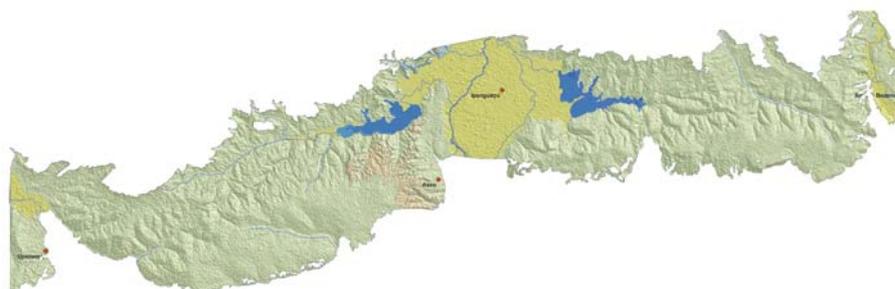




## Rede Cooperativa de Pesquisa

# COMPORTAMENTO DAS BACIAS SEDIMENTARES DA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO



## *“HIDROGEOLOGIA DO AQÜÍFERO AÇU NA BORDA LESTE DA BACIA POTIGUAR: TRECHO UPANEMA-AFONSO BEZERRA”*

### Meta D

### Caracterização Hidroquímica e de Vulnerabilidade

Outubro / 2007

Ministério de  
Minas e Energia

Ministério da  
Ciência e Tecnologia



**Rede Cooperativa de Pesquisa**

**COMPORTAMENTO DAS BACIAS SEDIMENTARES DA REGIÃO  
SEMI-ÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO**

***“HIDROGEOLOGIA DO Aqüífero Açú na Borda  
Leste da Bacia Potiguar: Trecho Upanema-  
Afonso Bezerra”***

**Meta D**

**Caracterização Hidroquímica e de Vulnerabilidade**

Execução:

**Serviço Geológico do Brasil - CPRM**

**Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN**

Outubro / 2007

## **REDE COOPERATIVA DE PESQUISA**

### ***COMPORTAMENTO DAS BACIAS SEDIMENTARES DA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO***

#### **Coordenação**

Período 2004/2005 – Dr. *Waldir Duarte Costa*

Período 2006/2007 – MSc *Fernando A. C. Feitosa*

#### **Instituições Participantes**

##### **Serviço Geológico do Brasil – CPRM**

Coordenação: MSc *Fernando Antonio Carneiro Feitosa*

MSc *Jaime Quintas dos Santos Colares*

##### **Universidade Federal da Bahia – UFBA**

Coordenadora: Dra. Joana Angélica Guimarães da Luz

##### **Universidade Federal de Campina Grande – UFCG**

Coordenador: Dr. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan

##### **Universidade Federal do Ceará – UFC**

Coordenadora: Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago

##### **Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**

Coordenador: Dr. José Geilson Alves Demetrio

##### **Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN**

Coordenador: Dr. José Geraldo de Melo

---

---

#### **Bacia Sedimentar Potiguar**

##### ***Hidrogeologia do Aquífero Açú na Borda Leste da Bacia Potiguar: Trecho Upanema-Afonso Bezerra***

#### **Meta A – Relatório Diagnóstico do Estado da Arte**

Dr. José Geraldo de Melo - UFRN

MSc José Ivan de Medeiros - UFRN

MSc Franklin de Moraes - CPRM

MSc Waldir Duarte Costa Filho - CPRM

MSc Michaelon Belchior de Vasconcelos - UFRN

Sâmara Daniele Oliveira de Moraes (estagiária) - UFRN

## **Meta B – Caracterização Geológica e Geométrica dos Aquíferos**

### **Item 1 – Revisão Geológica**

MSc Dunaldson Eliezer G. A. da Rocha - CPRM  
MSc Cristiano de Andrade Amaral - CPRM  
Dr. José Geraldo de Melo - UFRN  
MSc José Ivan de Medeiros - UFRN  
MSc Franklin de Moraes - CPRM  
MSc Michaelon Belchior de Vasconcelos - UFRN  
Sâmara Daniele Oliveira de Moraes (estagiária) - UFRN

### **Item 2 – Levantamento Geofísico por Eletroresistividade e Gravimetria**

Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco - UFC  
Dr. David Lopes de Castro – UFC  
Dr. Enéas Louzada - UFC  
MSc Mauro Lisboa Souza - UFC  
MSc Tércyo Rinaldo Gonçalves Pinéo - UFC

## **Meta C – Caracterização Hidrogeológica dos Aquíferos**

### **Itens 1.1, 1.2, 1.3: 1.4,, 1.6, 1.7, 1.8 e 1.10**

Dr. José Geraldo de Melo - UFRN  
MSc José Ivan de Medeiros - UFRN  
MSc Franklin de Moraes - CPRM  
MSc Waldir Duarte Costa Filho - CPRM  
MSc Michaelon Belchior de Vasconcelos - UFRN  
Sâmara Daniele Oliveira de Moraes (estagiária) – UFRN  
José Walquer Roque da Costa - CPRM

### **Item 1.5 – Nivelamento dos poços**

Dr. José Geraldo de Melo – UFRN  
Jorge de Vasconcelos Oliveira – CPRM  
Julimar de Araújo - CPRM  
MSc José Ivan de Medeiros - UFRN  
MSc Franklin de Moraes - CPRM  
MSc Michaelon Belchior de Vasconcelos – UFRN  
Carlos Alberto Ramos - CPRM  
Armando Arruda Câmara Filho - CPRM  
Sâmara Daniele Oliveira de Moraes (estagiária) – UFRN

### **Item 1.9 – Modelagem das águas subterrâneas**

Dr. João Manoel Filho - Consultor

## **Meta D – Caracterização Hidroquímica e de Vulnerabilidade**

### **Item 1 – Estudos Hidroquímicos e Isotópicos**

Dr. José Geraldo de Melo - UFRN  
MSc José Ivan de Medeiros - UFRN  
MSc Franklin de Moraes - CPRM  
José Walquer Roque da Costa - CPRM  
MSc Michaelon Belchior de Vasconcelos - UFRN  
Sâmara Daniele Oliveira de Moraes (estagiária) - UFRN

### **Item 2 – Estudos de Vulnerabilidade e Riscos de Contaminação**

Dr. Dr. José Geraldo de Melo - UFRN  
MSc José Ivan de Medeiros - UFRN  
MSc Franklin de Moraes - CPRM  
MSc Michaelon Belchior de Vasconcelos - UFRN  
Sâmara Daniele Oliveira de Moraes (estagiária) - UFRN

## **Meta E – Suporte ao Planejamento e a Gestão das Águas Subterrâneas**

Dr. José Geraldo de Melo - UFRN  
MSc José Ivan de Medeiros - UFRN  
MSc Franklin de Moraes - CPRM  
MSc Michaelon Belchior de Vasconcelos - UFRN  
Sâmara Daniele Oliveira de Moraes (estagiária) - UFRN

## **Meta F – Estruturação e Alimentação da Base de Dados em SIG**

Coordenação: Francisco Edson Mendonça Gomes – CPRM  
Eriveldo da Silva Mendonça - CPRM  
Érika Gomes Brito - CPRM  
Antônio Celso Rodrigues de Melo - CPRM  
Vicente Calixto Duarte Neto - CPRM

---

---

## SUMÁRIO DA META D

### CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E DE VULNERABILIDADE

1. Caracterização Hidroquímica e Qualidade das Águas	01
1.1 – Aspectos gerais	01
1.2 – Amostragem	01
1.3 – Balanço de massas	05
1.4 – Avaliação estatística dos resultados das análises químicas das águas do aquífero Açú	10
1.5 – Origem e mecanismo da salinização das águas do aquífero Açú	14
1.5.1 – Correlação entre parâmetros hidroquímicos	14
1.5.2 – Modificações hidrogeoquímicas na direção do fluxo subterrâneo e ao longo do tempo	15
1.5.3 – Fácies hidroquímicas e processos geoquímicos atuantes	26
1.6 – Qualidade das águas	31
1.6.1 – Qualidade das águas para o consumo humano	31
1.6.2 – Qualidade das águas para irrigação	34
2. Vulnerabilidade e riscos potenciais de contaminação das águas subterrâneas do aquífero Açú.	42
2.1 – Conceitos fundamentais	42
2.2 – Avaliação da vulnerabilidade	43
2.3 – Caracterização dos riscos de contaminação	47
Bibliografia	48

### LISTA DE FIGURAS

1 – Mapa de localização dos pontos de amostragem	03
2 – Condutividade elétrica das águas subterrâneas (novembro 2001)	17
3 – Condutividade elétrica das águas subterrâneas (dezembro 2005)	18
4 – Condutividade elétrica das águas subterrâneas (março 2007)	07
5 – Sólidos totais dissolvidos nas águas subterrâneas (dezembro 2005)	20
6 – Cloreto nas águas subterrâneas	21
7 – Sódio nas águas subterrâneas (dezembro 2005)	22
8 – Distribuição do cálcio nas águas subterrâneas (dezembro 2005)	23

9 – Magnésio nas águas subterrâneas (dezembro 2005)	24
10 – Bicarbonato nas águas subterrâneas 9dezembro 2005)	25
11 – Representação dos resultados das análises químicas de águas subterrâneas e superficiais em termos pontuais em termos percentuais de cátions e ânions no diagrama de Piper.	26
12 – Representação dos resultados das análises químicas de águas subterrâneas diagrama de Piper mostrando as modificações hidrogeoquímicas na direção do fluxo subterrâneo	27
13 – Diagrama de Durov expandido	30
14 – Classificação das águas para irrigação	38
15 – Índice de vulnerabilidade natural à produção do aquífero Açú	43
16 – Profundidade do nível das águas subterrâneas	45
17 Vulnerabilidade das águas subterrâneas do aquífero Açú	46
18 – Ocupação do solo e fontes de contaminação das águas subterrâneas	48

#### **LISTA DE TABELA**

1 – Relação dos pontos de amostragem de água e datas de coleta	04
2 – Resultado das análise químicas das amostra de água na região de Upanema-Afonso Bezerra	06
3 – Técnicas analíticas utilizadas	09
4 – Balanço iônico e avaliação da precisão dos resultados das análises químicas de água	11
5 – Parâmetros estatísticos dos resultados das análises químicas das águas do aquífero Açú	12
6 – Correlação entre parâmetros hidroquímicos	15
7 – Tipos de água segundo os íons dominantes e minerais dissolvidos	28
8 – Normas de potabilidade química	32
9 – Potabilidade das águas do aquífero Açú na borda sul da Bacia Potiguar	32
10 – Classificação da para irrigação quanto ao risco de salinidade	35
11 - Riscos de problemas de infiltração no solo devido sodicidade da água	36
12 – Concentração de cálcio contida na água do solo	36
13 – Concentração de íons em água e risco de toxicidade às plantas	37
14 – Classificação das águas do aquífero Açú para irrigação	39

## **META D – CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E DE VULNERABILIDADE**

Autores: Dr. José Geraldo de Melo – UFRN; MSc. José Ivan de Medeiros – UFRN; MSc Franklin de Morais – CPRM; MSc Mickaekon Belchior de Vasconcelos – UFRN; Sâmara Daniele Oliveira de Morais (estagiária) - UFRN

### **1. CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E QUALIDADES DAS ÁGUAS**

#### **1.1 - Aspectos gerais**

A hidrogeoquímica constitui uma disciplina de fundamental importância visto que tem como objetivo identificar e quantificar os constituintes químicos das águas, estabelecendo uma relação com o meio circundante. Também, pode contribuir na avaliação dos recursos das águas subterrâneas indicando e quantificando zonas de recarga e descarga de água evidenciando aspectos do fluxo subterrâneo. Os constituintes presentes em uma amostra da água refletem a sua qualidade para um determinado uso. Em geral, a qualidade da água subterrânea é boa, porém não raro sofre a influência de fatores intrínsecos e extrínsecos ao aquífero.

Ao se infiltrar no terreno e percolar por diferentes aquíferos a água tende a aumentar o teor de sais dissolvidos, podendo receber influências determinadas pelas condições climáticas, composição da água de recarga, velocidade do fluxo subterrâneo, tempo de contato água/rocha e interferências antrópicas.

A água tem uma capacidade de dissolução muito elevada (solvente universal) o que se atribui a sua estrutura molecular dipolar. Nas águas naturais este poder de dissolução é aumentado pela presença de ácido carbônico, formado pelo gás carbônico dissolvido, e ácidos orgânicos, principalmente húmicos, produzidos pela atividade dos seres vivos ao nível do solo. As águas naturais possuem sais dissolvidos em diferentes concentrações, sendo que as águas subterrâneas apresentam, em geral, teores mais elevados do que as águas superficiais, por estarem intimamente em contato com os materiais solúveis presentes no solo e nas rochas.

Em áreas com alto índice pluviométrico as taxas de recarga dos aquíferos também tendem a ser mais elevadas propiciando desta feita uma maior renovação das águas subterrâneas, com a conseqüente diluição dos sais em solução. Diferentemente, em climas áridos a pequena precipitação reduz a recarga e a oportunidade de lixiviação dos solos e diluição das concentrações salinas nas águas subterrâneas. Nestes casos, a salinização da superfície do solo em muitas situações é inevitável através da evaporação da água que sobe por ascensão capilar. Por ocasião das chuvas mais intensas os sais mais solúveis são carreados para as partes mais profundas do aquífero aumentando sua salinidade. Isto é o que acontece no nordeste do Brasil, onde, em muitas áreas, o problema consiste muito mais na salinização excessiva da água do que na inexistência da mesma.

Segundo Custódio (1994), os principais objetivos de um estudo hidrogeoquímico na investigação de aquíferos são contribuir principalmente para:

- Qualificar e quantificar a recarga;
- Estabelecer inter-relações ou separações entre subsistemas dentro de um sistema aquífero;
- Identificar áreas de descarga e suas características;
- Explicar a composição química atual da água subterrânea;
- Prever as mudanças esperáveis na composição química da água subterrânea sob determinadas ações ou seguindo uma certa pauta evolutiva;
- Determinar o grau de proteção da quantidade e qualidade de um recurso de água subterrânea.

No presente caso, os estudos hidroquímicos estão sendo conduzidos para atender os objetivos de caracterizar o uso das águas; diagnosticar sobre a origem e mecanismos de salinização; identificar zonas de recarga e descarga e avaliar os recursos de água exploráveis.

## 1.2 - Amostragem, resultados das análises e Técnicas utilizadas

A caracterização hidrogeoquímica e a qualidade das águas subterrâneas e superficiais da área de estudo são apresentadas com base nos resultados das análises físico-químicas de 76 amostras de água coletadas em Dezembro de 2005 nas seguintes fontes: 63 poços tubulares penetrando o aquífero Açú, 3 poços no aquífero Jandaira, 2 poços no aquífero cristalino e 6 amostras de águas superficiais (incluindo 1 amostra na Lagoa Ponta Grande; 1 amostra na lagoa Piató; 2 nas águas superficiais do rio Do Carmo e da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves); 3 amostras de água de chuva. A relação detalhada dos pontos de amostragem e suas correspondentes coordenadas é apresentado na Tabela 1. A distribuição espacial dos pontos de coleta é apresentada na Figura 1.

Informa-se que todos os cuidados durante a operação de coleta de amostras de água foram tomados, seguindo rigorosamente as normas nacionais e internacionais definidas para esse fim. A precisão dos resultados foi avaliada através da realização de balanço de massas, conforme será apresentado a seguir.

As análises foram efetuadas no Laboratório de Análises de Águas, Alimentos, e Efluentes da Fundação de Apoio à Educação e ao Desenvolvimento Tecnológico do Rio Grande do Norte (FUNCERN), e os resultados foram interpretados utilizando o *software AquaChem – Aqueous Geochemical Analysis, Plotting and Modeling* da *Waterloo Hydrogeology* (Lukas Calmbach and *Waterloo Hydrogeology*, 2002).

A Tabela 2 apresenta os resultados dos principais parâmetros obtidos das análises químicas, como o pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, ferro, dureza total, compostos da série nitrogenada, além dos principais cátions e ânions.

As técnicas analíticas utilizadas são apresentadas na Tabela 3 na qual se pode observar que a condutividade elétrica e o pH foram determinados pelo método potenciométrico; cor, turbidez, nitrato, nitrito e nitrogênio amoniacal, por espectrofotometria; sólidos totais a 105 °C, sólidos totais dissolvidos e sólidos em suspensão por gravimetria; alcalinidade a hidróxidos, alcalinidade a carbonatos, alcalinidade a bicarbonatos e alcalinidade total por titulometria e dureza total, cloreto, sulfato, carbonato, bicarbonato e cálcio também por titulometria; magnésio por cálculo; e finalmente, sódio e potássio por fotômetro de chama e ferro dissolvido por AAS chama.



Tabela 1 - Relação dos pontos de amostragem de água e datas de coleta.

