito fina Areia argilosa Argila Argila arenosa Areia argilosa Areia média Argila arenosa Areia muito fina Areia média Areia argilosa	36	48	82	Após estabilização	107

7.2.2 – Poços Catalogados da CPRM/SIAGAS 2010 com Perfis Litológicos, Perfis Construtivos e Produtividade em Macapá – AP (continuação).

Siagas	UTM_E	UTM_N	Proprietário	Profundidade (m)	Revestimento (m)	Diâmetro (m)	Filtro				Litologia			NE (m)	ND (m)	Vazão (m³/h)	Observação	Altura saturada (m)
							De	Até	Extensão (m)	Material	De	Até	Material					
1500003792	487080	10010408	Roberto Abraão	40	40	381 254	24	30	6	Plástico geomecânico 6"	0 6 16 22 24 30	6 16 22 30 40	Solo laterítico Argila arenosa Areia argilosa Areia fina Areia média Areia argilosa	7	11	16	Após estabilização	29
1500003794	490974	10002579	CAESA	160	160	609,6 254 203,2	93 132	105 144	12 12	Plástico geomecânico 6" Pedras 6"	0 6 26 42 48 76 88 93 105 122 128 132 144	6 26 42 48 76 88 93 105 122 128 132 144	Solo laterítico Argila arenosa Areia argilosa Areia fina Areia argilosa Argila arenosa Areia argilosa Areia média Areia argilosa Argila arenosa Areia fina Areia média Areia argilosa	36	41	30	Após estabilização	119
1500003801	481083	10002026	-	31	31	203,2	24	30	6	Plástico geomecânico 6"	0 4 10 15 19 22 24 30	4 10 15 19 22 24 31	Solo laterítico Argila arenosa Areia argilosa Argila arenosa Areia muito fina Areia fina Areia média Areia argilosa	8	11	13	Após estabilização	20
1500003802	487482	10005189	-	150	150	609,6 381 304,8	82 130	94 142	12 12	Plástico geomecânico 8" Pedras 8"	0 5 16 24 40 55 76 82 94 110 124 130 142	5 16 24 40 55 76 82 94 110 124 130 142	Solo laterítico Argila arenosa Areia argilosa Argila arenosa Areia argilosa Areia muito fina Areia fina Areia média Areia argilosa Areia muito fina Areia fina Areia média Areia argilosa	27	38	90	Após estabilização	112

7.2.2 – Poços Catalogados da CPRM/SIAGAS 2010 com Perfis Litológicos, Perfis Construtivos e Produtividade em Macapá – AP (continuação).

Siagas	UTM_E	UTM_N	Proprietário	Profundidade (m)	Revestimento (m)	Diâmetro (m)	Filtro				Litologia			NE (m)	ND (m)	Vazão (m³/h)	Observação	Altura saturada (m)
							De	Até	Extensão (m)	Material	De	Até	Material					
1500003807	489985	10002579	CAESA	160	160	609,6 381 311,15	84 128	96 140	12 12	Plástico geomecânico 8" Pedras 8"	0 5 18 32 50 68 73 80 84 96 118 124 128 140 152	5 18 32 50 68 73 80 84 96 118 124 128 140 152	Solo laterítico Areia argilosa Argila arenosa Areia argilosa Argila arenosa Areia argilosa Areia muito fina Areia fina Areia média Areia argilosa Areia muito fina Areia fina Areia média Areia argilosa Argila arenosa	30	42	7,5	Após estabilização	118
1500003808	490974	10001965	CAESA	160	160	609,6 444,5 311,15	90 130	102 142	12 12	Plástico geomecânico 8" Plástico geomecânico 8"	0 5 22 28 31 45 72 80 86 90 102 116 120 126 130 142 154	5 22 28 31 45 72 80 86 90 102 116 120 126 130 142 154	Solo arenoso Argila arenosa Areia argilosa Areia fina Areia argilosa Argila arenosa Areia argilosa Areia muito fina Areia fina Areia média Areia argilosa Argila arenosa Areia muito fina Areia fina Areia média Areia argilosa Argila arenosa	32	44	90	Após estabilização	116
1500004302	493447	10013908	CAESA	16	16	203,2	4	15	11	Plástico geomecânico 6"	0 0,5 3 7	0,5 3 7 16	Solo argiloso Argila Argila arenosa Areia média	3	6	27	Após estabilização	10

7.2.2 – Poços Catalogados da CPRM/SIAGAS 2010 com Perfis Litológicos, Perfis Construtivos e Produtividade em Macapá – AP (continuação).

Siagas	UTM_E	UTM_N	Proprietário	Profundidade (m)	Revestimento (m)	Diâmetro (m)	Filtro				Litologia			NE (m)	ND (m)	Vazão (m³/h)	Observação	Altura saturada (m)		
							De	Até	Extensão (m)	Material	De	Até	Material							
1500004486	483648	10015597	CAESA	42	42	152,4	12	24	12	Plástico geomecânico 4"	0	0,5	Solo orgânico	6	8,5	12	Após estabilização	33,5		
							33	39	6	Plástico geomecânico 4"	0,5	12	Areia argilosa							
											12	24	Areia média							
											24	33	Argila arenosa							
											33	39	Areia média							
											39	42	Areia argilosa							

### **7.3 – Resultados Hidrogeoquímicos das coletas de abril e outubro de 2012**

7.3.1 – Análises físico-químicas e bacteriológicas realizadas em Macapá durante a primeira campanha de amostragem de água de 30 poços no período chuvoso em abril de 2012.

Poço	Longitude decimal	Latitude decimal	T (°C)	Cor (Pt/Co)	Turbidez (NTU)	CE (µS/cm)	Eh (mV)	pH in situ	pH a 20°C	STD (mg/L)	Alcalinidade Total (mg/L)	Dureza (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Cálcio (mg/L)	Magnésio (mg/L)	Ferro (mg/L)	Manganês (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Sulfato (mg/L)	E. coli - P/A em 100 mL	C. Totais (P/A em 100 mL)	Nitrato (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrogênio Orgânico (mg/L)	Nitrogênio Total Kjeldahl (mg/L)	Nitrogênio Total (mg/L)	Carbonato (mg/L)	Bicarbonato (mg/L)	
MPA01	-51,0509	0,0292	24,37	<5	0,51	95	74,6	5,8	4,54	68	<5	0,82	13,40	0,38	0,06	0,16	0,01	<0,0001	8,86	<0,5	0	0	5,92	<0,02	0,38	0,13	0,51	6,4	0	0	
MPA02	-51,0403	0,0962	24,53	<5	7,3	85	105,5	5,39	4,82	57	6	0,90	17,12	0,19	0,15	0,13	1,02	0,004	8,60	2,32	0	0	4,65	<0,02	0,37	0,22	0,59	5,2	0	6	
MPA03	-51,0862	0,0923	31,33	<5	2,7	57	219	5,71	4,76	42	7	1,24	6,61	0,52	0,07	0,26	0,37	0,004	8,81	0,50	0	0	2,082	<0,02	<0,1	0,18	0,18	2,3	0	6	
MPA04	-51,0628	0,0730	30,13	<5	1,9	200	28,9	5,32	5,45	176	14	4,50	27,54	3,32	0,88	0,56	4,17	0,017	30,52	<0,5	0	0	12,01	<0,02	1,0	0,10	1,10	13,1	0	13	
MPA05	-51,0542	0,0472	31,47	<5	1,5	46	78,1	5,87	4,51	38	7	0,55	3,89	0,35	0,04	0,11	0,03	0,001	2,07	<0,5	0	0	2,543	<0,01	0,21	<0,1	0,26	2,8	9	0	
MPA06	-51,0542	0,0547	31,87	<5	2,5	267	295,4	4,37	4,43	185	<5	3,83	39,38	5,33	0,99	0,33	0,26	0,003	51,57	0,83	0	0	14,51	<0,02	2,2	<0,1	2,28	16,8	0	0	
MPA07	-51,0632	0,0126	31,87	<5	0,45	210	86,5	5,1	4,54	143	<5	6,70	29,12	3,32	1,88	0,49	0,05	0,002	32,75	1,77	0	0	13,5	<0,02	1,6	<0,1	1,65	15,2	0	0	
MPA08	-51,0898	0,0048	29,97	5	0,69	132	204,1	5,65	4,40	104	<5	1,97	17,10	1,13	0,27	0,31	0,47	<0,0001	22,60	<0,5	0	1	5,95	<0,02	0,99	0,12	1,11	7,1	0	0	
MPA09	-51,0725	0,0068	29,80	<5	0,74	125	122,5	5,54	4,70	99	<5	6,76	11,01	2,33	1,79	0,56	0,25	0,005	13,70	0,53	0	1	7,81	<0,02	2,0	<0,1	2,07	9,9	0	0	
MPA10	-51,0759	0,0417	30,00	<5	4,0	121	203,3	5,82	4,53	102	8	2,52	15,83	0,44	0,69	0,19	0,09	<0,0001	14,49	<0,5	0	1	5,98	<0,02	0,27	<0,1	0,28	6,3	0	8	
MPA11	-51,0748	0,0288	30,83	<5	0,82	57	122,4	4,66	5,12	49	<5	0,44	7,95	0,39	0,03	0,09	0,08	<0,0001	10,47	<0,5	0	1	2,01	<0,02	0,22	<0,1	0,28	2,3	0	0	
MPA12	-51,0713	0,0198	29,97	<5	0,72	75	111,5	5,33	5,73	49	<5	6,80	1,96	3,31	1,20	0,93	7,25	0,082	3,63	<1	0	1	<0,2	<0,02	1,3	0,67	1,97	2,0	0	0	
MPA13	-51,0439	0,0785	29,93	5	0,32	220	-97,4	6,41	4,80	171	<5	29,30	24,16	7,79	10,60	0,68	0,01	0,004	31,02	0,73	1	1	12,83	<0,02	2,6	0,21	2,81	15,6	0	0	
MPA14	-51,1340	0,0776	31,90	<5	14	107	114,2	5,52	4,60	92	<5	3,03	12,17	1,24	0,82	0,24	0,21	<0,0001	15,36	<0,5	0	1	4,92	<0,02	0,99	<0,1	1,06	6,0	0	0	
MPA15	-51,0591	0,0383	30,27	<5	0,86	190	235,2	5,85	4,42	161	<5	9,80	22,50	6,90	2,57	0,82	0,09	0,002	20,32	3,66	0	1	14,93	<0,02	<0,1	0,23	0,23	15,2	0	0	
MPA16	-51,0831	0,0376	29,63	<5	0,38	259	14,7	5,62	4,42	229	<5	15,77	38,51	12,50	5,34	0,59	0,03	0,004	44,08	6,41	0	1	11,72	<0,02	0,36	0,46	0,82	12,5	0	0	
MPA17	-51,0930	0,0367	29,87	<5	19	53	118,8	5,37	4,95	41	<5	0,55	7,07	0,02	0,10	0,07	1,22	0,010	6,41	<0,5	0	0	1,781	<0,02	0,10	<0,1	0,17	2,0	0	0	
MPA18	-51,1194	0,0454	30,03	<5	4,1	145	246,9	5,86	4,12	114	<5	16,59	5,58	1,78	4,88	1,07	0,72	0,013	10,89	4,90	0	1	7,89	<0,02	<0,1	0,17	0,17	8,1	0	0	
MPA19	-51,1329	0,0421	29,50	5	14	83	117,4	5,78	4,09	62	<5	2,10	8,62	0,45	0,44	0,25	2,21	0,006	11,01	<0,5	0	1	2,29	<0,02	<0,1	0,19	0,19	2,5	0	0	
MPA20	-51,0698	0,0496	29,73	<5	<0,1	74	186,8	5,72	4,48	55	<5	1,48	7,75	0,42	0,19	0,24	0,04	<0,0001	7,87	<0,5	0	0	2,71	<0,02	<0,1	<0,1	<0,1	2,7	0	0	
MPA21	-51,0664	0,0910	30,17	<5	0,29	172	-4	5,56	4,02	133	<5	11,66	9,82	2,44	2,96	1,04	0,04	0,004	7,26	<0,5	0	1	13,09	<0,02	<0,1	0,12	0,12	13,2	0	0	
MPA22	-51,0847	0,1039	29,93	<5	2,9	67	238,4	5,27	5,24	50	<5	8,42	7,16	0,48	2,83	0,33	0,73	0,013	6,32	2,10	0	0	0,888	<0,02	0,36	0,16	0,52	1,4	0	0	
MPA23	-51,0468	0,1020	29,47	<5	<0,1	171	208,9	5,48	3,87	126	<5	1,73	5,77	0,29	0,32	0,23	0,60	0,003	3,38	<0,5	0	1	2,22	<0,02	<0,1	0,23	0,23	2,5	0	0	
MPA24	-51,0918	0,0719	29,30	<5	<0,1	51	-50,1	5,73	4,65	40	<5	0,90	6,16	0,20	0,15	0,13	0,10	0,001	5,20	0,90	0	1	2,841	<0,02	0,11	<0,1	0,20	3,0	0	0	
MPA25	-51,0815	0,0773	29,86	<5	0,66	211	106,6	4,7	4,46	136	<5	1,81	23,34	1,36	0,24	0,30	0,02	0,000	29,00	0,88	0	1	12,5	<0,02	1,5	0,15	1,65	14,2	0	0	
MPA26	-51,0543	0,1140	30,53	<5	<0,1	124	72,9	4,82	4,45	82	13	1,41	12,95	1,02	0,06	0,31	0,01	<0,0001	10,72	<0,5	0	0	5,47	<0,02	<0,1	0,25	0,25	5,7	0	13	
MPA27	-51,1173	0,0910	29,93	<5	0,56	238	207,8	4,5	4,11	142	0	8,27	22,03	2,78	1,42	1,15	0,01	0,004	24,36	<0,5	0	1	11,03	<0,02	0,85	0,70	1,55	12,6	0	0	
MPA28	-51,0992	0,0889	29,43	<5	<0,1	274	233,6	4,16	4,32	180	<5	10,45	28,04	3,41	2,31	1,14	0,02	0,009	27,46	1,23	1	1	9,14	<0,02	0,20	<0,1	0,23	9,4	0	0	
MPA29	-51,0488	0,0851	29,63	690	<0,1	166	260,5	3,98	4,98	114	<5	7,25	17,33	2,85	2,14	0,46	9,52	0,036	21,73	0,93	1	1	9,51	<0,02	1,6	0,58	2,18	11,7	0	0	
MPA30	-51,0643	0,1040	28,70	<5	<0,1	181	104,2	4,24	4,94	116	<5	4,97	20,93	1,79	1,43	0,34	0,03	0,002	32,41	4,74	0	1	5,84	<0,02	1,8	0,37	2,17	8,0	0	0	
MPA31	-51,1121	-0,0472	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA32	-51,0807	-0,0181	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