<b>PONTOS</b>	<b>LOCAL</b>	<b>X(UTM)</b>	<b>Y(UTM)</b>
DR 941	Banguê/Assu	726792	9392835
AB 001	Sede Afonso Bezerra/AB	775113	9391975
CL 273 B	Bom Sucesso/NA	757900	9383800
CL 568	Santarém/AB	766964	9388427
CL 571	Sítio Ubacira/ Angicos	758102	9387953
CL 580	Tirafogo/AB	750123	9394380
CL 584		746515	9393790
CL 585	Tabuleiro Alto, Ass./ IP	747753	9393381
CL 586		748108	9394263
CL 587	Serra do Gado/IP	746820	9395420
CL 588	Angélica/IP	744963	9396143
CL 589	Canto Claro/IP	743854	9395396
CL 590	Língua de Vaca/IP	742339	9394957
CL 591	Capivara/ IP	739745	9395548
CL 591 A	EMPARN	737018	9390764
CL 895A	Umburana/IP	737801	9394124
CL 898		735520	9384660
CL 902A	Comunidade Porto da Escola/IP	747174	9389767
CL 902C	Sítio Deus Nos Guie	746850	9385800
CT 631	Sítio Sta. Maria/AB	760201	9394779
CT 634	Ass. Sta. Maria/AB	758582	9392539
DN 080	Comunidade Sta Clara/Assu	731629	9390626
DN 095	Fazenda Meladinha/Assu	717295	9383902
DN 104		715626	9385088
	Palheiro IV(Assentamento)/		
DN 113	Assu	712599	9387078
DN 137	Paulista/Assu	708801	9383701
DN 139	Paulista 2/ Assu	706022	9383111
DN 141	Bom Lugar 2/Assu	711576	9381064
DN 141A	Ass. Novo Pingo/ Assu	714655	9381083
DN 141B	Bom Lugar 3/Assu	712413	9377518
DN 149	Copasfal/Assu	724994	9382403
DN 159	Baixa do Juazeiro/UP	703220	9375640
DN 160	Baixa do Juazeiro/UP	705402	9377736
DN 161		707591	9381047
DN 164	Bom Lugar/ Assu	705301	9379018
	Baixa do		
DN 166	Dutra(Assentamento)/UP	702146	9379972
DN 267A	Canto Branco/AB	773150	9394582
DN 278	Faz. São Cirilo/AB	767643	9392657
DN 279	Santarém/AB	766143	9390330
DN 283	Tapuio/AB	773567	9390801
DN 286	Fazenda Flores/ Angicos	770045	9385323
DN 292	São Sebastião/ AB	773083	9399882
DN 293	Sede/AB	773034	9396053
DN 296	São Francisco/ AB	772391	9386592
DN 453	Fazenda Pau d'Árco/UP	695100	9381300
DN 454	Faz pau D'arco/ UP	693387	9380876
DN 568B	São Francisco/ AB	768162	9387973

DN 725A	Roçado Grande/UP	697400	9383900
DR 945	Areia Branca/Assu	726100	9390269
DR 950	Bela Vista do Piató/ Assu	722665	9389278
DR 967	Sítio Canto do Mari-Açu	717495	9387650
DR 969	Lagoa do Mato/Assu	717151	9386496
DR 973	Monte Alegre	718077	9386173
DR 973 A	Faz. Café Jardim/ Assu	720276	9385853
DT 104	Sítio Olho d'água	731396	9386584
DT 415	Comunidade Bavieira/Assu	731396	9386584
DT 418		727210	9387030
	Comunidade de Lagoa do		
DT 435	Ferreiro/Assu	731328	9384577
DT 453		689354	9380534
DT 454		693387	9380876
PS 0083	Lagoa do Piató/Assu	727210	9387030
OS			
0083A	Ana Maria/ Assu	727210	9387030
PS 0401	Campo de Aviação	725877	9381463
PS 0124	Nova Descoberta (Raposo II) AB	754682	9393745
S 3468	Cerâmica Portal do Vale do Açú	732000	9378500
UP 002		699481	9372436
UP 004		701200	9381600
UP 007		697656	9378188
UP 007A	Faz. Várzea Alegre/UP	697600	9378100

### 1.3 - Balanço de massas

A precisão dos resultados das análises químicas foi avaliada mediante o cálculo do erro da análise baseado no balanço de massas. O balanço de massas transcreve que a concentração total dos íons positivos (cátions) deve ser aproximadamente igual a concentração total dos íons negativos (ânions). Na prática existe uma diferença nessas concentrações que é devido aos erros acumulados de cada uma das determinações individuais ou pode ser devido a contribuições iônicas menores ou é um erro grave de análise. O erro da análise (e%) pode ser obtido pela aplicação da equação:

(5.1)

$$e\% = \left| \frac{r \sum p - r \sum n}{r \sum p + r \sum n} \right| \times 100$$

Onde:  $r \sum p$  é o Valor absoluto do somatório dos cátions (meq/l) e  $r \sum n$  é o Valor absoluto do somatório dos ânions (meq/l).

O erro admissível depende da concentração dos íons e do tipo de água, haja vista que uma água com baixa concentração de sais é muito mais difícil ser avaliada com precisão. A seguinte relação tem sido utilizada (modificado de Custódio & Lammas, 2001):

Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	50	200	500	2000	>2000
Erro amissível (%)	15	5	4	2	2

Tabela 2 - Resultado das análises químicas das amostras de água coletadas na região de Upanema-Afonso Bezerra, RN.

Amostra	pH*	PH	Ca	Mg	Cl	SO4	NO3	NO2	NO	CO3	HCO3	SO4	Cl	CaCO3	Ca	Mg	Cl	SO4	CaCO3
S 3468	6,8	250,5	6490,0	3450,0	0,4	0,3	0,0	121,3	693,6	313,6	327,5	9,6	0,1	0,0	214,7	339,2	2244,2	300,0	
DN 159	7,4	239,1	1643,0	809,0	0,1	0,1	0,0	6,6	81,6	67,5	22,3	38,5	0,1	0,0	202,5	67,1	529,8	480,0	
CL 898	7,8	193,1	2240,0	1104,0	0,2	0,1	0,1	13,2	24,3	33,7	457,1	38,5	0,1	0,0	639,3	197,4	399,9	199,5	
CL 571	5,7	158,5	2420,0	1236,0	0,2	0,3	0,0	19,7	32,6	81,9	250,0	113,6	0,2	0,0	4,9	21,1	719,8	420,0	
CL 902A	6,3	268,9	654,0	314,0	0,2	0,0	0,0	2,7	14,7	17,4	74,3	25,0	0,1	0,0	117,1	24,4	126,0	108,0	
Amostra	pH*	PH	Ca	Mg	Cl	SO4	NO3	NO2	NO	CO3	HCO3	SO4	Cl	CaCO3	Ca	Mg	Cl	SO4	CaCO3
UP 007A	6,8	231,9	256,0	46,0	0,1	0,2	0,0	28,8	34,7	21,2	140,0	6,0	0,4	0,0	341,6	30,1	121,1	173,1	CaCO3
DN 286	5,5	195,7	4700,0	2503,0	0,2	0,7	0,0	19,7	130,6	221,7	241,4	86,5	0,4	0,0	7,3	6,3	1325,7	1240,0	Aquifero Jandaíra/Açu
DN 288	6,8	244,7	5040,0	267,0	0,2	0,4	0,0	0,9	67,3	30,7	180,0	40,2	0,0	0,0	100,9	22,0	424,9	300,0	
DN 587B	6,8	207,9	3200,0	1040,0	0,2	0,4	0,0	13,8	106,1	43,8	245,4	38,0	0,2	0,0	120,3	20,6	990,6	840,0	
DNI41A	5,8	238,3	479,0	414,0	0,0	0,1	0,0	17,2	13,4	8,2	41,9	30,7	0,3	0,0	17,1	17,5	114,0	62,0	Aquifero Açu
DR 589	6,9	268,9	3320,0	1800,0	0,2	0,3	0,0	104,9	157,0	125,2	240,9	126,1	0,9	0,0	205,2	175,2	110,98	680,7	
DR 584	6,6	292,6	255,0	124,0	0,1	0,2	0,0	3,9	13,1	8,7	17,9	9,6	0,2	0,0	46,4	9,6	49,6	68,0	
DR 586	6,6	294,3	208,0	140,0	0,0	0,0	0,0	5,1	18,8	60,6	20,0	12,6	0,2	0,0	40,4	0,0	60,0	70,0	
DN 045B	6,6	202,6	280,0	170,0	0,2	0,2	0,0	90,2	2,7	2,8	28,3	14,0	0,2	0,0	46,4	0,2	22,0	40,0	
DN 263A	6,8	268,6	2880,0	647,0	0,2	0,0	0,0	4,3	62,4	82,4	280,0	22,0	0,4	0,0	129,3	28,0	800,8	620,0	
DN 0088	6,4	200,4	1140,0	707,0	0,2	0,2	0,0	0,0	40,8	86,8	125,0	40,0	0,2	0,0	68,8	14,4	680,8	400,0	
DN 293	6,2	205,6	2160,0	1070,0	0,1	0,0	0,0	1,9	118,3	83,9	680,2	12,0	0,4	0,0	126,9	67,5	600,0	600,0	
DN 0127	6,0	194,2	852,0	410,0	0,0	0,2	0,0	59,8	60,4	80,7	28,3	18,0	0,4	0,0	39,0	20,3	800,0	260,0	
DN 585	6,6	208,2	3080,0	146,0	0,2	0,2	0,0	0,0	23,7	606,0	200,5	01,3	0,4	0,0	63,0	12,0	520,8	820,0	
DN 504	6,1	283,4	200,0	180,0	0,0	0,0	0,0	5,68	10,2	32,9	28,0	10,8	0,4	0,0	140,9	126,4	88,0	600,0	
DN 004	6,9	288,5	362,0	193,0	0,1	0,0	0,0	0,0	30,7	84,5	28,8	06,5	0,2	0,0	153,7	10,7	28,0	180,0	
DN 282	6,6	225,3	3040,0	400,0	0,0	0,2	0,0	40,4	148,2	44,4	09,4	20,0	0,2	0,0	220,4	28,0	820,0	1400,0	
DR 968A	5,3	239,4	880,0	438,0	0,2	0,2	0,0	2,2	23,7	10,8	68,6	48,1	0,2	0,0	90,6	8,7	22,7	180,0	
DR 960	6,3	288,0	288,0	382,0	0,2	0,2	0,0	13,9	68,5	20,0	87,6	37,3	0,0	0,0	40,0	28,0	167,0	280,0	
DR 969	6,9	203,2	1240,0	983,0	0,2	0,1	0,0	32,9	471,4	43,4	280,6	38,8	0,2	0,0	40,4	3,48	620,8	600,0	
DR 632	3,0	260,9	4500,0	228,0	0,2	0,2	0,0	0,0	8,2	0,2	380,2	32,4	0,2	0,0	8,4	25,2	448,0	380,0	
DR 970	6,5	294,9	234,0	114,0	0,1	0,0	0,0	6,4	5,4	18,3	28,0	01,0	0,2	0,0	13,7	3,2	60,0	360,0	
DN 080A	6,7	240,2	1080,0	707,0	0,2	0,0	0,0	0,0	6,4	4,4	10,2	7,7	0,0	0,0	80,0	4,3	300,9	280,0	
CL 580	6,2	280,0	202,0	242,0	0,2	0,0	0,0	13,4	48,4	16,4	26,3	10,0	0,0	0,0	40,1	14,0	82,9	180,0	
DN 062C	5,4	280,4	3200,0	120,0	0,2	0,0	0,0	1,4	8,3	7,5	280,7	28,0	0,1	0,0	20,3	40,6	60,0	260,0	

DT 104	5,4	311,8	600,0	286,0	0,3	0,0	0,0	11,9	9,8	14,5	80,0	25,5	0,1	0,0	24,4	4,9	167,9	84,0
PS 0401	5,4	305,7	593,0	281,0	0,0	0,0	0,0	17,5	11,4	4,8	68,3	37,5	0,1	0,0	12,2	0,1	170,2	48,0
DN 453	7,3	276,1	751,0	364,0	0,3	0,1	0,0	0,0	52,2	19,3	78,1	19,1	0,4	0,0	219,6	51,9	114,0	208,0
DT 435	6,7	279,8	932,0	450,0	0,3	0,0	0,1	25,1	26,1	19,3	100,0	28,0	0,1	0,0	95,2	19,0	176,0	144,0
DR 950	7,0	113,0	895,0	432,0	0,1	0,1	0,0	18,3	73,4	45,3	32,0	14,9	0,1	0,0	239,1	53,0	155,9	368,0
DN 164	7,3	238,9	384,0	211,0	0,1	1,2	0,0	0,6	7,3	7,2	45,7	21,7	0,4	0,0	61,0	2,4	91,0	48,0
AB 001	6,7	259,4	1270,0	628,0	0,0	0,2	0,0	18,0	61,2	36,2	144,8	4,6	0,3	0,0	161,0	51,9	312,7	300,0
DR 967	6,1	113,0	1092,0	521,0	0,0	0,0	0,0	0,3	146,9	24,1	82,8	15,4	0,1	0,0	61,0	24,9	349,9	460,0
DN 725A	6,7	226,8	2180,0	1080,0	0,3	0,5	0,0	27,8	244,8	101,2	124,1	8,0	0,5	0,0	175,7	326,6	0,1	1020,0
DN 296	4,3	379,8	4670,0	2430,0	0,0	0,4	0,0	208,0	65,3	188,0	552,4	140,9	0,0	0,0	4,9	17,5	1499,5	92,0
CL 273B	6,6	212,1	5470,0	2872,0	0,4	0,3	0,0	7,1	204,0	207,3	628,6	44,0	0,4	0,0	666,1	47,7	1550,8	1280,0
CL 591A	6,7	233,6	315,0	160,0	0,1	0,7	0,0	30,6	11,4	9,2	43,8	4,2	0,1	0,0	117,1	11,3	38,0	66,0
DT 452	5,8	301,6	430,0	209,0	0,3	0,2	0,0	10,5	17,1	7,7	38,7	20,6	0,3	0,0	22,0	37,3	99,0	74,0
<b>Aquífero cristalino</b>																		
UP 002	8,0	223,1	3820,0	1960,0	0,1	0,7	0,0	2,0	89,8	120,5	327,5	39,6	0,1	0,0	400,2	51,8	1109,7	720,0
????																		
<b>Água superficial</b>																		
B A.R G	6,2	180,2	245,0	128,0	0,0	0,4	0,0	0,0	13,1	8,2	22,5	7,3	0,1	0,0	92,7	4,9	32,0	66,0
L. P.G	8,1	204,9	1000,0	523,0	0,2	0,1	0,0	0,4	39,2	28,0	129,3	20,0	0,9	0,0	263,5	32,8	196,5	212,0
L. Piató	8,7	192,1	1165,0	582,0	0,1	0,1	0,8	0,2	32,6	57,8	158,6	36,9	0,1	21,6	151,3	17,0	7,6	320,0
R. Px	8,2	165,6	289,0	155,0	0,1	0,3	0,0	6,1	15,5	5,3	24,0	7,2	0,5	7,2	85,4	7,0	33,0	3,0
R. C.	7,5	231,0	213,0	101,0	0,0	0,5	0,0	0,0	10,6	8,7	18,8	7,3	0,1	0,0	85,4	2,8	37,0	62,0
R.C.	7,7	264,7	243,0	123,0	0,2	0,0	0,0	0,2	15,5	7,7	25,0	7,7	0,1	0,0	70,8	5,7	41,0	70,0
<b>Água de chuva</b>																		
AFB	5,4	-	15,8	7,0	-	ND	0,0	0,2	0,8	0,3	1,2	0,8	0,06	0,0	3,1	0,6	1,5	3,2
AS	5,0	-	10,0	5,0	-	0,30	0,0	0,53	0,49	0,96	1,10	0,0	0,0	0,0	3,05	0,31	3,99	5,20
UP	5,09	-	4,30	2,00	-	0,17	0,0	0,51	0,24	0,51	0,40	0,0	0,0	0,0	2,44	0,31	2,49	2,60

Obs: B.A.R.G: Barragem Armando R. Gonçalves; L.P.G.: Lagoa Ponta Grande; L. Piató: Lagoa de Piató; R. Px.: Rio Pataxós; R. c.: Rio do Carmo

\*Admensional

Tabela 3 -Técnicas analíticas utilizadas

Parâmetros	Unidade	Metodologia Utilizada
Condutividade elétrica	$\mu\text{S/cm}$	Potenciometria
Cor	mg/L Pt-Co/L	Espectrofotometria
Gosto	mg/L	---
Odor	mg/L	---
pH	ND	Potenciometria
Turbidez	NTU	Espectrofotometria
Sólidos Totais a 105°C	mg/L	Gravimetria
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	Gravimetria
Sólidos em Suspensão	mg/L	Gravimetria
Alcalinidade total	mg/L $\text{CaCO}_3$	Titulometria
Alcalinidade a hidróxidos	mg/L $\text{CaCO}_3$	Titulometria
Alcalinidade a carbonatos	mg/L $\text{CaCO}_3$	Titulometria
Alcalinidade a bicarbonatos	mg/L $\text{CaCO}_3$	Titulometria
Dureza total	mg/L $\text{CaCO}_3$	Titulometria
Nitrogênio Amoniacal	mg/L $\text{NH}_3$	Espectrofotometria
Nitrato	mg/L N	Espectrofotometria
Nitrito	mg/L N	Espectrofotometria
Cálcio	mg/L $\text{Ca}^{++}$	Titulometria
Magnésio	mg/L $\text{Mg}^{++}$	Cálculos
Sódio	mg/L $\text{Na}^+$	Fotometria de chama
Potássio	mg/L $\text{K}^+$	Fotometria de chama
Ferro Dissolvido	mg/L Fe	AAS - chama
Carbonato	mg/L $\text{CO}_3^{2-}$	Titulometria
Bicarbonato	mg/L $\text{HCO}_3^-$	Titulometria
Sulfato	mg/L $\text{SO}_4^{2-}$	Turbidimetria
Cloreto	mg/L $\text{Cl}^-$	Titulometria

Outros autores admitem que uma análise é considerada correta para um coeficiente de erro (e%) inferior a 5% (Mather, 1997; Pyne, 1995).