7.3.2 - Análises físico-químicas e bacteriológicas realizadas em Macapá durante a segunda campanha de amostragem de água de 30 poços no período de estiagem em outubro de 2012.

Poço	Longitude decimal	Latitude decimal	T (°C)	Cor (Pt/Co)	Turbidez (NTU)	CE (µS/cm)	Eh (mV)	pH in situ	pH a 20°C	STD (mg/L)	Alcalinidade Total (mg/L)	Dureza (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Cálcio (mg/L)	Magnésio (mg/L)	Ferro (mg/L)	Manganês (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Sulfato (mg/L)	E. coli - P/A em 100 mL	C. Totais (P/A em 100 mL)	Nitrato (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrogênio Orgânico (mg/L)	Nitrogênio Total Kjeldahl (mg/L)	Nitrogênio Total (mg/L)	Carbonato (mg/L)	Bicarbonato (mg/L)	
MPA01	-51,0509	0,0292	30,9	<5	<0,1	98	408	4,80	4,54	80	<5	6,83	12,18	1,66	1,88	0,52	0,04	0,01	11,59	0,59	0	0	4,74	<0,02	<0,1	<0,1	<0,1	4,70	0	0	
MPA02	-51,0403	0,0962	30,1	<5	4,6	131	385	4,90	4,44	78	<5	3,21	27,88	0,92	0,70	0,36	0,76	0,01	13,13	2,27	0	0	10,45	<0,02	<0,1	0,12	0,12	10,60	0	0	
MPA03	-51,0862	0,0923	30,8	<5	<0,1	19	349	5,60	4,83	15	<5	2,44	1,27	0,31	0,76	0,13	0,02	<0,001	1,38	0,66	0	0	0,44	<0,02	<0,1	0,25	0,25	0,70	0	0	
MPA04	-51,0628	0,0730	28,8	<5	<0,1	127	387	5,20	4,35	99	<5	3,87	17,59	1,64	0,30	0,76	0,73	0,06	9,77	6,78	0	1	5,84	<0,02	<0,1	0,13	0,13	6,00	0	0	
MPA05	-51,0542	0,0472	31,5	<5	<0,1	151	381	4,90	4,40	83	<5	5,23	21,86	2,40	0,97	0,69	0,12	0,00	21,10	<0,5	0	1	7,40	<0,02	2,00	0,14	2,14	9,50	0	0	
MPA06	-51,0542	0,0547	30,7	<5	<0,1	236	296	5,20	4,62	159	<5	5,40	24,47	2,02	0,85	0,80	1,88	0,01	23,41	<1	0	0	11,22	<0,02	1,60	1,20	2,80	14,00	0	0	
MPA07	-51,0632	0,0126	32,1	<5	0,35	116	382	4,60	4,38	93	<5	3,18	12,89	1,82	0,51	0,46	0,12	0,00	14,70	<0,5	0	0	4,71	0,11	1,10	0,17	1,27	6,10	0	0	
MPA08	-51,0898	0,0048	30,2	<5	<0,1	21	429	4,50	4,95	37	<5	7,30	1,31	0,77	2,50	0,26	0,09	0,00	2,46	<0,5	0	1	0,37	<0,02	0,10	<0,1	0,16	0,50	0	0	
MPA09	-51,0725	0,0068	31,2	<5	<0,1	13	398	4,70	5,08	6	8	0,99	1,14	0,14	0,30	0,06	0,01	<0,001	1,37	<0,5	0	0	<0,1	<0,02	<0,1	<0,1	<0,1	<0,5	0	0	
MPA10	-51,0759	0,0417	30,6	<5	<0,1	144	338	5,70	5,18	105	<5	1,37	28,61	0,15	0,32	0,14	0,01	0,00	17,34	<0,5	0	0	9,33	<0,02	<0,1	0,15	0,15	9,50	0	0	
MPA11	-51,0748	0,0288	31,5	<5	0,28	164	415	4,90	4,39	133	<5	6,32	23,24	2,62	1,62	0,55	0,03	0,00	19,80	<0,5	0	0	9,41	<0,02	0,30	<0,1	0,33	9,70	0	0	
MPA12	-51,0713	0,0198	29,6	<5	<0,1	183	421	4,90	6,93	117	14	9,59	20,94	4,13	2,84	0,61	0,01	0,00	20,75	4,07	0	0	7,17	<0,02	3,00	3,70	6,70	13,90	0	14	
MPA13	-51,0439	0,0785	28,2	<5	0,49	119	357	5,10	5,06	69	<5	6,13	15,94	1,41	1,59	0,53	0,04	<0,001	11,73	<0,5	1	1	7,12	<0,02	<0,1	0,24	0,24	7,40	0	0	
MPA14	-51,1340	0,0776	28,2	<5	8,4	11	353	4,90	5,23	<5	5	3,54	0,78	0,12	1,27	0,09	0,14	<0,001	1,44	<0,5	0	1	<0,1	<0,02	<0,1	0,13	0,13	<0,5	0	5	
MPA15	-51,0591	0,0383	29,1	<5	<0,1	71	385	5,20	4,68	42	<5	3,59	6,53	0,69	0,66	0,48	0,16	<0,001	10,13	2,80	0	0	3,04	<0,02	<0,1	0,21	0,21	3,30	0	0	
MPA16	-51,0831	0,0376	29,6	<5	<0,1	138	345	5,40	5,11	104	<5	8,36	21,53	1,39	2,38	0,59	0,04	0,01	12,94	1,04	0	0	8,32	<0,02	0,30	<0,1	0,39	8,70	0	0	
MPA17	-51,0930	0,0367	30,2	<5	0,32	19	232	5,20	5,04	31	<5	2,38	1,73	0,17	0,80	0,10	1,00	0,00	2,45	<0,5	0	0	0,23	<0,02	<0,1	0,30	0,30	0,50	0	0	
MPA18	-51,1194	0,0454	28,3	6	58	17	211	5,70	5,05	10	<5	3,14	1,95	0,18	1,02	0,14	2,07	<0,001	2,08	<0,5	1	1	0,37	<0,02	<0,1	0,28	0,28	0,60	0	0	
MPA19	-51,1329	0,0421	29,2	<5	<0,1	111	389	4,80	4,37	70	<5	2,78	11,07	1,03	0,42	0,42	0,04	0,00	7,44	2,51	0	0	6,70	<0,02	0,70	0,24	0,94	7,60	0	0	
MPA20	-51,0698	0,0496	32,1	<5	3,5	98	300	5,70	6,87	71	8	3,56	0,85	0,32	1,05	0,23	0,11	0,01	0,82	0,94	0	0	<0,1	<0,02	0,30	0,13	0,43	<0,5	0	8	
MPA21	-51,0664	0,0910	28,9	<5	<0,1	22	376	5,40	4,84	27	<5	1,10	1,89	0,14	0,23	0,13	0,06	<0,001	1,82	2,05	0	0	0,25	<0,02	<0,1	0,12	0,12	<0,5	0	0	
MPA22	-51,0847	0,1039	29,0	<5	2,0	124	358	4,90	7,55	72	<5	2,24	3,80	0,34	0,53	0,22	2,40	0,01	2,07	0,73	0	0	1,52	<0,02	<0,1	0,31	0,31	1,80	0	0	
MPA23	-51,0468	0,1020	29,7	<5	2,2	31	342	4,90	4,64	19	12	1,25	5,66	0,35	0,33	0,10	2,19	0,01	4,00	0,65	0	0	2,07	<0,02	<0,1	0,11	0,11	2,20	0	11	
MPA24	-51,0918	0,0719	29,0	<5	0,23	50	385	4,90	4,72	36	<5	1,79	7,21	0,34	0,35	0,22	0,09	<0,001	3,49	<0,5	1	1	3,19	<0,02	1,30	0,86	2,16	5,40	0	0	
MPA25	-51,0815	0,0773	30,1	<5	0,37	40	375	4,80	4,82	27	<5	1,26	4,35	0,40	0,20	0,19	0,05	0,00	3,23	0,78	0	1	2,03	<0,02	<0,1	0,21	0,21	2,20	0	0	
MPA26	-51,0543	0,1140	30,1	<5	1,2	13	344	5,20	4,93	10	<5	1,09	0,87	0,13	0,33	0,07	0,44	0,00	1,42	0,90	0	1	<0,1	<0,02	0,10	0,12	0,22	<0,5	0	0	
MPA27	-51,1173	0,0910	30,3	<5	<0,1	15	371	5,10	4,91	9	<5	0,61	0,88	0,13	0,15	0,06	0,04	<0,001	1,36	0,77	0	1	0,11	<0,02	0,10	<0,1	0,15	<0,5	0	0	
MPA28	-51,0992	0,0889	32,3	<5	<0,1	16	293	5,70	5,18	12	8	1,03	1,29	0,51	0,10	0,19	0,11	0,00	1,34	0,87	0	1	0,31	<0,02	<0,1	1,20	1,21	1,50	0	8	
MPA29	-51,0488	0,0851	32,2	<5	<0,1	33	386	5,30	4,99	22	<5	1,14	3,28	0,31	0,25	0,12	0,01	<0,001	1,95	<0,5	0	0	1,85	<0,02	<0,1	0,15	0,15	2,00	0	0	
MPA30	-51,0643	0,1040	30,2	<5	106	158	299	5,30	4,72	117	<5	15,09	20,23	2,84	4,89	0,70	2,55	0,02	19,59	0,76	0	1	10,35	<0,02	0,20	0,23	0,43	10,80	0	0	
MPA31	-51,1121	-0,0472	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA32	-51,0807	-0,0181	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**7.3.3 - Análises de metais pesados, BTEX, fenóis e de isótopos ambientais realizadas em Macapá durante a segunda campanha de amostragem de água de 30 poços no período de estiagem em outubro de 2012.**