Nas determinações efetuadas no âmbito deste trabalho verificou-se que as maiorias das análises (95%) apresentaram erro aproximadamente igual ou inferior a 5%, as demais análises foram descartadas, ou seja, não foram incluídas nas avaliações hidrogeoquímicas (Tabela 4).

#### **1.4 - Avaliação estatística dos resultados das análises químicas das águas do aquífero Açú**

A Tabela 4 apresenta os parâmetros estatísticos dos principais cátions e ânions, além do pH, condutividade elétrica (C), sólidos totais dissolvidos (STD), nitrato, ferro e dureza total obtidos das análises químicas das amostras de água dos poços tubulares situados na Formação Açú.

Num universo de 63 amostras o pH variou entre 4,3 e 8,6, com valor médio de 5,7. Esse resultado sugerem que as águas do aquífero Açú, em caráter geral, tendem para águas ácidas, ocorrendo casos de águas básicas, as quais correspondem as águas sob influência das rochas carbonáticas.

A condutividade elétrica (C) variou de 198,6  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 6490,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , com média de 1181,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . O “sólidos totais dissolvidos” variou de 101,0 mg/L a 3450,0 mg/L, com média de 597,9 mg/L. O cloreto variou de 14,8 mg/L a 2244,2 mg/L, com média de 302,2 mg/L. Esses resultados permitem classificar as águas do aquífero Açú na área de estudo de salinidade de baixa a alta.

Tabela 4 - Balanço iônico e avaliação da precisão dos resultados das análises químicas de água

Ponto	rHC03	rS04	rCl	rN03	□anions	rNa	rK	rCa	rMg	□cations	Erro (%)
DN080	1,44	0,28	10,43	0,28	12,43	5,1	0,2	3,67	3,57	12,53	0,4
DN095	0,29	0,01	1,8	0,16	2,26	0,82	0,54	0,2	0,4	1,95	7,29
DN104	0,24	0,11	2,35	0,22	2,92	1,22	0,46	0,69	0,6	2,96	0,7
DN113	4,28	1	11,28	0,12	16,68	4,5	0,39	4,76	6,94	16,59	0,26
DN137	0,52	0,64	2,26	0,09	3,51	1,03	0,44	1,02	0,71	3,21	4,48
DN149	0,16	0,15	2,88	0,13	3,32	1,25	0,72	0,45	0,6	3,01	4,9
DR941	4,84	7,81	12,69	0,36	25,7	4,8	0,3	13,84	5,95	24,88	1,62
DR945	2,64	0,9	4,68	0,22	8,44	2,07	0,44	3,42	2,22	8,15	1,72
DR950	3,92	1,1	4,4	0,3	9,72	1,39	0,38	3,67	3,73	9,16	2,92
DR967	1	0,52	9,87	0	11,39	3,6	0,39	7,33	1,98	13,3	7,75
DR969	0,77	0,58	19,17	0,05	20,57	6,9	0,79	8,55	3,57	19,81	1,89
DR973	0,32	0,08	1,8	0,11	2,31	0,76	0,54	0,29	0,44	2,02	6,72
DT435	1,56	0,4	4,96	0,4	7,32	4,35	0,72	1,3	1,59	7,96	4,16
DN141	0,52	0,22	2,11	0	2,85	1,25	0,52	0,45	0,71	2,94	1,43
PS0083	0,16	0,22	19,45	0	19,83	9,79	0,23	2,04	7,14	19,18	1,65
PS0401	0,2	0	4,8	0,28	5,28	2,97	0,96	0,57	0,4	4,9	3,82
S34369	3,52	7,06	63,29	1,96	75,83	14,25	0,25	34,61	25,79	74,89	0,62
DN141A	0,28	0,36	3,21	0,28	4,13	1,82	0,78	0,57	0,67	3,85	3,5
DR973A	0,16	0,18	0,63	0,05	1,02	2,98	1,23	1,06	2,62	7,89	77,16
PS0083A	0,12	0	3,75	0,08	3,95	1,91	0,96	0,53	0,87	4,27	3,81
DN141B	0,76	0,13	1,68	0,16	2,73	1,28	0,37	0,41	0,48	2,53	3,81
DT104	0,4	0,1	4,74	0,19	5,43	3,48	0,65	0,49	1,19	5,81	3,37
CL568	0,52	0,23	31,64	1,69	34,08	10,44	3,23	7,74	12,68	34,08	0
CT631	0,6	0,37	2,96	0,03	3,96	2,97	0,6	0,16	0,44	4,17	2,62
CT634	0,16	0,32	3,33	0,23	4,04	1,68	0,88	0,41	0,75	3,72	4,14
DN278	0,8	0,72	8,91	0,01	10,44	6,6	1,23	1,26	1,86	10,95	2,39
DN279	0,12	0,1	21,01	0	21,23	7,2	2,36	3,67	8,72	21,95	1,66
DN283	1,64	0,62	11,9	0,13	14,29	6,53	1,18	3,05	2,97	13,73	1,99

DN292	2,08	1,41	17,5	0,03	21,02	8,1	0,31	5,9	6,74	21,05	0,07
DN296	0,08	0,36	42,29	3,35	46,08	24,03	3,6	3,26	15,46	46,35	0,29
AB001	2,64	1,08	8,82	0,29	12,83	6,3	0,12	3,05	2,97	12,44	1,52
CL568B	0,28	0,37	27,94	0,22	28,81	10,5	0,98	5,29	11,5	28,27	0,94
CL580	0,76	0,3	4,31	0,22	5,59	1,14	0,38	2,41	1,35	5,29	2,76
CL590	1,92	0,28	2,3	0,11	4,61	2,32	0,28	1,3	0,99	4,89	3,01
PS0124	0,64	0,53	5,53	0,32	7,02	2,1	0,46	3,01	1,7	7,28	1,8
S6922	3,88	0,52	25,12	0,26	29,78	0,84	0,61	15,88	12,29	29,62	0,26
DN267A	2,12	1,44	23,97	0,07	27,6	12,18	0,82	6,11	7,33	26,44	2,15
CL571	0,08	0,44	20,3	0,32	21,14	10,87	2,91	1,63	6,74	22,15	2,33
CL273B	10,92	0,99	43,74	0,11	55,76	27,34	1,13	10,18	17,04	55,69	0,06
DN286	0,12	0,13	37,38	0,32	37,95	10,5	2,21	6,52	18,23	37,46	0,65
CL583	0,68	0,27	1,65	0,16	2,76	1,57	0,4	0,33	0,36	2,64	2,24
CL584	0,76	0,2	1,4	0,06	2,42	0,78	0,25	0,65	0,71	2,39	0,69
CL585	1	0,25	1,57	0,1	2,92	0,87	0,29	1,18	0,52	2,86	1,04
CL586	0,76	0,21	1,71	0,08	2,76	0,87	0,32	0,94	0,52	2,64	2,07
CL587	2,12	0,43	4,25	0,22	7,02	1,5	0,36	1,22	3,41	6,49	3,92
CL589	2,51	0,52	3,02	0,41	6,46	1,22	0,24	3,67	1,51	6,63	1,31
CL591	4,08	2,63	1,64	0,09	8,44	1,82	0,28	1,47	4,56	8,13	1,86
CL898	10,48	4,11	11,28	0,21	26,08	19,88	0,99	1,21	2,78	24,86	2,4
CL902A	1,92	0,51	3,55	0,04	6,02	3,23	0,64	0,73	1,43	6,03	0,06
CL902C	2,12	0,97	18,9	0,25	22,24	11,6	1,67	3,26	6,04	22,57	0,74
DT415	1,4	0,52	12,6	0	14,52	8,1	0,39	2,85	3,96	15,31	2,64
CL591A	1,92	0,23	1,07	0,49	3,71	1,91	0,11	0,57	0,75	3,34	5,29
CL895A	1,64	0,09	0,62	0	2,35	1,28	0,2	0,33	0,63	2,43	1,71
CL588	3,32	0,48	2,13	0,16	6,09	0,81	0,23	4,89	1,98	7,91	6,5
DN139	1	0,11	1,43	0,09	2,63	1,28	0,42	0,81	0,28	2,79	2,95
DN159	3,32	1,4	14,94	0,11	19,77	0,97	0,98	4,07	5,55	11,58	26,13
DN160	0,8	0,59	4,54	0,38	6,31	2,73	0,88	0,77	1,66	6,05	2,09
DN161	0,4	0,11	1,47	0,22	2,2	1,22	0,47	0,2	0,28	2,16	0,89
DN164	1	0,05	2,57	0,01	3,63	1,99	0,55	0,37	0,6	3,5	1,78

DN166	3,23	0,17	1,2	0,07	4,67	2,32	0,49	1,18	0,83	4,82	1,58
DN453	3,59	1,08	3,21	0	7,88	3,4	0,49	2,61	1,59	8,08	1,21
DN454	3,76	1,62	4,17	0,08	9,64	3,98	0,51	0,73	3,73	8,95	3,71
DN726	6,8	2,15	6,34	0,23	15,52	3,13	0,12	8,75	3,17	15,18	1,12
UP002	6,56	1,08	31,29	0,03	38,96	14,25	1,01	4,48	9,91	29,65	13,58
UP007	3,08	1,02	22,27	0,16	26,53	10,24	0,39	7,74	8,33	26,71	0,33
UP007A	5,6	0,63	3,42	0,46	10,11	6,09	0,15	1,73	1,74	9,72	1,97
UP001	1,2	0,28	0,9	0,04	2,42	0,81	0,35	0,69	0,48	2,32	2,11
UP004	2,52	0,22	0,79	0,12	3,65	0,57	0,25	1,83	1,19	3,84	2,48
BAR RG	1,52	0,1	0,9	0	2,52	0,98	0,19	0,65	0,67	2,49	0,58
L.PGR	4,32	0,68	5,54	0,01	10,55	5,63	0,51	1,95	2,3	10,39	0,76
L.Piató	2,48	0,35	0,21	0	3,04	6,9	0,94	1,63	4,76	14,23	64,79
R. PAT.	1,4	0,15	0,93	0,1	2,58	1,04	0,18	0,77	0,44	2,44	2,85
R.Açu	1,16	0,12	1,16	0	2,44	1,09	0,2	0,77	0,63	2,69	4,97
R.Carmo	1,4	0,06	1,04	0	2,5	0,82	0,19	0,53	0,71	2,25	5,37

Obs.: r indica valores em meq/L.

Tabela 5 - Parâmetros estatísticos dos resultados das análises químicas das águas do aquífero Açú

	Min	Max	Média	Dv padrão	Desv	Coef Var%
<b>Na (mg/L)</b>	13,1	552,38	99,377	103,492	104,14	98,0
<b>Ca (mg/L)</b>	0,0	693,6	60,649	96,914	159,8	100,0
<b>Mg (mg/L)</b>	3,37	313,6	42,203	55,674	131,92	99,0
<b>Cl (mg/L)</b>	14,8	2244,2	302,24	398,19	131,75	100,0
<b>SO4 (mg/L)</b>	0,0	375,24	38,227	70,093	183,36	100,0
<b>pH*</b>	4,34	8,66	5,762	5,265	91,383	50,0
<b>K (mg/L)</b>	4,23	140,91	26,281	26,595	101,19	97,0
<b>Cond (µS/cm)</b>	198,6	6490,0	1181,9	1221,565	103,35	97,0
<b>TDS (mg/L)</b>	101,0	3450,0	597,92	639,281	106,92	97,0
<b>HCO3 (mg/L)</b>	4,88	639,28	102,06	104,357	102,25	99,0
<b>NO3 (mg/L)</b>	0,0	208,0	15,311	29,439	192,27	100,0
<b>Fe (mg/L)</b>	0,0	7,1	0,383	0,855	223,05	100,0

Os teores de cálcio variam de 0,0 mg/L a 693,6 mg/L, com média de 60,6 mg/L, enquanto que o íon magnésio varia de 3,3 mg/L a 313,6 mg/L, com média de 42,2 mg/L. O íon bicarbonato variou de 4,8 mg/L a 639,3, com média de 102,0 mg/L. Esses resultados já sugerem que em caráter geral as águas não são influenciadas prioritariamente pelas rochas carbonáticas.

O sódio variou de 13,1 mg/L a 552,3 mg/l, com média de 99,3 mg/L, enquanto que o potássio variou de 4,23 mg/L a 141,9 mg/L, com média de 26,28 mg/L. Com relação ao ânion sulfato, o mesmo apresentou 0,0 a 375,2 mg/L, com média de 38,2 mg/L. O íon nitrato variou de 0,0 a 208,0 mg/L, com média de 15,3 mg/L. Este resultado já sugere que as águas estão afetadas por nitrato em algumas situações. O Ferro variou de 0,0 a 7,1 mg/L, com média de 0,38 mg/L, mostrando que existe um bom número de poços com águas com teor de nitrato elevado.

## 1.5 - Origem e mecanismos da salinização das águas do aquífero Açú

Será avaliado nesta parte do trabalho o comportamento hidrogeoquímico das águas subterrâneas do aquífero Açú, procurando diagnosticar sobre a origem e mecanismos da salinização das águas. Nestas condições, os fatores geo-estruturais, climáticos e hidrogeológicos propriamente ditos (notadamente no que diz respeito à direção e regime do fluxo subterrâneo), serão considerados como fundamentais.

### 1.5.1 - Correlação entre parâmetros hidroquímicos

A Tabela 6 apresenta a matriz de coeficientes de correlação entre parâmetros hidroquímicos das águas subterrâneas do aquífero Açú que incluem condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, cátions principais e ânions principais.

A condutividade elétrica é, em geral, o parâmetro utilizado na análise da salinidade das águas, tanto pelas facilidades de medição como principalmente pela elevada correlação que o mesmo apresenta com os sólidos totais dissolvidos. Na área de estudo a correlação é perfeita

(Tabela 6 e Tabela 7), atingindo praticamente 100%. Entre os íons, ânion cloreto e magnésio são os que apresentam maior correlação com a CE (ou STD), alcançando 96,8%. Com relação ao cátion sódio a correlação é inferior, apesar de também elevada, da ordem de 84,2%. Este comportamento é característico de águas que foram afetadas por processos de evaporação. O Cálcio apresenta uma correlação de apenas 73% com a CE, que apesar considerada alta, é bem inferior a correlação apresentada pelo magnésio, provavelmente devido a maior susceptibilidade cálcio em precipitar. O Potássio, sulfato e bicarbonato apresentam uma correlação baixa a media com a CE. No caso do potássio, isto ocorre devido a afinidade que este elemento apresenta com as argilas. O bicarbonato e o sulfato são relativamente pouco afetados pela salinização das águas.

Tabela 6 - Correlação entre parâmetros hidroquímicos.

	Coeficiente de Correlação								
	Cond	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl
Cond	1,0	0,999	0,731	0,968	0,842	0,513	0,353	0,415	0,968
TDS		1,0	0,732	0,969	0,839	0,507	0,346	0,41	0,969
Ca			1,0	0,77	0,386	2,5 E-2	0,334	0,689	0,711
Mg				1,0	0,732	0,471	0,284	0,42	0,942
Na					1,0	0,552	0,446	0,278	0,8
K						1,0	-0,17	-0,12	0,525
HCO3							1,0	0,463	0,236
SO4								1,0	0,304
Cl									1,0

Valor de "r <sub>x,y</sub> "	Correlação
0	nula
0 -   0.3	fraca
0.3   -   0.6	média
0.6   -   0.9	forte
0.9   -   0.99	fortíssima
1	perfeita

### 1.5.2 - Modificações hidrogequímicas na direção do fluxo subterrâneo e ao longo do tempo

A condutividade elétrica (CE) das águas subterrâneas, de conformidade com observações efetuadas em Novembro de 2001 (Figura 2), diminui na direção de sul para norte, em linhas gerais, na mesma direção do fluxo subterrâneo. Nestas condições, no setor Oriental da área, os valores de CE variam de 3500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para pouco menos de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . No setor Ocidental (oeste do vale do Açu), a CE varia de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , na faixa sul da área para pouco menos de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , na parte central e norte deste setor.

A condutividade elétrica das águas subterrâneas em Dezembro de 2005 (Figura 3), final da estação seca, apesar de mostrar um comportamento similar ao observado em Novembro de 2001, com relação ao fluxo subterrâneo, mostrou-se com valores relativamente mais elevados, cujos valores mais baixos de CE no setor Oriental é da ordem de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , e, no setor Ocidental, os valores mais baixos dominantes estão entre 500 e 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

A configuração das curvas de isovalores de condutividade elétrica, correspondentes Março de 2007 (Figura 4), plena estação chuvosa, indica um comportamento similar quanto a diminuição dos valores de CE na direção geral de sul para norte. Os valores das curvas,

entretanto, mudam com relação aos seus valores absolutos, havendo uma nítida redução para valores da ordem de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  no setor Oriental da área e valores de 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  no setor Ocidental.

Os sólidos totais dissolvidos, conforme já discutido apresentam uma perfeita correlação com a CE, portando, como era de se esperar, apresenta um comportamento similar a CE.

Os íons principais dissolvidos nas águas subterrâneas, tais como cloreto, sódio, cálcio e magnésio apresentam um comportamento similar com relação ao observado para a CE e para os STD, ou seja, de um modo geral há uma tendência a uma redução na concentração desses elementos de sul para norte na mesma direção do fluxo das águas subterrâneas (figuras 2 a 10).

Nestas condições, fica esclarecido que a salinidade das águas diminui no sentido de Sul para Norte na mesma direção do fluxo subterrâneo, que corresponde aos setores de maior transmissividade do aquífero. No caso de descontinuidades hidráulicas, ou seja, redução das espessuras do aquífero no sentido do fluxo subterrâneo há uma tendência a crescimento da salinidade, tal como se verifica em torno da Lagoa de Piató.

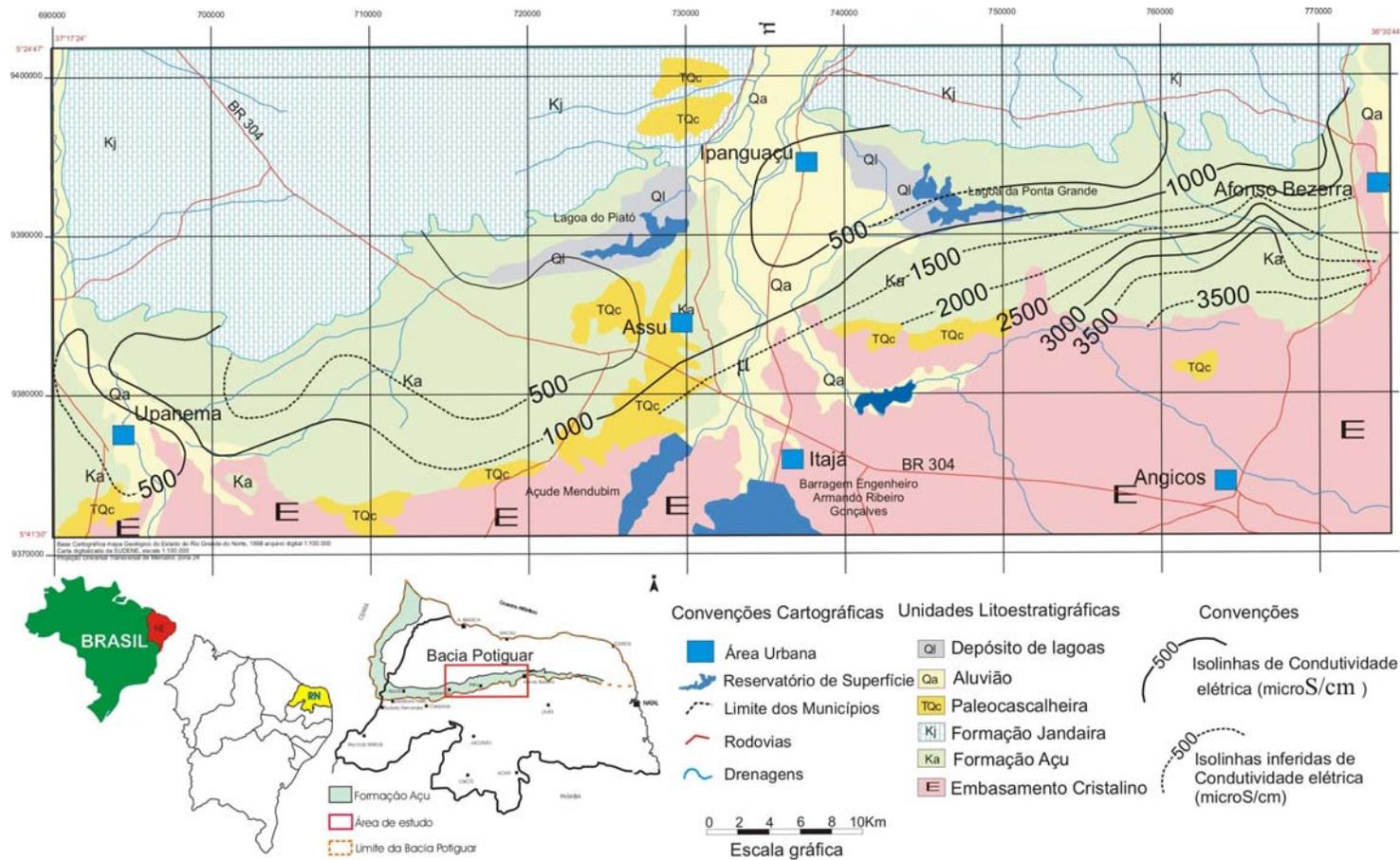


Figura 2 - Condutividade elétrica das águas subterrâneas (Novembro 2001)

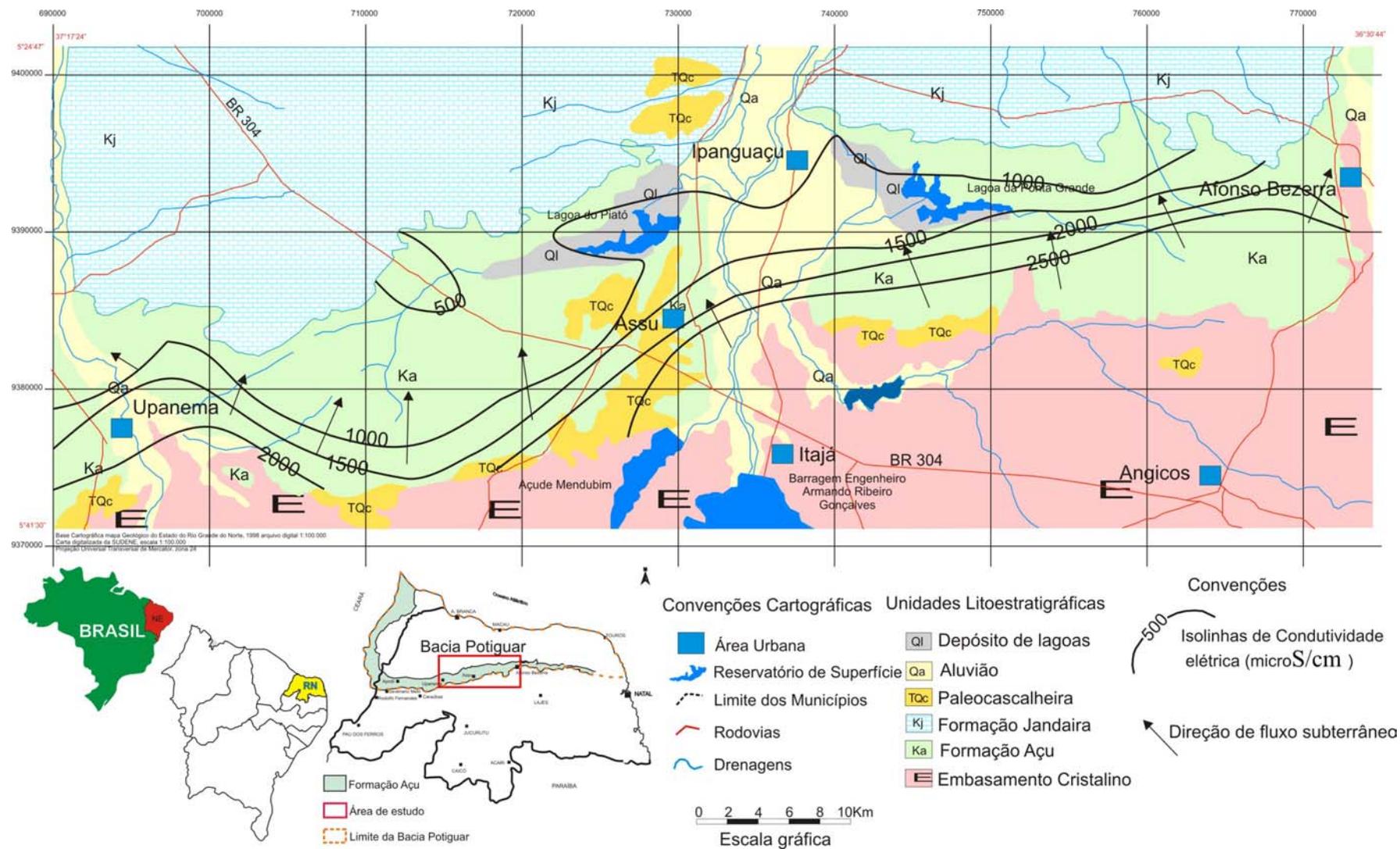


Figura 3 - Condutividade elétrica das águas subterrâneas (Dezembro 2005)

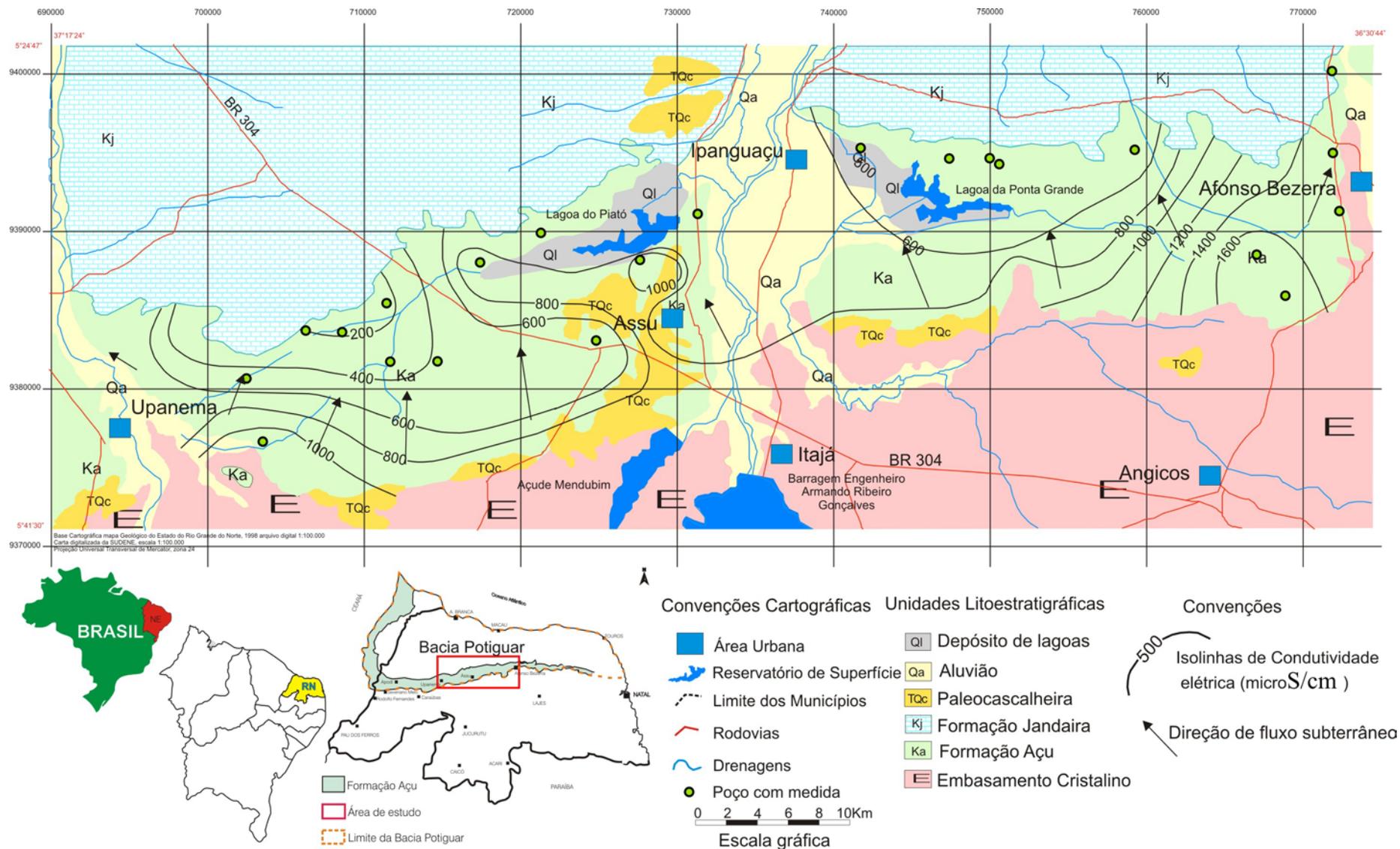


Figura 4 - Condutividade elétrica das águas subterrâneas (Março 2007)

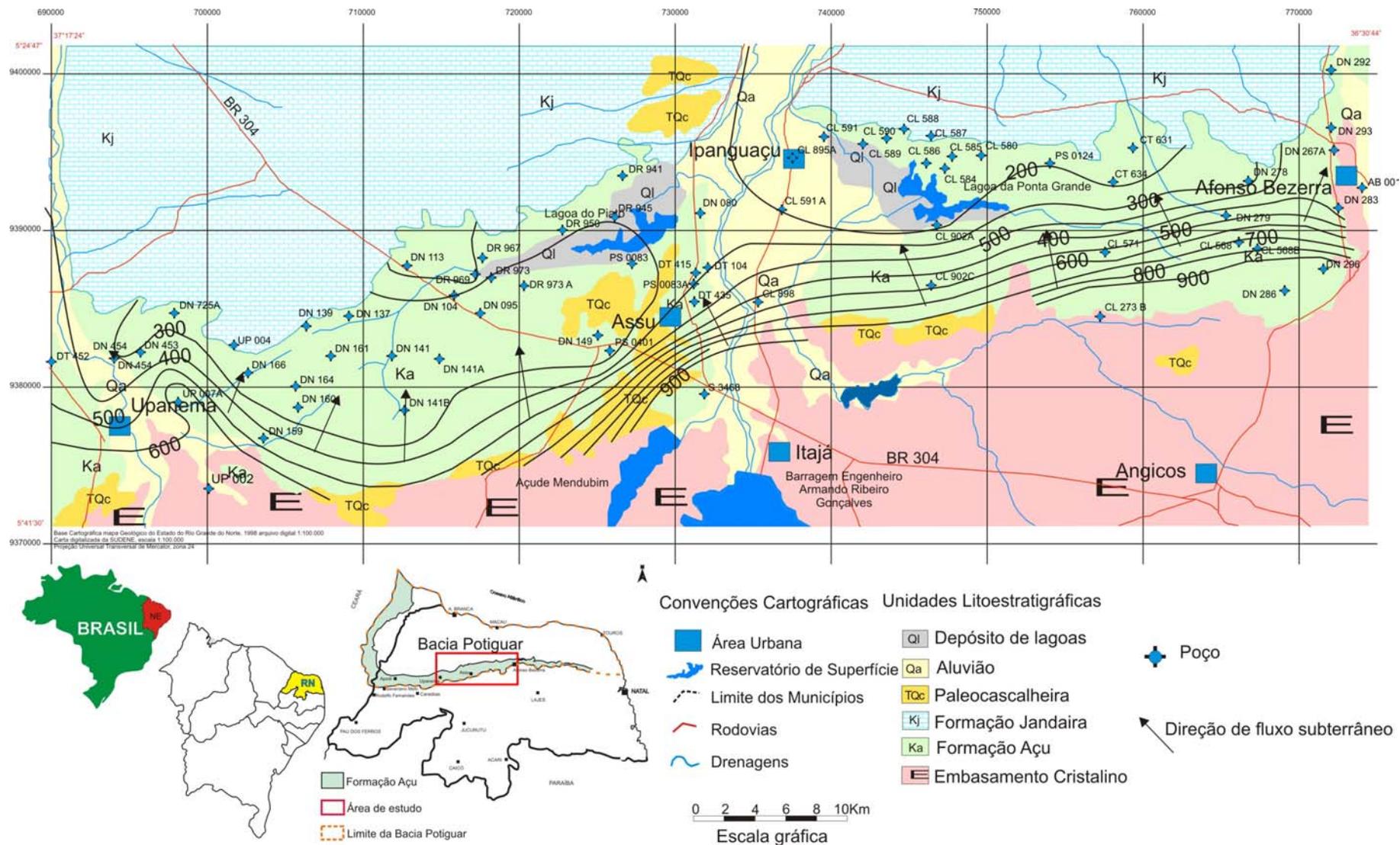


Figura 5 - Sólidos Totais dissolvidos nas águas subterrâneas (Dezembro 2005)