Poço	Longitude decimal	Latitude decimal	Índice de Fenóis (mg/L)	Bário (mg/L)	Níquel (mg/L)	Zinco (mg/L)	Cádmio (mg/L)	Chumbo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Mercúrio (mg/L)	Arsênio (mg/L)	Benzeno (mg/L)	Tolueno (mg/L)	Etilbenzeno (mg/L)	o-Xileno (mg/L)	m,p-Xilenos (mg/L)	Trício	δD‰	δ <sup>18</sup> O‰	Percentual de Carbono Moderno (pMC)	Fração de Carbono Moderno (Fmdn)	Razão C13/C12		
MPA01	-51,0509	0,0292	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,14 ± 0,18	-	31,45	-5,75	-	-	-	
MPA02	-51,0403	0,0962	<0,001	0,014	0,005	0,014	<0,001	0,004	0,011	<0,001	<0,0001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	-	-	-	-	-	-	-	
MPA03	-51,0862	0,0923	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,36 ± 0,10	-	-	-	-	-	-	-
MPA04	-51,0628	0,0730	0,002	0,034	0,006	0,033	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,0001	<0,001	<0,001	0,004	<0,001	<0,001	<0,002	1,02 ± 0,13	-	-	-	-	-	-	-
MPA05	-51,0542	0,0472	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA06	-51,0542	0,0547	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA07	-51,0632	0,0126	<0,001	0,034	<0,001	0,027	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,0001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA08	-51,0898	0,0048	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75 ± 0,10	-	27,31	-5,23	-	-	-	-
MPA09	-51,0725	0,0068	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA10	-51,0759	0,0417	<0,001	0,004	<0,001	0,141	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,0001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA11	-51,0748	0,0288	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA12	-51,0713	0,0198	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA13	-51,0439	0,0785	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA14	-51,1340	0,0776	<0,001	<0,001	<0,001	0,220	<0,001	0,019	0,234	<0,001	<0,0001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	1,02 ± 0,15	-	25,32	-4,96	-	-	-	-
MPA15	-51,0591	0,0383	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA16	-51,0831	0,0376	<0,001	0,023	<0,001	0,011	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,0001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA17	-51,0930	0,0367	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA18	-51,1194	0,0454	<0,001	0,003	<0,001	0,085	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,0001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA19	-51,1329	0,0421	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,69 ± 0,11	-	-	-	-	-	-	-
MPA20	-51,0698	0,0496	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA21	-51,0664	0,0910	<0,001	0,003	<0,001	0,027	<0,001	<0,001	0,002	<0,001	<0,0001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA22	-51,0847	0,1039	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA23	-51,0468	0,1020	<0,001	0,003	<0,001	0,022	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,0001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA24	-51,0918	0,0719	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA25	-51,0815	0,0773	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA26	-51,0543	0,1140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,65 ± 0,14	-	22,67	-4,64	-	-	-	-
MPA27	-51,1173	0,0910	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA28	-51,0992	0,0889	0,002	0,010	0,070	0,153	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,0001	<0,001	<0,001	0,003	<0,001	<0,001	<0,002	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA29	-51,0488	0,0851	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA30	-51,0643	0,1040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MPA31	-51,1121	-0,0472	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	106,6+/-0,4 pMC	1,0655 +/-0,0040	-23,3	-	-
MPA32	-51,0807	-0,0181	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24120+/-130 BP	0,0497 +/-0,0008	-24,4	-	-

#### **7.4 – Protocolo de Guia de Coleta de Amostras Bioagri Ambiental**

## **Apresentação**

Este guia fornece informações básicas sobre os procedimentos adequados de coletas e preservação de amostras aquosas e sólidas para análises ambientais.

Embora muitas vezes, problemas ambientais decorrentes ou não de atividade antrópica sejam facilmente perceptíveis, a real dimensão destes problemas somente pode ser mensurada a partir de análises laboratoriais realizadas em locais onde possuam os recursos materiais e humanos mínimos necessários, existindo a necessidade da coleta e preservação de amostras para análises em laboratórios especializados, ou talvez de medidas tomadas no campo utilizando-se de instrumentos adequados. Por este motivo, é muito importante obedecer a critérios técnicos cuidadosamente definidos, com coletas sendo realizadas por profissionais qualificados para a função, pois estas são de fundamental importância para que os resultados das análises sejam confiáveis e representem da forma mais próxima possível à realidade. Sem estes cuidados a avaliação da qualidade ambiental pode gerar informações incorretas, dando uma falsa impressão a respeito da realidade, podendo induzir decisões errôneas causando graves prejuízos à saúde humana e preservação do meio ambiente.

Hoje sabemos que a coleta e a preservação das amostras têm influência muito importante sobre os resultados das análises. Águas naturais encontram-se em um sensível equilíbrio dinâmico, onde diversas espécies químicas e biológicas se mantêm estáveis. O simples contato de uma amostra com as paredes no frasco de coleta não apropriado podem alterar a composição da amostra. Também a temperatura e a forma de preservação da amostra podem influenciar na composição material da amostra. É importante ressaltar, que existe um tempo entre a coleta das amostras e a efetiva realização das análises, que pode variar de horas a meses dependendo do tipo de parâmetro em questão. Isto reforça a necessidade da adoção de critérios rígidos para a preservação e armazenamento das amostras, evitando a possível perda das espécies presentes, principalmente por transformação em outras formas químicas.

Na **tabela 7.4.1** a seguir constam os parâmetros a serem analisados, o tipo de frasco para coleta de amostra, a forma de preservação e o tempo para a realização da análise para amostras aquosas. Na **tabela 7.4.2** constam os parâmetros a serem analisados, o tipo de frasco para coleta de amostra, a forma de preservação e o tempo para a realização da análise para amostras sólidas.

Na **tabela 7.4.3** constam preservação, prazo e frascos para análises biológicas e microbiológicas. Na **tabela 7.4.4** constam preservação, prazo e frascos para testes de toxicidade. Na **tabela 7.4.5** temos a quantidade de frascos requeridos para atendimento de algumas legislações, tendo em vista o agrupamento de parâmetros num mesmo frasco.

No **anexo A1** a sequência para uso das bolsas nasço e os esquemas dos frascos de coleta de amostras líquidas (**anexo A2**) e de amostras sólidas (**anexo A3**).

**Tabela 7.4.1 - Frascos de Coleta, Volume Mínimo Necessário, Preservação e Prazo para Análise - Amostras de Águas e Efluentes.**

Espécie de Interesse	Frasco de Coleta	Volume de Amostra	Preservação/ Estocagem da Amostra	Prazo para Análise
Alcalinidade	Polietileno ou vidro	200 mL	Refrigerar a 4±2°C	Recomendável 24 horas Tolerável 14 dias
Acidez	Polietileno ou vidro	100 mL	Refrigerar a 4±2°C	Recomendável 24 horas Tolerável 14 dias
Ácidos Haloacéticos	Vial	2 x 40 mL	Refrigerar a 4±2°C 4 mg de Cloridrato de amônio/ vial	14 dias até extração Após a extração 21 dias até análise
Bacteriologia	Polietileno ou vidro (Bolsa NASCO)	100 mL	Tiosulfato de Sódio e refrigerar a < 10°C	24 horas
Brometo	Polietileno ou vidro	100 mL	Refrigerar a 4±2°C	28 dias
Bromato	Polietileno ou vidro	100 mL	2 gotas EDA 5%	28 dias
Carbamatos	Vidro Âmbar	1.000 mL	Refrigerar a 4±2°C	14 dias até extração 40 dias até análise
Carbono Orgânico Total (TOC)	Vidro	100 mL	HCl até pH<2, refrigerar a 4±2°C	Recomendável 7 dias Tolerável 28 dias
Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	Vidro	100 mL	Filtração membrana 0,45 µm HCl até pH<2, refrigerar a 4±2°C	Recomendável 7 dias Tolerável 28 dias
Cianeto	Polietileno ou vidro	1000 mL	NaOH 10N até pH >12, refrigerar a 4±2°C	14 dias
Clorato	Polietileno ou vidro	100 mL	Refrigerar a 4±2°C	28 dias
Cloreto	Polietileno ou vidro	250 mL	Refrigerar a 4±2°C	28 dias
Clorito	Polietileno ou vidro	100 mL	Refrigerar a 4±2°C	14 dias
Cloro Total e Residual	Polietileno ou vidro	500 mL	Não requerida	O mais breve possível
Clorofila A	Vidro	1.000 mL	Refrigerar a 4±2°C	5 dias até a extração e 15 dias a partir da extração
Coliformes Totais/Escherichia Coli	Bag ou frasco polietileno estéril	100 mL	Refrigerar a < 10°C	24 horas e 36 horas para águas tratadas
Condutividade Elétrica / Específica	Polietileno ou vidro	500 mL	Refrigerar a 4±2°C	28 dias
Cor	Polietileno ou vidro	500 mL	Refrigerar a 4±2°C	48 horas
Cromo Hexavalente	Polietileno ou vidro	500 mL	Refrigerar a 4±2°C	24 horas
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	Polietileno ou vidro	1.000 mL	Refrigerar a 4±2°C	Recomendável 24 horas Tolerável 7 dias
Demanda Química de Oxigênio (DQO) <sup>(1)</sup>	Polietileno ou vidro	100 mL	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> até pH<2, Refrigerar a 4±2°C	Recomendável 24 horas Tolerável 7 dias
Dureza Total	Polietileno ou vidro	100 mL	HNO <sub>3</sub> ou H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> até pH<2	06 meses
Índice de Fenóis	Vidro âmbar	500 mL	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> até pH< 4	28 dias
Fluoreto	Polietileno	100 mL	Não Requerida	28 dias
Fosfato (orto <sup>2</sup> )	Polietileno ou vidro	200 mL	Refrigerar a 4±2°C	48 horas