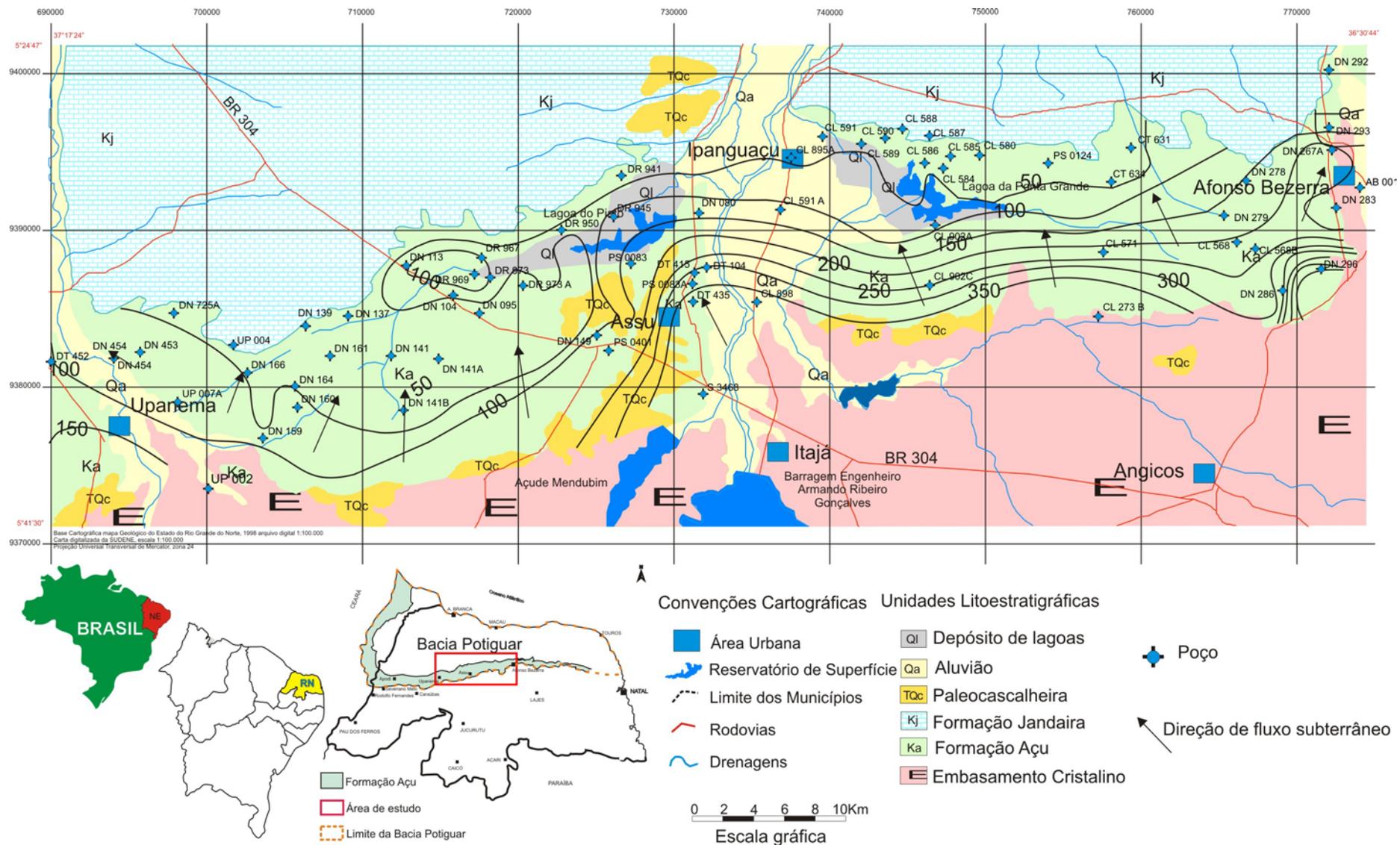


Figura 7 - Sódio nas águas subterrâneas (Dezembro 2005)

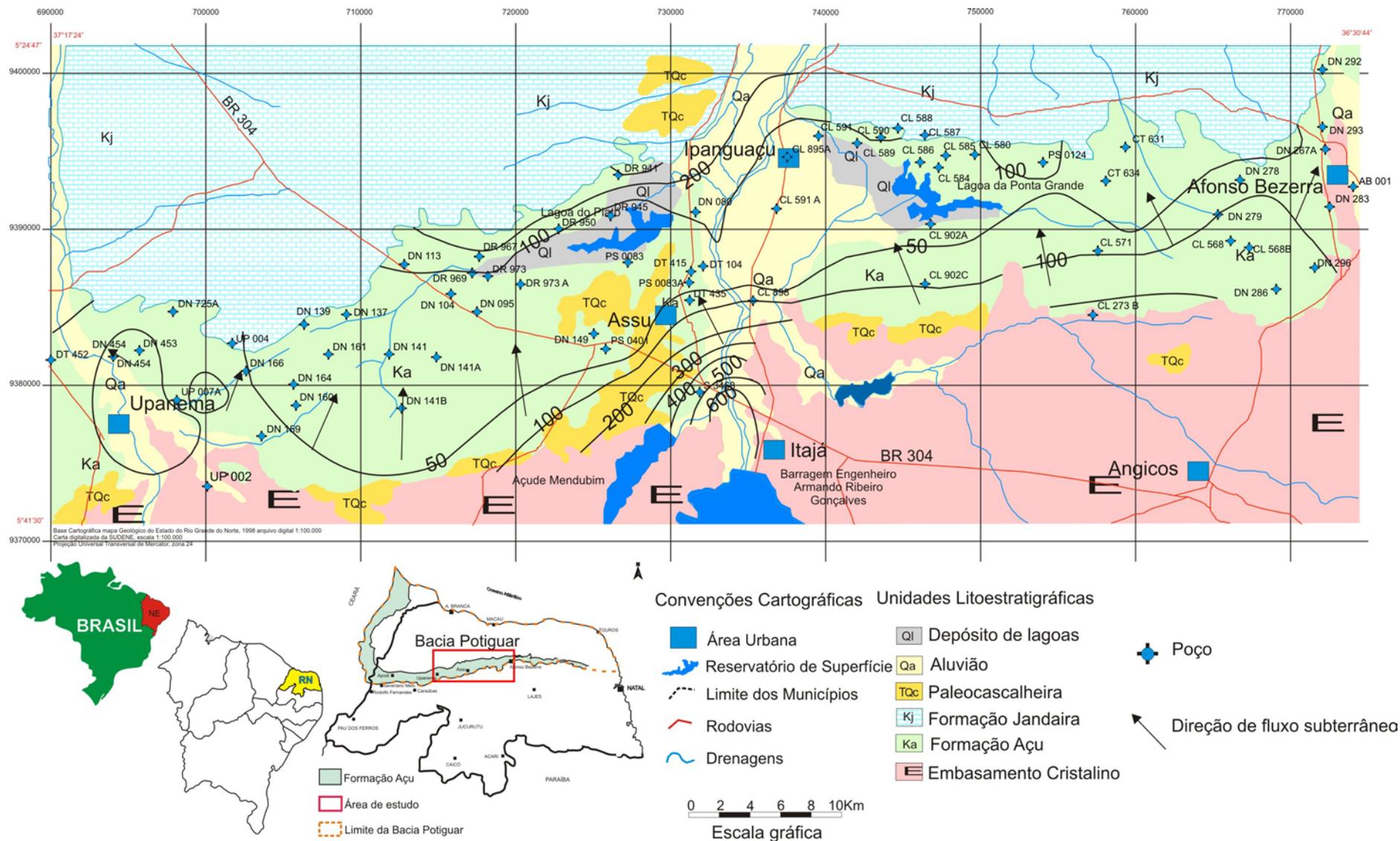
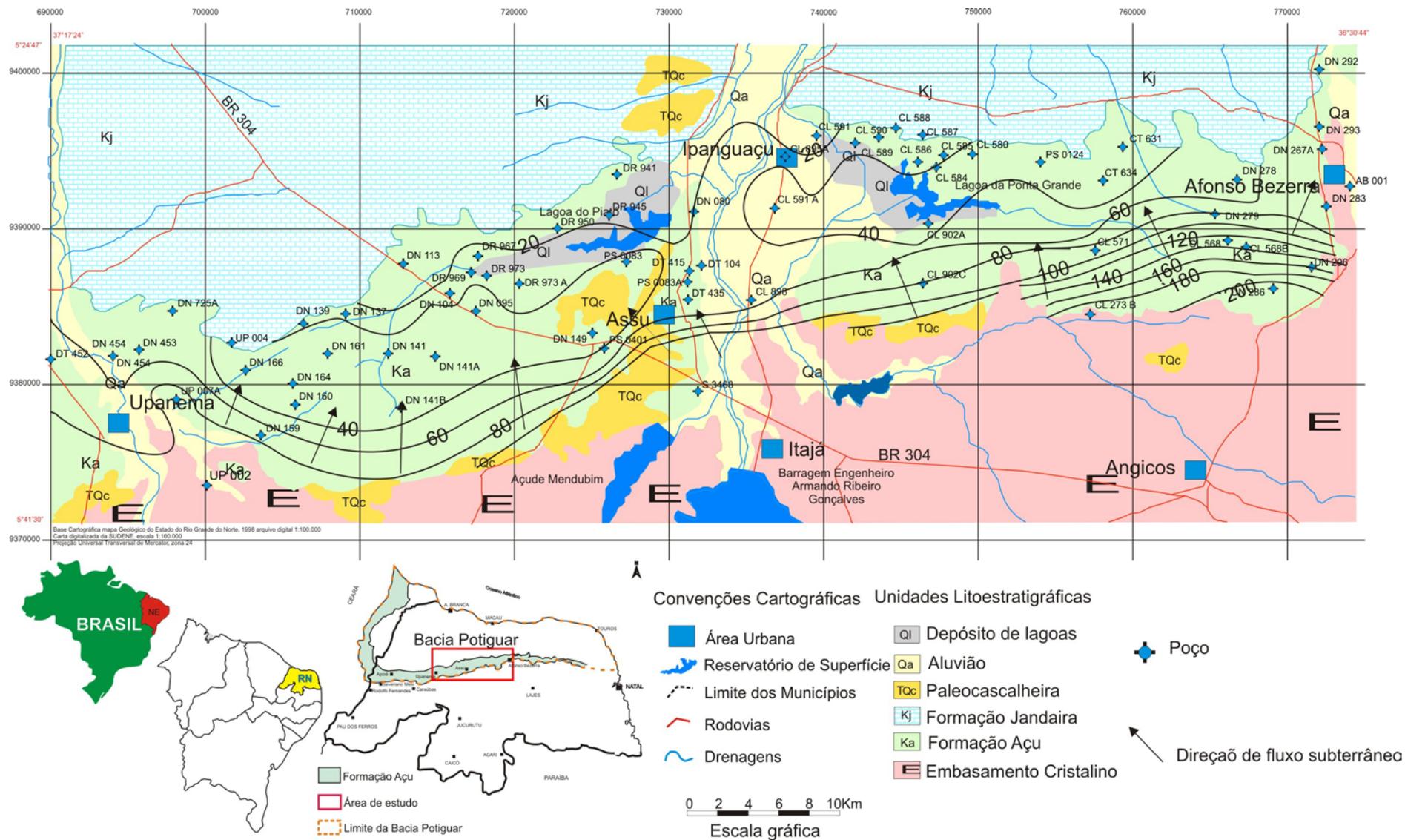


Figura 8 - Distribuição do Cálcio nas águas subterrâneas (Dezembro 2005)



**Figura 9 - Magnésio nas águas subterrâneas (Dezembro 2005)**

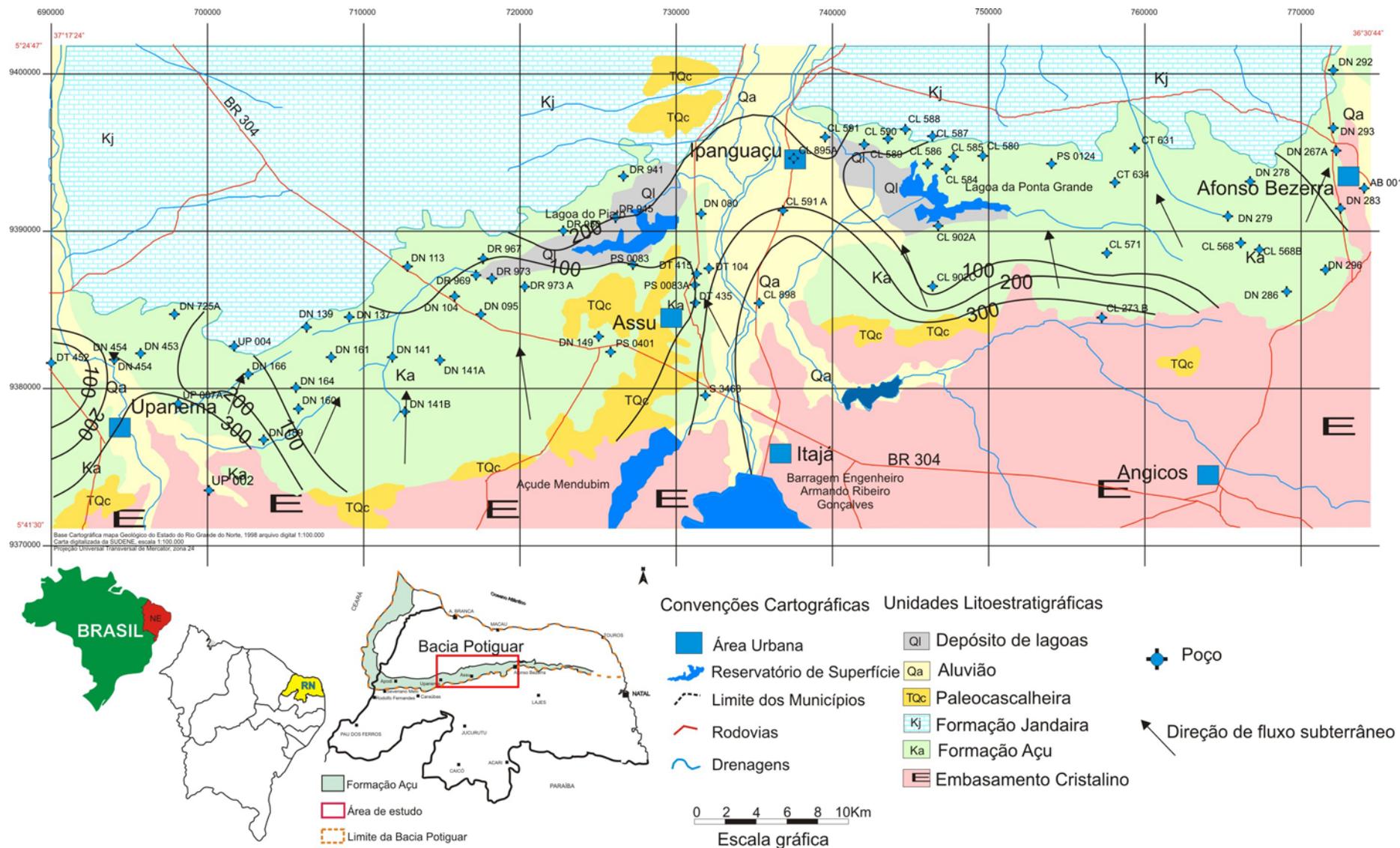


Figura 10 Bicarbonato nas águas subterrâneas (Dezembro 2005)

### 1.5.3 - Fácies hidroquímicas e processos geoquímicos atuantes

O termo “facies” é usado para descrever os corpos de água subterrânea, em um aquífero, que diferem em sua composição química. As “fácies” são uma função da litologia, dinâmica da solução, e padrão do fluxo do aquífero (Back 1960, 1966 e Edmunds, 1981).

Fácies hidroquímicas, podem ser classificadas com base nos íons dominantes e as mesmas podem ser definidas através do Diagrama de Piper (figuras 5.11 e 5.12).

Inicialmente foi feita uma representação neste diagrama de todos os resultados das análises químicas das amostras de água coletadas e analisadas (75 amostras) incluindo águas subterrâneas (dos aquíferos Jandaira, Açú e cristalino), águas superficiais e águas de chuva (Figura 5.11).

As águas de chuva são águas do tipo **Mg-Ca-Cl-HCO<sub>3</sub>**; as águas superficiais tendem a águas do tipo **Mg-Ca-HCO<sub>3</sub>-Cl**; as águas subterrâneas do aquífero cristalino são águas **Na-Mg-Cl**; as águas do aquífero Jandaira são águas **Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Cl**; enquanto que as águas do aquífero Açú apresentam vários tipos de água que varia na direção do fluxo subterrâneo.