**Tabela 7.4.1 - Frascos de Coleta, Volume Mínimo Necessário, Preservação e Prazo para Análise - Amostras de Águas e Efluentes (continuação).**

Espécie de Interesse	Frasco de Coleta	Volume de Amostra	Preservação/ Estocagem da Amostra	Prazo para Análise
Fósforo Total	Polietileno ou vidro	100 mL	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> até pH<2, Refrigerar a 4±2°C	28 dias
Gás Carbônico (Dióxido de Carbono)	Polietileno ou vidro	100 mL	Não requerida	-
Glifosato	Polietileno ou vidro	100 mL	Não requerida	14 dias
Iodeto	Polietileno ou vidro	500 mL	Refrigerar a 4±2°C	24 horas
Microcistina	Vidro	100 mL	Refrigerar a 4±2°C	15 dias
Metais Totais (exceto Cromo VI)	Polietileno	500 ou 1000 mL	HNO <sub>3</sub> até pH<2	06 meses (exceto Hg = 28 dias)
Metais Solúveis	Mesmo que metais totais, porém a amostra deverá ser filtrada em membrana 0,45µm antes de ser preservada.			
Nitrogênio Amoniacal	Polietileno ou vidro	500 mL	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> até pH<2, Refrigerar a 4±2°C	Recomendável 7 dias Tolerável 28 dias
Nitrogênio Nitrato	Polietileno ou vidro	100 mL	Refrigerar a 4±2°C	48 horas
Nitrogênio Nitrito	Polietileno ou vidro	100 mL	Refrigerar a 4±2°C	48 horas
Nitrogênio Kjeldahl Total	Polietileno ou vidro	500 mL	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> até pH<2, Refrigerar a 4±2°C	Recomendável 7 dias Tolerável 28 dias
Odor	Polietileno	500 mL	Refrigerar a 4±2°C	O mais breve possível
Óleos e Graxas <sup>(3)</sup>	Vidro Âmbar	1.000 mL	HCl ou H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> até pH<2; Refrigerar a 4±2°C	28 dias
Orgânicos Purgáveis (Purge and Trap)	Vidro (Vial)	2 x 40 mL	HCl 1:1 (4 gotas) Refrigerar a + 4°C Obs.: Caso a amostra contenha cloro residual livre este deve ser eliminado antes da adição do ácido através da adição de 4 gotas de solução de tiosulfato de sódio a 10%.	07 dias s/ preserv. 14 dias c/preserv.

**Tabela 7.4.1 - Frascos de Coleta, Volume Mínimo Necessário, Preservação e Prazo para Análise - Amostras de Águas e Efluentes (continuação).**

Espécie de Interesse	Frasco de Coleta	Volume de Amostra	Preservação da Amostra	Prazo para Análise
Organoclorados e PCB's em água	Vidro âmbar, tampa rosqueável de teflon ou Plástico	2.000 mL	Refrigerar a 4±2°C	07 dias até a extração 40 dias após a extração
Oxigênio Consumido	Polietileno ou vidro	150 mL	Refrigerar a 4±2°C	24 horas
Oxigênio Dissolvido	Vidro de boca estreita e tampa esmerilhada	300 mL	2 mL de sulfato manganoso e 2 mL de reagente alcali-iodeto azida	8 horas (preferencialmente medida em campo com aparelho portátil)
Pesticidas	Vidro âmbar	1000 mL	Refrigerar a 4±2°C	07 dias até a extração 40 dias após a extração
pH	Polietileno ou vidro	200 mL	Refrigerar a 4±2°C	06 horas (preferencialmente medida em campo)
Radioatividade	Vidro âmbar	100 mL	HNO <sub>3</sub> até pH<2	1 ano
Série de Sólidos	Polietileno ou vidro	1.000 mL	Refrigerar a 4±2°C	07 dias
Sólidos Sedimentáveis	Polietileno ou vidro	1.000 mL	Refrigerar a 4±2°C	07 dias
Silica	Polietileno	200 mL	Refrigerar a 4±2°C	28 dias
Sulfato	Polietileno ou vidro	100 mL	Refrigerar a 4±2°C	28 dias
Sulfeto (idem para sulfeto de hidrogênio)	Polietileno ou Vidro	100 mL	Refrigerar a 4±2°C; adicionar 04 gotas de Acetato de Zinco 2N e NaOH até pH>9	07 dias
Sulfito <sup>(4)</sup>	Polietileno ou vidro	100 mL	Refrigerar a 4±2°C	24 horas
Surfactantes	Polietileno ou vidro	250 mL	Refrigerar a 4±2°C	48 horas
Turbidez	Polietileno ou vidro	200 mL	Refrigerar a 4±2°C	48 horas
Matriz analítica (Vinhaça)	Polietileno ou Vidro	2.000 mL	Refrigerar a 4±2°C	

- (1) Para efluentes com óleos vegetais ou gelatinas, não acidular, mantendo apenas a refrigeração.
- (2) Imediatamente após a coleta filtrar a amostra com membrana 0,45 µ. Este procedimento reduz a conversão de fosfatos condensados em ortofosfatos pela remoção de material suspenso e microbiológico, o qual pode catalisar a reação.
- (3) Não encher completamente o frasco.
- (4) Encher o frasco completamente, evitando contato com o ar.