Para efeito de análise das modificações hidrogeoquímicas no sentido do fluxo subterrâneo, os resultados das análises químicas das 63 amostras de águas subterrâneas coletadas dos poços no aquífero Açú, Jandaira e cristalino são apresentadas em separado no diagrama de Piper (figura 5.12). Três fácies hidroquímicas principais foram identificadas: águas do tipo **Na<sup>+</sup>-Cl**; águas do tipo **Ca<sup>2+</sup>-Cl** and/ou águas do tipo **Mg<sup>2+</sup>-Cl** e **Ca<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>**.

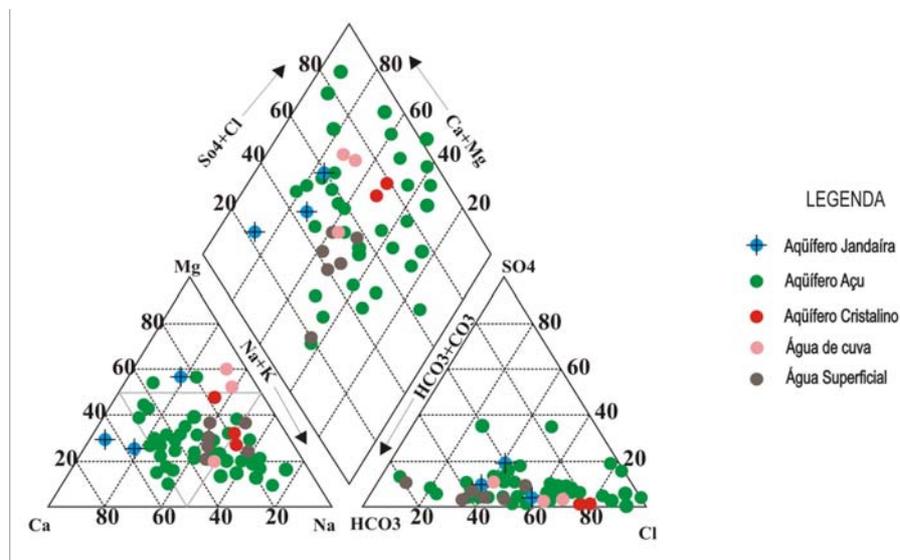
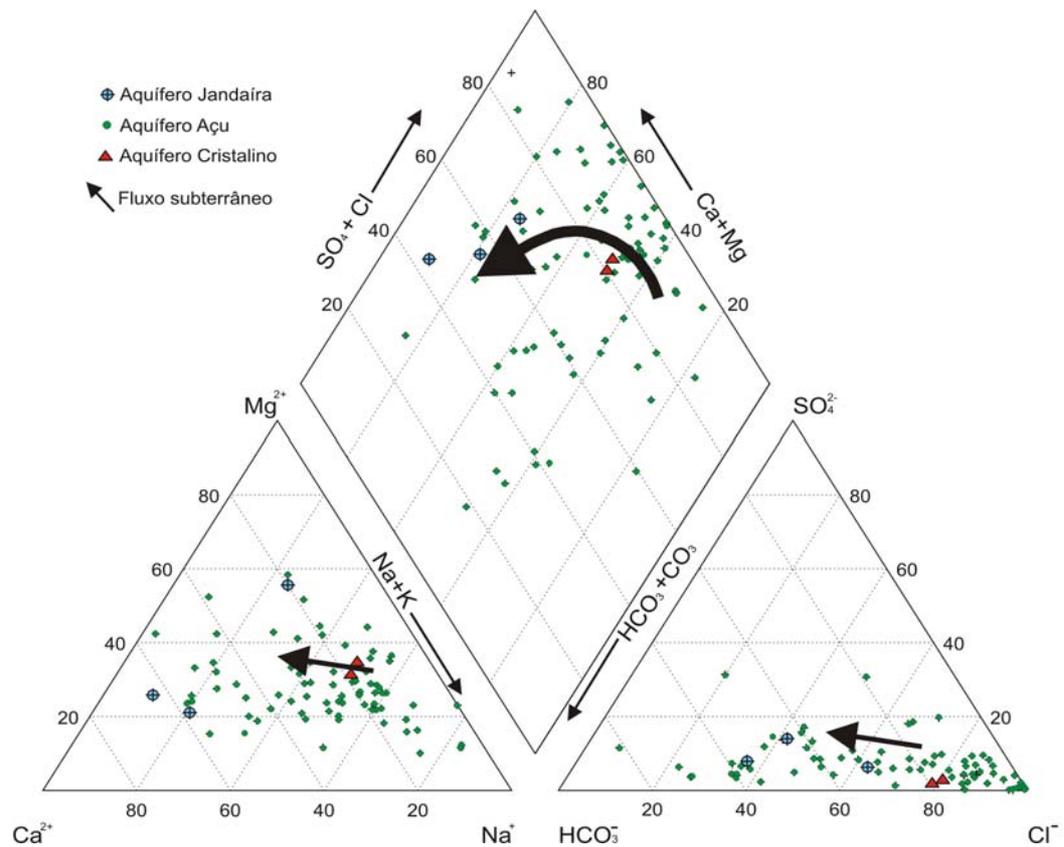


Figura 11 - Representação dos resultados das análises químicas das amostras de águas subterrâneas e superficiais em termos percentuais de cátions e ânions no Diagrama de Piper



**Figura 12 - Representação dos resultados das análises químicas das amostras de água subterrânea no Diagrama de Piper, mostrando as modificações hidrogeoquímicas na direção do fluxo subterrâneo.**

As águas do tipo  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$  mudam para águas do tipo  $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$ , à medida que a água subterrânea desloca-se de sul para norte na direção geral do fluxo subterrâneo e em seguida para águas  $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ , à medida que as águas subterrâneas se aproximam do Aquífero Jandaira (rochas carbonáticas).

Observando o triângulo dos cátions, pode ser verificado que na direção do fluxo subterrâneo, o cátion sódio tende a mudar sua posição em relação ao cátion  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$ . No triângulo dos ânions o íon  $\text{Cl}^-$  tende a ser substituído pelo ânion  $\text{HCO}_3^-$ .

A água do aquífero Jandaira é na maior parte dos casos do tipo  $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$  e em poucas ocasiões  $\text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ , cujos íons dominantes foram originados pela dissolução de rochas carbonáticas (calcários e dolomitos).

A água de poços no aquífero cristalino é do tipo  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ . A presença do cloreto no aquífero cristalino é uma característica comum em regiões semiáridas, cuja salinização é elevada e associada a efeitos de sais cíclicos.

A Tabela 7 apresenta individualmente os tipos de água obtidos para cada amostra analisada e também os principais minerais dissolvidos. Neste caso verifica-se um maior domínio de sais de cloreto de sódio (halita) e de rochas carbonáticas (dolomita mais excessivamente).

**Tabela 7 - Tipos de água segundo os íons dominantes e Minerais dissolvidos**

Poço	CE µS/cm	Tipoo de água	Minerais dissolvidos mmol/L			
			Halita	silvita	dolomita	anidrita
		Na-Ca-Mg-Cl-				
AB 001	1270	HCO	6,3	0,12	0,99	0,54
CL 273 B	5470	Na-Mg-Cl	27,34	1,13	4,59	0,48
CL 568	296	Mg-Na-Ca-Cl	10,44	3,24	3,75	0,12
CL 571	2420	Na-Mg-Cl	10,87	2,92	0,59	0,22
CL 580	579	Ca-Mg-Ca-Cl	1,14	0,39	0,67	0,15
		Na-Mg-Ca-Cl-				
CL 584	255	HCO	0,78	0,25	0,22	0,1
		Ca-Mg-Ca-Cl-				
CL 585	308	HCO3	0,87	0,29	0,26	0,12
		Ca-Mg-Ca-Cl-				
CL 586	298	HCO3	0,87	0,32	0,26	0,1
CL 587	844	Mg-Na-Cl-HCO3	1,5	0,36	0,4	0,21
CL 588	591	Ca-Mg-HCO3-Cl	0,81	0,23	0,99	0,24
CL 589	673	Ca-Mg-Cl-HCO3	1,22	0,24	0,75	0,26
CL 590	494	Na-Ca-Cl-HCO3	2,05	0,28	0,32	0,33
		Mg-Na-HCO3-				
CL 591	803	SO4	1,38	0,28		1,32
CL 591 A	315	Na-Mg-HCO3-Cl	0,98	0,11	0,17	0,12
CL 895A	198.6	Na-Mg-HCO3-Cl	0,43	0,2	0,12	0,04
CL 898	2240	Na-Cl-HCO3	10,44	0,99		2,05
CL 902A	654	Na-Mg-Cl-HCO3	2,96	0,64	0,11	0,25
CL 902C	2400	Na-Mg-Cl	11,6	1,68	1,14	0,48
CT 631	415	Na-Cl	2,4	0,64		0,184
CT 634	457	Na-K-Cl	1,68	0,88	0,04	0,16
DN 080	1056	Na-Ca-Mg-Cl	5,1	0,2	1,69	0,14
DN 095	236	Na-K-Cl	0,82	0,54	0,098	0,004
DN 104	270	Na-Ca-Mg-Cl	1,22	0,46	0,29	0,05
		Mg-Na-Ca-Cl-				
DN 113	1385	HCO	4,5	0,4	1,88	0,5
DN 137	374	Na-Ca-Mg-Cl	1,03	0,44	0,19	0,32
DN 139	285	Na-Ca-Cl-HCO3	1,02	0,42	0,139	0,053
DN 141	335	Na-Mg-Cl	1,25	0,53	0,11	0,11
DN 141A	479	Na-Cl	1,82	0,79	0,1	0,18
DN 141B	280	Na-Cl-HCO3	1,27	0,37	0,14	0,06
DN 149	355	Na-K-Cl	1,25	0,72	0,15	0,07
DN 159	1643	Mg-Ca-Cl-HCO3	0,97	0,99	1,34	0,7
DN 160	688	Na-Mg-Cl	2,73	0,88	0,09	0,29
DN 161	224	Na-K-Cl	1,02	0,47	0,04	0,05
DN 164	384	Na-Cl-HCO3	1,98	0,56		
DN 166	448	Na-Ca-HCO3-Cl	0,73	0,49	0,42	0,08
DN 267A	2850	Na-Mg-Ca-Cl	12,18	0,82	2,34	0,72
DN 278	1150	Na-Cl	6,6	1,23	0,27	0,36
DN 279	2320	Mg-Na-Cl	7,2	2,37	1,78	0,05
DN 283	1548	Na-Ca-Mg-Cl	6,52	1,19	1,22	0,31
DN 286	4700	Mg-Na-Cl	10,5	2,23	3,19	0,066
DN 292	3170	Ca-Mg-Cl	0,84	0,62	6,15	0,26

DN 293	2126	Na-Mg-Ca-Cl	8,1	0,31	2,25	0,7
DN 296	4670	Na-Mg-Cl	24,02	3,63	1,45	0,18
DN 453	751	Na-Ca-HCO <sub>3</sub> -Cl	2,77	0,49	0,76	0,54
DN 454	904	Na-Mg-Cl-HCO <sub>3</sub>	3,72	0,52		0,81
DN 568B	3800	Mg-Na-Cl	10,5	0,99	2,46	0,18
DN 725A	2180	Ca-Mg-Na-SO <sub>4</sub>	5,4	0,003	2,71	3,4
		Ca-Mg-Na-				
DN 726	1464	HCO <sub>3</sub> -C	3,14	0,12	1,59	1,07
DR 941	2120	Ca-Mg-Cl-SO <sub>4</sub>	4,8	0,3	2,97	3,9
		Ca-Mg-Na-Cl-				
DR 945	797	HCO <sub>3</sub>	2,07	0,44	1,11	0,45
DR 950	895	Mg-Ca-Cl-HCO <sub>3</sub>	1,39	0,38	1,28	0,55
DR 967	1092	Ca-Na-Cl	3,6	0,4	0,99	0,26
DR 969	1986	Ca-Na-Cl	6,9	0,79	1,78	0,29
DR 973	234	Na-K-Mg-Cl	0,76	0,54	0,1	0,04
DR 973 A	887	Na-Mg-K-Ca	2,98	0,5	0,44	0,09
DT 104	600	Na-Mg-Cl	3,48	0,66	0,193	0,05
DT 415	1506	Na-Mg-Cl	8,1	0,4	1,16	0,26
DT 418	1282	Na-Mg-Ca-Cl	5,1	0,16	0,99	0,23
DT 435	932	Na-Mg-Cl-HCO <sub>3</sub>	4,31	0,72	0,45	0,2
DT 453	430	Na-Ca-Cl	1,68	0,53	0,04	0,39
DT 454	631	Na-Mg-Cl	2,2	0,87	0,35	0,16
PS 0083	2140	Na-Mg-Cl	9,79	0,23	0,91	0,11
PS 0083A	497	Na-K-Mg-Cl	1,9	0,96	0,26	
PS 0401	593	Na-Cl	2,97	0,96	0,2	0,001
PS 0124	852	Ca-Na-Mg-Cl	2,1	0,46	0,85	0,26
S 3468	6490	Ca-Mg-Cl	14,24	0,25	12,9	3,53
UP 002	3820	Na-Mg-Cl	14,24	1,02	1,7	0,54
UP 004	362	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -Cl	0,55	0,25	0,59	0,11
UP 007	2780	Na-Mg-Ca-Cl	10,25	0,4	3,36	0,51
UP 007A	956	Na-HCO <sub>3</sub> -Cl	3,31	0,15	0,55	0,31

Os resultados das análises químicas foram representados no Diagrama de Durov Expandido. Esse diagrama tem a distinta vantagem sobre o Diagrama de Piper porque ele fornece mais informações sobre os tipos hidroquímicos e sobre a evolução da qualidade das águas (Lloyd and Heathcote 1985; Petalas and Diamantis 1999; Hussein 2004).

No Diagrama de Durov Expandido oito diferentes campos foram identificados entre os 9 campos possíveis. A maioria das águas estão situadas nos campos 8 e 9, seguido pelos campos 5, 3, 7, 4, 2 and 1 (Figura 13). Os campos e os correspondentes tipos de água identificados são discutidos a seguir:

**Campo 9:** Cl<sup>-</sup> e Na<sup>+</sup> dominante. A água é em geral mais salina. As amostras de água foram coletadas no aquífero Açú na faixa Sul da área e no aquífero cristalino.

**Campo 8:** Cl<sup>-</sup> dominante e nenhum cátion dominante e indica que a água subterrânea pode estar relacionada a uma troca de íons reverso de águas Na<sup>+</sup>- Cl<sup>-</sup>. Neste contexto, se enquadra principalmente as águas coletadas em poços captando águas do aquífero Açú na parte central e norte da área.

**Campo 5:** Nenhum ânion ou cátion dominante, indica águas exibindo simples dissolução ou mistura. Esta situação foi observada na água coletada em poços penetrando o aquífero Açú.

**Campo 3:** HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and Na<sup>+</sup> dominante, indicando provavelmente trocas de íons do aquífero Açú.

**Campo 7:**  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$  dominante. A água pode resultar de trocas de íon reversa de águas  $\text{Na}^+$ - $\text{Cl}^-$ .

**Campo 4:**  $\text{SO}_4^{2-}$  dominante e  $\text{Ca}^{2+}$  dominante, indicando simples mistura ou dissolução. Corresponde a águas do aquífero Açú com influência de águas do aquífero Jandaira.

**Campo 2:**  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{Mg}^{2+}$  dominante, com  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Na}^+$  também considerados importantes. Provavelmente a água está associada com dolomitos; Representa água de poço situado no setor norte da área de estudo, próximo as rochas carbonáticas ou associado com águas bombeadas dos aquíferos Jandaira e Açú, ou seja, que penetram os dois aquíferos. Somente um caso foi observado.

**Campo 1:**  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$  dominante, representando uma amostra de um poço no aquífero Jandaira.

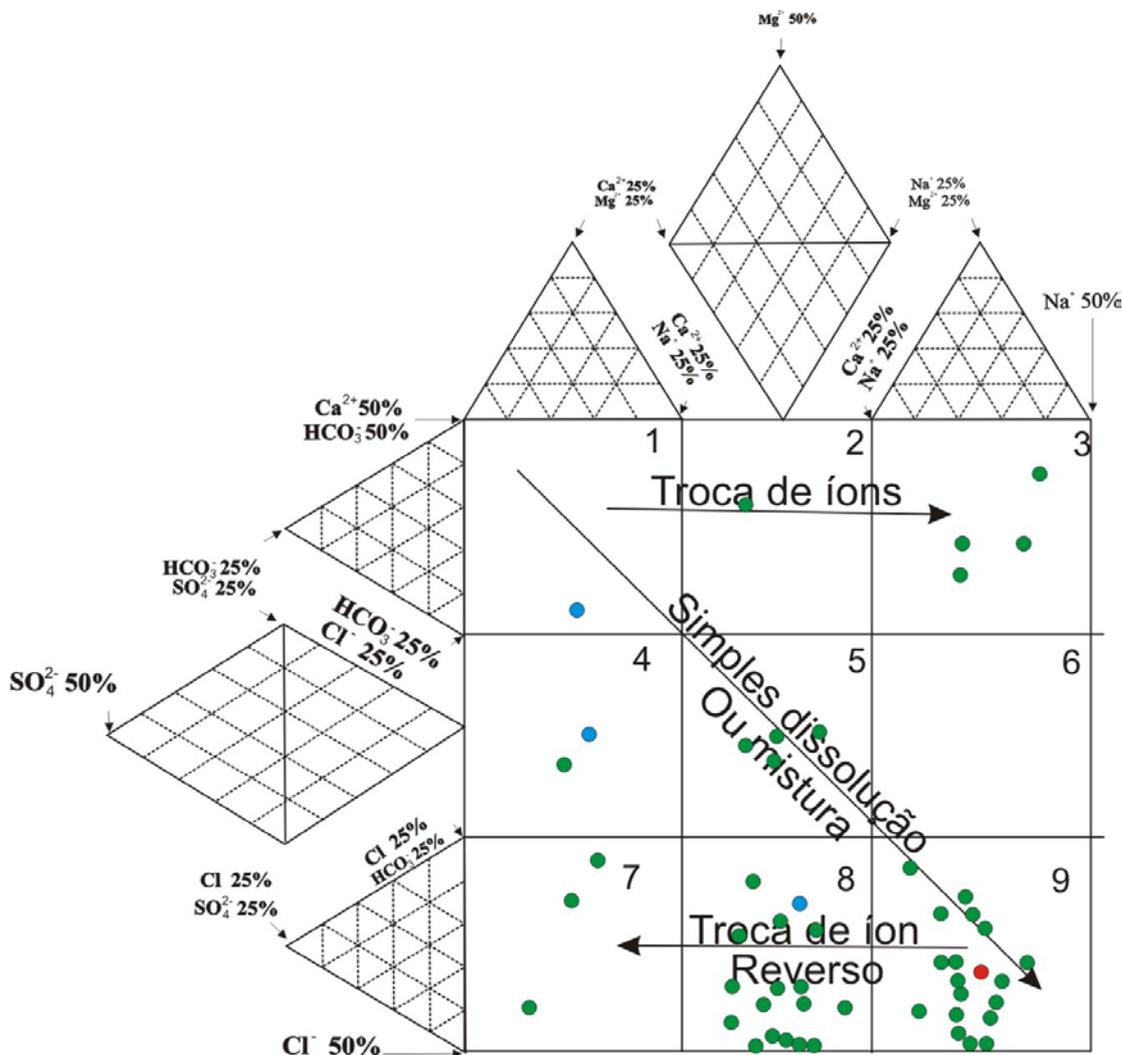


Figura 13 - Diagrama de Durov expandido

## **1,6 - Qualidade das águas**

### **1,6.1 - Qualidade das águas para o consumo humano**

De um modo geral uma água é considerada potável quando pode ser consumida pelo homem sem perigo nenhum para sua saúde. Os órgãos sanitários apresentam padrões de potabilidade que variam em cada país, em função das peculiaridades locais. Percebe-se, entretanto, a tendência mundial de normalização das regulamentações existentes. Os guias atuais para determinar a potabilidade das águas baseiam-se em dois critérios distintos: primeiro, quanto a sua importância para a saúde, no que diz respeito aos efeitos tóxicos, carcinogênicos e mutagênicos, e, o segundo, quanto aos aspectos organolépticos ou estéticos. No primeiro caso, intervêm os caracteres químicos e bacteriológicos das águas. A água é de boa potabilidade química quando as concentrações de seus elementos satisfazem as condições fixadas para eles e de boa portabilidade bacteriológica, quando as águas são isentas de bactérias patogênicas. O segundo caso refere-se ao sabor, cor, odor, e turbidez.

Como já citado anteriormente, os constituintes químicos determinados no presente trabalho correspondem aos seguintes elementos e parâmetros: cátions e ânions principais; os compostos da série nitrogenada (amônio, nitrito e nitrato) e o ferro, além da condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, dureza, alcalinidade e pH. Concentrações excessivas dos constituintes iônicos principais das águas, tais como sódio, sulfato, cloreto e magnésio, e, também, o ferro, não apresenta perigo direto para a saúde do consumidor, porém produzem efeitos organolépticos que podem impossibilitar o consumo das águas (Fenzl, 1988). Tabela 5.9 apresenta as normas para a qualidade de uma água potável de acordo com a Organização Mundial de Saúde e de acordo com a resolução do CONAMA nº 325 de março 2005, especificamente para os parâmetros químicos considerados neste trabalho.

A avaliação dos resultados das análises químicas das 63 amostras coletadas em poços penetrando o aquífero Açu permitem as seguintes considerações em termos da potabilidade dessas águas:

As águas subterrâneas de um modo geral como é de se esperar não apresentam problemas quanto as suas propriedades físicas, principalmente por se tratar de um aquífero poroso e relativamente profundo como o aquífero Açu.

De conformidade com os resultados das análises (Tabela 2 e Tabela 9), 56% das amostras analisadas ficaram enquadradas na categoria de boas a excelentes, e, 44% apresentaram algum tipo de restrição. Na maioria dos casos, entretanto, as restrições são de ordem organoléptica.

A Organização Mundial de Saúde estabelece que as amostras de água submetidas análises bacteriológicas devem ser isentas de coliformes totais e fecais. Análises bacteriológica não foram efetuadas, convém ressaltar, entretanto, que as águas subterrâneas em geral são isentas de organismos patogênicos. Casos de contaminação desta natureza em geral estão associados contaminação no próprio poço de produção.

**Tabela 8 - Normas de potabilidade química (mg/L, quando não indicado)**

Características	OMS (Szikszay, 1993)		R. CONAMA 325 de Março 2005
	Permissível	Excessivo	Máximo permitido
PH (adm.)	7,0-8,5	6,5-9,2	6-9,5
STD	1000	1.500	500
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> )			500
Cálcio	75	200	
Magnésio	125	125	
Ferro total	0,3	1	0,3
Sódio	200		200
Cloreto	250	600	250
Sulfato	200	400	250
Amoníaco	0,5	0,5	1,5
Nitrato	45	50	45

**Tabela 9 - Potabilidade das águas do aquífero Açú na Borda Sul da Bacia Potiguar: Trecho Upanema - Afonso Bezerra**

Amostra	pH*	STD	NH3	NO3	Ca	Mg	NH4	Fe	SO4	Cl	Potabilidade
DN 159	7,4	809,0	0,1	6,6	81,6	67,5	22,3	0,1	67,1	529,8*	Restrições
CL 898	7,8	1104,0	0,1	13,2	24,3	33,7	457,1	0,1	197,4	399,9*	Restrições
CL 571	7,7	293,0	0,3	19,7	32,6	81,9	250,0	0,2	21,0	719,8	Restrições
CL 588	6,8	297,0	0,4	9,9	97,9	24,1	18,7	1,0	23,0	75,4	Excelente
CL 587	6,7	405,0	0,2	13,8	24,5	41,5	34,5	0,3	20,6	150,6	Boa
DN 041	6,6	1060,0*	0,2	27,6	147,4*	17,4	74,3	0,1	24,4	126,0	Boa
DN 139	6,4	135,0	0,2	5,5	16,3	3,4	29,3	0,4	5,1	50,6	Excelente
PS 0083A	5,3	241,0	0,0	5,1	10,6	10,6	43,8	0,1	0,0	133,0	Excelente
DN 705	6,8	166,0	0,0	10,8	21,7	21,2	140,0	0,4	0,1	64,0	Boa
DN 886	7,6	259,0*	0,0	19,7	130,6	22,8	18,0	0,3	0,3	125,7*	Excelente
DN 113	6,8	677,0	0,0	7,3	95,5	84,4	103,4	0,4	28,1	199,9*	Restrições
DN 283	6,4	762,0	0,1	7,9	61,2	6,2	150,0	0,1	28,7	42,0*	Restrições
DN 0083	6,4	707,0*	0,2	0,0	10,8	38,8	150,0	0,1	10,4	680,8*	Restrições
CS 685	6,8	1840,0*	0,4	13,6	106,1	139,8	245,4	0,4	17,6	980,8*	Restrições
DN 631	6,3	204,0	0,0	1,7	1,3	2,2	6,3	0,1	17,7	103,0	Excelente
DN 141A	6,0	414,0	0,1	17,2	11,4	8,2	41,8	0,3	10,8	114,0	Boa
DN 137	6,0	204,0	0,3	5,7	20,4	8,7	41,8	0,3	30,8	80,0	Excelente
DN 368	6,1	1800,0*	0,5*	104,9*	155,0	154,2	240,0	0,6	11,1	121,8*	Restrições
CL 584	6,6	124,0	0,2	3,9	13,1	8,7	17,9	0,2	9,6	49,6	Excelente
CL 586	6,6	140,0	0,0	5,1	18,8	6,3	20,0	0,3	9,9	60,6	Excelente
CL 591	6,1	385,0	0,0	5,6	29,8	55,9	40,9	0,2	126,4	58,0	Excelente
UP 004	6,7	173,0	0,3	7,4	36,7	14,5	13,1	0,2	10,7	28,0	Excelente
DN 454	7,4	443,0	0,2	4,9	14,7	45,3	91,4	0,3	78,0	148,0	Boa
DN 166	7,5	218,0	0,2	4,2	23,7	10,1	53,3	0,3	8,1	42,7	Excelente
DN 160	6,3	143,0*	0,2	4,5	12,4	89,2	250,0	0,4	69,0	849,8*	Restrições
DN 160	6,3	227,0	0,2	6,5	15,3	20,2	62,0	0,3	39,1	167,8	Boa
DN 278	6,0	361,0	0,2	0,5	25,3	22,7	131,7	0,3	34,4	115,9*	Restrições
DN 161	6,0	139,0	0,1	1,9	4,1	3,4	28,0	0,3	5,4	52,0	Excelente
DN 293	6,7	1970,0*	0,4	1,9	18,3	81,9	186,2	0,4	67,5	620,4*	Restrições
DN 634	6,3	210,0	0,2	10,8	20,4	15,7	18,3	0,4	12,3	62,0	Excelente
CL 0124	6,3	430,0	0,2	14,8	49,4	20,7	48,0	0,4	25,3	180,0	Boa
CL 382	6,3	323,0	0,2	23,4	33,4	18,3	48,0	0,4	25,3	180,0	Boa
CL 585	6,6	146,0	0,2	6,1	23,7	6,3	20,0	0,4	12,0	55,6	Restrições
DN 104	6,1	130,0	0,1	13,8	13,9	7,2	28,0	0,4*	5,3	83,4	Restrições
DN 141	6,0	123,0	0,0	0,0	8,0	6,7	26,3	0,2	10,5	72,0	Restrições
DN 590	6,3	244,0	0,1	9,0	20,1	17,1	49,9	0,4	10,5	82,0	Excelente
DN 292	6,3	199,0*	0,3	1,1	16,2	12,1	19,3	0,2	31,6	82,0	Boa
DN 902C	7,2	1224,0*	0,3	15,4	65,3	73,5	266,7*	7,1*	46,6	890,7*	Restrições
SP 3468	6,8	3450,0*	0,3	121,3	693,6*	313,6*	327,5	0,1	339,2	2244,2*	Restrições
973A	5,2	431,0	0,1	3,1	21,2	31,8	68,6	0,1	8,5	22,3	Excelente

DR 945	6,5	383,0	0,1	13,9	68,5	27,0	47,6	0,0	43,0	165,9	Boa
DR 969	6,1	983,0	0,1	3,2	171,4	43,4	158,6	0,1	27,8	679,8*	Restrições
DT 415	7,0	728,0	0,1	0,0	57,1	48,2	186,2	0,1	25,2	446,9*	Restrições
DR 973	5,5	114,0	0,0	6,7	5,7	5,3	17,5	0,1	3,8	64,0	Excelente
DN 080	6,7	513,0	0,1	17,4	73,4	43,4	117,2	0,1	13,3	369,9*	Restrições
CL 580	6,2	275,0	0,0	13,4	48,4	16,4	26,3	0,0	14,3	152,9	Excelente
DN 149	5,4	170,0	0,0	7,8	9,0	7,2	28,8	0,1	7,0	102,0	Excelente
DT 104	5,4	286,0	0,0	11,9	9,8	14,5	80,0	0,1	4,9	167,9	Excelente
PS 0401	5,4	281,0	0,0	17,5	11,4	4,8	68,3	0,1	0,1	170,2	Boa
DN 453	7,3	364,0	0,1	0,0	52,2	19,3	78,1	0,4	51,9	114,0	Boa
DT 435	6,7	450,0	0,0	25,1	26,1	19,3	100,0	0,1	19,0	176,0	Boa
DR 950	7,0	432,0	0,1	18,3	73,4	45,3	32,0	0,1	53,0	155,9	Boa
DN 164	7,3	211,0	1,2	0,6	7,3	7,2	45,7	0,4*	2,4	91,0	Restrições
AB 001	6,7	628,0	0,2	18,0	61,2	36,2	144,8	0,3	51,9	312,7*	Restrições
DR 967	6,1	521,0	0,0	0,3	146,9	24,1	82,8	0,1	24,9	349,9*	Restrições
DN 725A	6,7	1080,0	0,5	27,8	244,8	101,2	124,1	0,5*	326,6*	0,1	Restrições
DN 296	4,3	2430,0*	0,4	208,0	65,3	188,0	552,4	0,0	17,5	1499,5*	Restrições
CL 273B	6,6	2872,0*	0,3	7,1	204,0	207,3	628,6	0,4*	47,7	1550,8*	Restrições
CL 591A	6,7	160,0	0,7	30,6	11,4	9,2	43,8	0,1	11,3	38,0	Excelente
DT 452	5,8	209,0	0,2	10,5	17,1	7,7	38,7	0,3	37,3	99,0	Excelente

### 1.6.2 - Qualidade das águas para irrigação

A qualidade das águas do aquífero Açú na área de estudo foi avaliada sob os três aspectos fundamentais quanto ao uso na irrigação: salinidade (C), sodicidade (S) e toxidade (T) de íons. O efeito da salinidade é de natureza osmótica podendo afetar diretamente o rendimento das culturas. A sodicidade se refere ao efeito relativo do sódio da água de irrigação tendendo a elevar a porcentagem de sódio trocável do solo (PST), com danos nas suas propriedades físico-químicas, provocando problemas de infiltração. A toxidade, diz respeito ao efeito específico de certos íons sobre as plantas, afetando o rendimento, independente do efeito osmótico.

#### 1.6.2.1 - Classes de água quanto ao risco de salinidade

O excesso de sais na zona radicular afeta consideravelmente o desenvolvimento das culturas, com diminuição na taxa de respiração e crescimento. A excessiva salinidade reduz o desenvolvimento devido ao aumento de energia que precisa ser despendida para absorver água do solo a ao ajustamento bioquímico necessário para sobreviver sob estresse.

A condutividade elétrica é o parâmetro empregado para expressar a concentração de sais solúveis na água tendo em vista a elevada correlação que existe com os sólidos totais dissolvidos.

Numa avaliação qualitativa, as águas se dividem em quatro classes de salinidade, à medida que aumenta a concentração de sais e conseqüentemente sua condutividade elétrica, recebendo denominações sucessivas de C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>, conforme apresentado a seguir:

- C<sub>1</sub> - Água de baixa salinidade. Pode ser usada para irrigação da maioria das culturas, em quase todos os tipos de solos, com muito pouca probabilidade de que se desenvolvam problemas de salinidade;
- C<sub>2</sub> - Água de média salinidade. Pode ser usada sempre e quando houver uma lixiviação moderada de sais. Em quase todos os casos permitem o cultivo de plantas

moderadamente tolerante aos sais, sem necessidade de práticas especiais de controle de salinidade;

- C<sub>3</sub> - Água de alta salinidade. Não pode ser usada em solos com drenagem deficiente. Mesmo com drenagem adequada podem ser necessárias práticas especiais de controle da salinidade, devendo, portanto, ser utilizada na irrigação de espécies vegetais de alta tolerância aos sais. Os riscos apresentados por esta classe de água podem ser amenizados quando do emprego do método de irrigação localizada mantendo o solo continuamente úmido;
- C<sub>4</sub> - Água de muito alta salinidade. Não é apropriada para irrigação sob condições normais, porém pode ser usada ocasionalmente, em circunstâncias muito especiais. Os solos devem ser permeáveis, a drenagem adequada, devendo ser aplicada água em excesso para se obter uma boa lixiviação de sais e, mesmo assim devem ser explorados com culturas altamente tolerantes aos sais.

Em sua forma mais moderna, a classificação das águas quanto ao risco de salinidade foi estabelecida segundo as proposições da UCCC - University of California Committee of Consultants que estabeleceram limites diferenciados conforme pode ser visto na Tabela 10.

A salinidade afeta tanto o crescimento das plantas como a produção e qualidade do produto, se manifestando principalmente na redução da população e desenvolvimento das culturas, com sintoma similar ao causado por estresse hídrico.