**Tabela 7.4.2 - Frascos de Coleta, Volume Mínimo Necessário, Preservação e Prazo para Análise - Amostras de Solos e Sedimentos.**

Espécie de Interesse	Frasco de Coleta	Quantidade de Amostra (g)	Preservação/Estocagem da Amostra	Prazo para Análise
Orgânicos Voláteis	Frasco de Vidro de Boca Larga	Preencher o Frasco até a Boca 200g	Resfriar a 4±2°C	14 dias
Orgânicos Semi Voláteis	Frasco de Vidro de Boca Larga	200	Resfriar a 4±2°C	14 dias até extração 40 dias até análise
Dioxinas e Furanos	Frasco de Vidro de Boca Larga	500	Resfriar a 4±2°C	não se aplica
Pesticidas Organoclorados (Bioagri Ambiental)	Frasco de Vidro de Boca Larga	200	Resfriar a 4±2°C	14 dias até extração 40 dias até análise
PCB's	Frasco de Vidro de Boca Larga	200	Resfriar a 4±2°C	14 dias até extração 40 dias até análise
Compostos Organofosforados	Frasco de Vidro de Boca Larga	200	Resfriar a 4±2°C	14 dias até extração 40 dias até análise
Metais (Exceto Cr VI)	Frasco de Vidro ou de plástico de Boca Larga	200	Resfriar a 4±2°C	28 dias para Hg 180 dias para outros metais
Cromo VI	Frasco de Vidro ou de plástico de Boca Larga	200	Resfriar a 4±2°C	30 dias para digestão Análise em até 4 dias após extração
Cianetos	Frasco de Vidro ou de plástico de Boca Larga	200	Resfriar a 4±2°C	14 dias
Sulfeto	Frasco de Vidro ou de plástico de Boca Larga	200	Resfriar a 4±2°C	7 dias

**Tabela 7.4.3 - Preservação, prazo para análise e frascos a serem utilizados sem amostras para análises biológicas e microbiológicas.**

Variável biológica	Item	Preservação/Estocagem da Amostra	Prazo para análise	Frascos
Perifiton	Contagem e identificação	Formaldeído neutralizado a 4- 5% ou FAA (formol, ácido acético glacial e álcool) ou solução de Transeau (6:3:1) ou mertiolato (1:1000) ou lugol acético 3 – 5% para flagelados	a) um ano b)seis meses c)seis meses	Vidro âmbar ou polietileno
	Clorofila e Feofitina	Refrigerar e encaminhar ao laboratório o mais rápido possível	24 h oras	Vidro âmbar ou polietileno
	Contagem proporcional de espécies diatomáceas	Formaldeído neutralizado a 4 ou 5%	Seis meses	Vidro âmbar ou polietileno
Zooplâncton	Contagem e identificação	Além do formaldeído neutralizado a 40%, outros fixadores podem ser usados como etanol a 7% ou solução de lugol. O formaldeído pode causar distorção em algumas formas de retíferos. Para evitar evaporação, juntar à amostra 5% de glicerina. Em amostras turvas será útil acrescentar 0,04% do corante rosa de bengala.	Um ano	Vidro ou polietileno
Cianobactérias	Polietileno ou vidro	1.000 mL	Lugol refrigerado 4±2°C	06 meses

**Tabela 7.4.4** - Preservação, prazo para análise e frascos a serem utilizados sem amostras para testes de toxicidade.

Organismo teste	Tipo de amostra	Teste	Volume de amostra	Preservação/ Estocagem	Frascos
Algas	Águas ou efluentes	Toxicidade aguda / crônica	1.000 mL	Refrigeração até o período de 36 horas e congelamento após 36 horas	Vidro ou polietileno
Daphnia	Águas ou efluentes	Toxicidade aguda	1.000 mL	Refrigeração até o período de 36 horas e congelamento após 36 horas	Vidro ou polietileno
Ceriodaphnia	Águas ou efluentes	Toxicidade crônica	1.000 mL	Refrigeração até o período de 36 horas e congelamento após 36 horas	Vidro ou polietileno
Peixes	Águas	Toxicidade crônica	5.000 mL	Refrigeração até o período de 36 horas e congelamento após 36 horas	Vidro ou polietileno
Peixes	Efluentes	Toxicidade aguda	20 Litros	Refrigeração até o período de 36 horas e congelamento após 36 horas	Vidro ou polietileno
		Toxicidade crônica	5.000 mL		
Microtox	Águas ou efluentes	Toxicidade aguda	1.000 mL	Refrigeração até o período de 36 horas e congelamento após 36 horas	Vidro ou polietileno

#### Referências Bibliográficas

- Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21<sup>st</sup> edition, APHA / AWWA / WEF, New York.
- Markert, B. , 1994. Environmental Sampling for Trace Analysis, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, Federal Republic of Germany.
- Agudo, E.G. et al. , 1987. Guia de Coleta e Preservação de Amostras de Água, CETESB Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo.
- NBR 9897 / ABNT - Planejamento de Amostragem de Efluentes Líquidos e Corpos Receptores.
- NBR 9898 / ABNT - Preservação e Técnicas de Amostragem de Efluentes Líquidos e Corpos Receptores.
- NBR 10007/ABNT – Amostragem de resíduos, 2° edição, versão 2004.
- EPA - Surface Impoundment Study – Section N°B2 – 18/04/2000.
- EPA SW 846 – Chapter Two – Choosing the correct procedure.
- Determination of Inorganic Anions in Drinking Water by Ion Chromatography.
- EPA SW 846 – Method 9065 Phenolics (Spectrometric, Manual 4-AAP With Distillation)

**Tabela 7.4.5 - Quantidade mínima de amostra para atendimento de algumas legislações e métodos – Amostras Aquosas**

Tipo	Vidro Âmbar	Vidro Âmbar	Plástico	Plástico	Plástico	Vidro Âmbar	Vial	Plástico	Plástico	Plástico	Bolsa Nasco	Vidro	Vidro	Medidas de Campo
Volume	1000mL	1000mL	500mL	500mL	500mL	1000mL	40mL	500mL	100mL	100mL	100mL	100mL	100mL	
Preservação	-----	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH < 2	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH < 2	HNO <sub>3</sub> pH < 2	NaOH pH > 12	HCl pH < 2	4 gotas HCl 50%	Acetato de Zinco	-----	2gotas EDA 5%	-----	Lugol	HNO <sub>3</sub> 30%	
Temperatura	Refrig.	Refrig.	Refrig.	Refrig.	Refrig.	Refrig.	Refrig.	Refrig.	Refrig.	Refrig.	Refrig.	Refrig.	Refrig.	
Legislação														
NTA 60	2		1	1	1						2			pH
Conama 357/05 Artigos 14, 15 ou 16	5	1		1	1	1	2	1	1	1	1	1		pHO.D.
Conama 357/05 Artigo 34	2	1		1	1	1	2	1		1				pHTemp.
Portaria 518/04 MS	3		1	1	1		2	1	1	1	2		1	pH Cl Livre
Artigo 18 Decreto 8468/76	2	1		1	1	1				1				pHTemp.
Artigo 19-A Decreto 8468/76	1	1	1	1	1	1		1						pHTemp.
Artigo 11 Decreto 8468/76	2	1		1	1	1		1			2			pH O.D.
Metais (**)				1										
VOC (EPA 8260) (30 compostos)							2							
SVOC (EPA 8270)	2													
Demais SVOC	1 a 3 (*)													
Diretiva 98 CEE	5		1	1	1		2	1		1	2			pH
EPA Drinking Water (MCL's)	5		1	1	1		2	1		1	2			pH

(\*) Dependendo do limite de quantificação desejado

(\*\*) Metais: Filtrado ou não dependendo do estudo, exceto Cromo VI.

**Tabela 7.4.5** - Quantidade mínima de frascos necessários para atendimento de algumas legislações e métodos – Amostras Sólidas (continuação).

<b>Tipo</b>	<b>Vidro de Boca Larga (Tipo Frasco de Palmito) ou Pote Plástico</b>	<b>Vidro de Boca Larga (Tipo Frasco de Palmito)</b>	<b>Vidro de Boca Larga com tampa metálica</b>
<b>Volume do Recipiente e Massa Mínima Requerida</b>	<b>500 ou 1000mL (mínimo de 0,5kg de amostra)</b>	<b>500 ou 1000mL (mínimo de 0,5kg de amostra)</b>	<b>100mL (Deverá ser preenchido completamente com a amostra)</b>
<b>Temperatura</b>	<b>Refrig.</b>	<b>Refrig.</b>	<b>Refrig.</b>
<b>Legislação/Método</b>			
NBR 10004 – Classificação de Resíduos Sólidos	<b>1 (*)</b>		
Metais e outros parâmetros inorgânicos	<b>1</b>		
VOC's (EPA 8260)			<b>1</b>
SVOC's (EPA 8270)		<b>1</b>	
Demais Compostos Orgânicos		<b>1</b>	

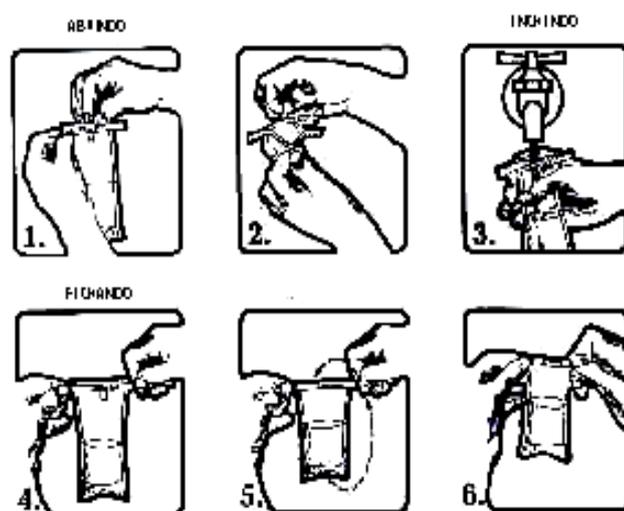
(\*) deverá ser garantido pelo menos 500g de amostra na base seca.

## Anexo A1 - Sequência para utilização das bolsas nasco

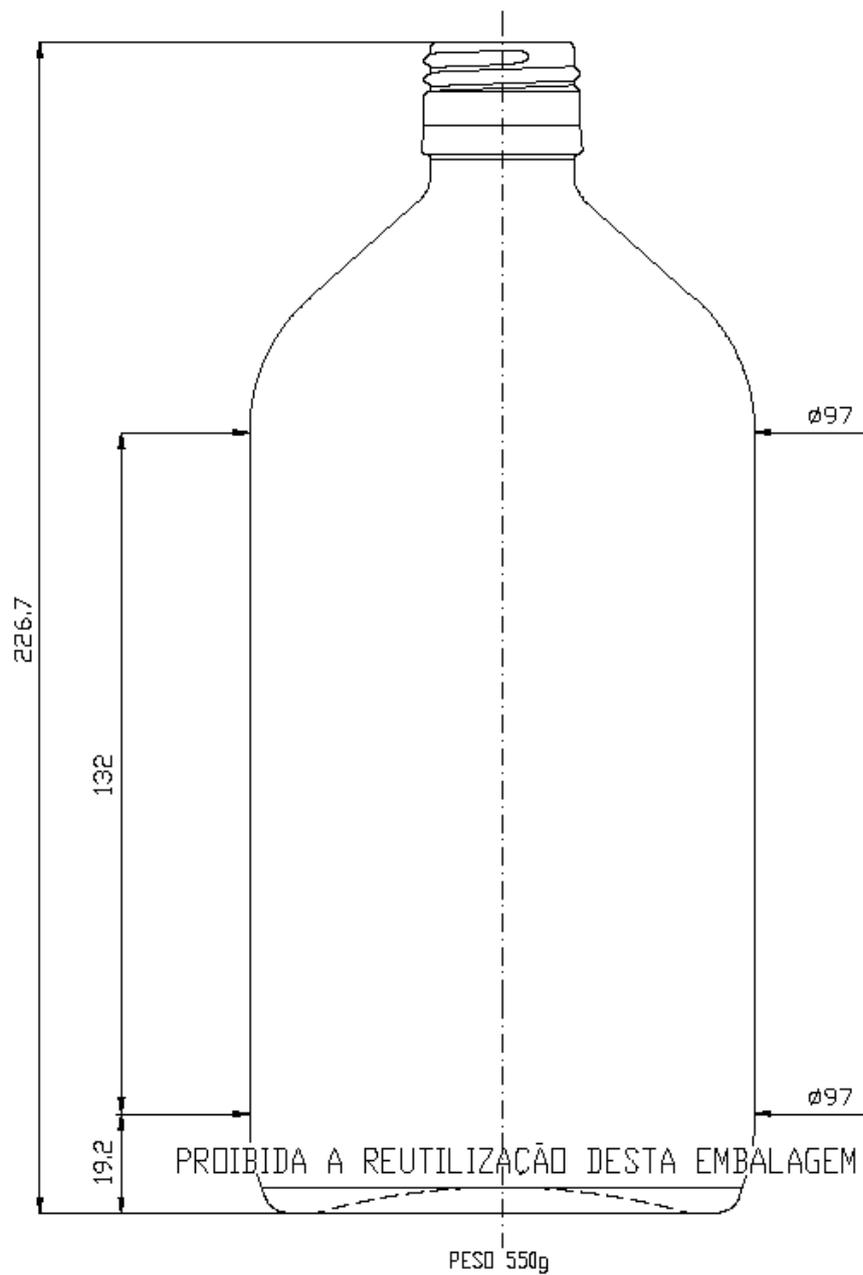
Procedimento para coletar amostras de águas utilizando a bolsa descartável THIO-bag Nasco:

- Rasgar o picote no topo da bolsa;
- Puxar as tiras laterais para abrir a bolsa sem tocar com as mãos na boca;
- Encher a bolsa até a marca de 100 mL;
- Puxar os arames para fechar a bolsa;
- Girar a bolsa em torno do arame 2 à 3 vezes;
- Dobrar os arames para manter a bolsa fechada.

Antes da coleta deve-se flambar a torneira ou se necessário limpar com solução de hipoclorito de sódio 2 % e mantê-la aberta, após a coleta manter a bolsa em temperatura de aproximadamente  $4\pm 2^{\circ}\text{C}$  em recipiente limpo e desinfetado.



## Anexo A2 - Esquema dos frascos de coleta – Amostras Líquidas



### Anexo A3 - Esquema dos frascos de coleta – Amostras Sólidas