**Tabela 10 - Classificação da água para irrigação quanto ao risco de salinidade.**

Classe de Salinidade	Richards (1954)	UCCC <sup>1</sup>	Risco de Salinidade	Ayers & Westcot (1991)	Problema de Salinidade
	Faixas de CE <sub>a</sub> (dS.m <sup>-1</sup> )			Faixa de CE <sub>a</sub> (dS.m <sup>-1</sup> )	
C <sub>1</sub>	< 0,25	< 0,75	Baixo	< 0,7	nenhum
C <sub>2</sub>	0,25 - 0,75	0,75 - 1,50	Médio	0,7 - 3,0	moderado
C <sub>3</sub>	0,75 - 2,25	1,50 - 3,00	Alto	> 3,0	severo
C <sub>4</sub>	> 2,25	> 3,00	Muito alto	-	-

<sup>1</sup>UCCC - University of California Committee of Consultants (Fonte: Frenkel, 1984 ; Pizarro, 1985)..

### 1.6.2.2 - Classes de água quanto ao risco de sodicidade

Está comprovado que valores altos de percentual de sódio trocável (PST), especialmente sob condições de baixa salinidade, causam a dispersão de partículas com redução na condutividade hidráulica do solo. A razão de adsorção de sódio (RAS) da água de irrigação é o parâmetro de melhor correlação com a PST do solo.

Ultimamente, o risco de sodicidade tem sido avaliado com mais segurança relacionando a RAS corrigida (RAS<sup>o</sup>) com a salinidade da água, estimada pela equação 5.1:

$$RAS^o = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca^o + Mg)}{2}}} \quad (5.1)$$

onde,

Na - Concentração de sódio na água, em mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>;

Ca<sup>o</sup> - Concentração de cálcio na água, corrigida pela relação HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Ca (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>) e CE<sub>a</sub> (dS.m<sup>-1</sup>), de acordo com a Tabela 11;

Mg - Concentração de Magnésio na água, em mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

A RAS<sup>o</sup>, conforme procedimento sugerido por Suarez (1981), facilita o entendimento das alterações que ocorrem com o cálcio na água do solo através de reações com carbonatos e silicatos.

A classificação das águas de irrigação com respeito a RAS se baseia essencialmente no efeito do sódio trocável nas condições físicas do solo causando problemas de infiltração pela redução da permeabilidade.

A recomendação de Ayers & Westcot (1991), quanto ao perigo de sódio, restringe-se a três classes de sodicidade, obtidas relacionando-se a RAS<sup>o</sup> com a salinidade da água de irrigação (Tabela 11).

**Tabela 11 - Riscos de problemas de infiltração no solo devido sodicidade da água.**

RAS <sup>o</sup>	Classes de sodicidade <sup>1</sup>		
	S <sub>1</sub> Sem Problemas	S <sub>2</sub> Problemas Crescentes	S <sub>3</sub> Problemas Severos
(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>	CE <sub>a</sub> (dS.m <sup>-1</sup> )		
0-3	> 0,70	0,70 - 0,20	< 0,20
3-6	> 1,20	1,20 - 0,30	< 0,30
6-12	> 1,90	1,90 - 0,50	< 0,50
12-20	> 2,90	2,90 - 1,30	< 1,30
20-40	> 5,00	5,00 - 2,90	< 2,90

Fonte: Adaptado de Ayers & Westcot (1991). <sup>1</sup> Simbologia (S) não se refere a classificação de Richards (1954); foi inserida para resumir a descrição da classe.

**Tabela 12 - Concentração de cálcio (Ca) contida na água do solo, próxima à superfície, que resultaria da irrigação com água de determinada relação HCO<sub>3</sub>/Ca e CE<sup>1,2,3</sup>**

Valor de HCO <sub>3</sub> /Ca da água	Salinidade da Água Aplicada (CE) - dS.m <sup>-1</sup>											
	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	
8,0	13,20	13,61	13,92	14,40	14,79	15,26	15,91	16,43	17,28	17,97	19,07	19,94
0,05	8,31	8,57	8,77	9,07	9,31	9,62	10,02	10,35	10,89	11,32	12,01	12,56
0,10	6,34	6,54	6,69	6,92	7,11	7,34	7,65	7,90	8,31	8,64	9,17	9,58
0,15	5,24	5,40	5,52	5,71	5,87	6,06	6,31	6,52	6,86	7,13	7,57	7,91
0,20	4,51	4,65	4,76	4,92	5,06	5,22	5,44	5,62	5,91	6,15	6,52	6,82
0,25	4,00	4,12	4,21	4,36	4,48	4,62	4,82	4,98	5,24	5,44	5,77	6,04
0,30	3,61	3,72	3,80	3,94	4,04	4,17	4,35	4,49	4,72	4,91	5,21	5,45
0,35	3,30	3,40	3,48	3,60	3,70	3,82	3,98	4,11	4,32	4,49	4,77	4,98
0,40	3,05	3,14	3,22	3,33	3,42	3,53	3,68	3,80	4,00	4,15	4,41	4,61
0,45	2,84	2,93	3,00	3,10	3,19	3,29	3,43	3,54	3,72	3,87	4,11	4,30
0,50	2,17	2,24	2,29	2,37	2,43	2,51	2,62	2,70	2,84	2,95	3,14	3,28
0,75	1,79	1,85	1,89	1,96	2,01	2,09	2,16	2,23	2,35	2,44	2,59	2,71
1,00	1,54	1,59	1,63	1,68	1,73	1,78	1,86	1,92	2,02	2,10	2,23	2,33
1,25	1,37	1,41	1,44	1,49	1,53	1,58	1,65	1,70	1,79	1,86	1,97	2,07
1,50	1,23	1,27	1,30	1,35	1,38	1,43	1,49	1,54	1,62	1,68	1,78	1,86
1,75	1,13	1,16	1,19	1,23	1,26	1,31	1,36	1,40	1,48	1,54	1,63	1,70
2,00	1,04	1,06	1,10	1,14	1,17	1,21	1,26	1,30	1,37	1,42	1,51	1,58
2,25	0,97	1,00	1,02	1,06	1,09	1,12	1,17	1,21	1,27	1,32	1,40	1,47
2,50	0,85	0,89	0,91	0,94	0,96	1,00	1,04	1,07	1,13	1,17	1,24	1,30
3,00	0,78	0,80	0,82	0,85	0,87	0,90	0,94	0,97	1,02	1,06	1,12	1,17
3,50	0,71	0,73	0,75	0,78	0,80	0,82	0,86	0,88	0,93	0,97	1,03	1,07
4,00	0,66	0,68	0,69	0,72	0,74	0,76	0,79	0,82	0,86	0,90	0,95	0,99
4,50	0,61	0,63	0,65	0,67	0,69	0,71	0,74	0,76	0,80	0,83	0,88	0,93
5,00	0,49	0,50	0,52	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,64	0,67	0,71	0,74
7,00	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,45	0,47	0,48	0,51	0,53	0,56	0,58
10,0	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37
20,0	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,27	0,28

<sup>1</sup>Fonte: Suarez (1981); <sup>2</sup>Supõe-se: a) Cálcio do solo proveniente do calcário (CaCO<sub>3</sub>) ou silicatos; b) Não existe precipitação do Magnésio; c) Pressão parcial de CO<sub>2</sub> perto da superfície do solo (pCO<sub>2</sub>) é 7.10<sup>-2</sup> kPa; <sup>3</sup>Ca<sup>o</sup> e HCO<sub>3</sub>/Ca são expressos em mmol<sub>c</sub>. L<sup>-1</sup>, e a CE<sub>a</sub>, em dS.m<sup>-1</sup>.

### 1.6.2.3 - Classes de água quanto ao risco de toxicidade

Os íons cloreto, sódio e boro, quando presentes em concentrações elevadas na água, podem causar danos as culturas reduzindo a produção. A magnitude do dano depende, além da concentração do íon, do tempo de exposição, da sensibilidade das plantas, do uso da água pelas culturas, do tipo de irrigação, etc. Em irrigação por aspersão e sob condições de alta evaporação o problema tende a se acentuar. As culturas arbóreas e plantas lenhosas em geral são sensíveis ao sódio e cloreto.

Foram definidas três classes de risco quanto a toxicidade das plantas designadas de T1, T2 e T3, os quais se acham definidos na Tabela 13.

**Tabela 13 - Concentrações de íons em água e riscos de toxicidade às plantas.**

Íon	Classes de toxicidade da água <sup>1</sup>		
	T <sub>1</sub> Nenhum problema	T <sub>2</sub> Problema moderado	T <sub>3</sub> Problema severo
Sódio ou Cloreto (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )			
- Irrigação por superfície	< 3	3 - 9	> 9
- Irrigação por aspersão	< 3	> 3	
Boro (mg L <sup>-1</sup> )	< 0,7	0,7 - 3,0	>3,0

Fonte: Adaptado de Ayers & Westcot (1991). <sup>1</sup> Simbologia (T) não contida nos artigos originais; inserida neste item para resumir descrição da classe.

### 1.6.2.4 - Classificação das águas do aquífero Açú para irrigação

De conformidade com os resultados das análises químicas e os correspondentes limites de classificação, as classes de águas do aquífero Açú para irrigação na Borda Sul da Bacia Potiguar no trecho Apodi-Afonso Bezerra ficaram assim definidas (Tabela 14 e Figura 14):

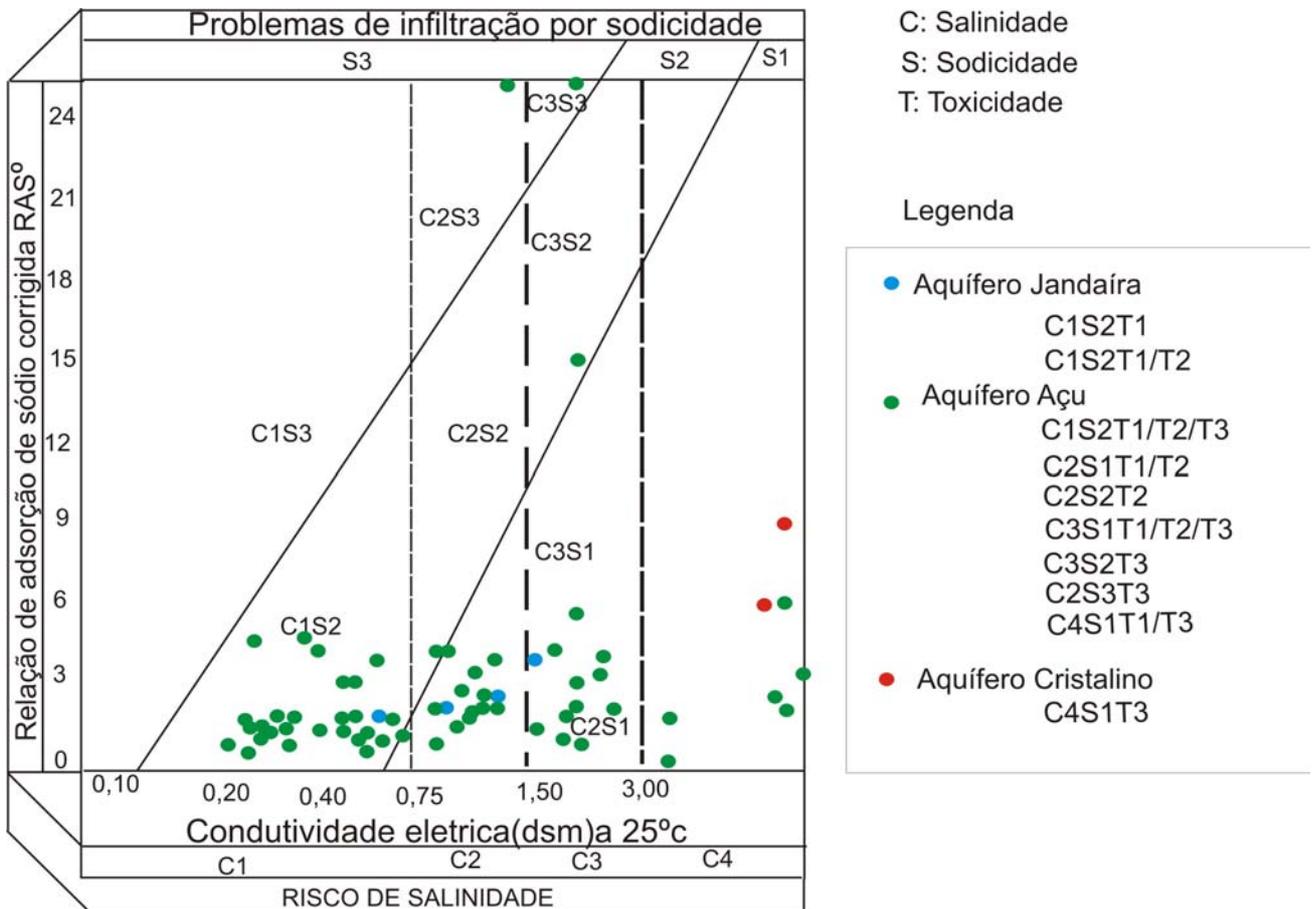
As águas em sua maioria (40%) pertence a classe C1S2T1, ou seja são águas de baixa salinidade, sodicidade média e baixo risco de toxicidade. Podem ser usadas em qualquer tipo de cultura, porém a sua utilização em solos com algum problema de salinidade pode apresentar risco médio de sódio trocável. Este tipo de água ocorre predominantemente na faixa norte da área contígua aos calcários entre Afonso Bezerra e Upanema, se estendendo para a parte central no setor Ocidental da área. Nesta categoria estão também incluídas as águas dos poços que captam águas tanto do aquífero Açú como do aquífero Jandaira.

Águas do tipo C2S1T2 e C2S1T1 foram identificadas em cerca de 34% das amostras analisadas. São águas de salinidade média, sem risco de troca de sódio e toxicidade baixa a média. São recomendadas para solos arenosos, e o desenvolvimento de culturas com resistência média aos sais, porém não apresentam risco de sódio trocável. Essas águas estão situadas predominantemente na porção faixa central da área que se estende de Upanema a Afonso Bezerra. Água do tipo C2S1T1 foi identificado em um poço penetrando aos aquíferos Açú e Jandaira.

O restante das amostras do aquífero Açú analisadas (36%) pertence a diferentes classes que incluem: C1S1T1; C1S2T2; C1S3T1; C2S1T3; C2S2T2; C2S3T3; C3S1T1 e C3S1T3. Foi possível identificar que as maiores restrições quanto ao uso da água na irrigação do aquífero Açú correspondem as amostras provenientes da faixa sul da área, notadamente na região de Afonso Bezerra, cujas águas sempre apresentam restrições com relação a pelo menos um dos parâmetros considerados para efeito de classificação.

As águas provenientes do aquífero cristalino, de conformidade com a amostragem realizada pertencem a classe C3S1T3, ou seja, são águas de elevada salinidade e alto risco de toxicidade, apresentando portanto sérias limitações ao uso na irrigação, apesar de que o risco de sódio trocável seja baixo.

A Figura 14 permite uma visualização gráfica das classes de água para a irrigação segundo os aspectos de salinidade e sodicidade. Também, na legenda está indicado a classe de água segundo a toxicidade.



**Figura 14 - Classificação das águas para irrigação**

Tabela 14 - Classificação das águas do aquífero Açú para irrigação

Nº do poço	pH	HCO3 mmol/l	Ca mmol/l	Mg mmol/l	Na mmol/l	B mg/l	Cl mmol/l	HCO3/Ca mmol/l	Ca° mmol/l	RAS°	CE dS/m	Classe de água
<b>Aquífero Jandaira/ Açú</b>												
CL 587	6,65	2,12	1,22	3,45	1,50	0,28	4,24	1,74	1,37	0,97	0,844	C2S1T1
CL 588	6,82	3,32	4,9	2,01	0,81	0,00	2,13	0,68	2,17	0,56	0,591	C1S2T1
DN 726	6,84	6,8	8,77	3,21	3,13	0,43	6,34	0,78	0,05	2,45	1,464	C2S1T2
<b>Aquífero Açú</b>												
AB 001	6,70	2,64	1,53	1,49	6,29	0,03	8,81	1,73	1,05	5,59	1,270	C2S2T2
CL 568	6,11	0,52	3,88	6,35	10,43	0,54	31,60	0,13	5,45	4,30	3,530	C3S1T3
CL 571	5,72	0,08	0,82	3,37	10,87	0,17	20,28	0,10	8,12	4,53	2,420	C2S1T3
CL 580	6,21	0,76	1,21	0,67	1,14	0,16	4,31	0,63	2,05	0,98	0,579	C1S2T1
CL 584	6,63	0,76	0,33	0,36	0,78	0,09	1,40	2,33	0,80	1,03	0,255	C1S2T1
CL 585	6,64	1,00	0,59	0,26	0,87	0,06	1,57	1,69	0,95	1,12	0,308	C1S2T1
CL 586	6,55	0,76	0,47	0,26	0,87	0,01	1,71	1,62	1,02	1,09	0,298	C1S2T1
CL 589	6,47	2,52	1,84	0,75	1,22	0,08	3,02	1,37	1,21	1,23	0,673	C1S2T1
CL 590	6,33	1,92	0,65	0,50	2,32	0,00	2,29	2,94	0,72	2,97	0,494	C1S2T1
CL 591	7,07	4,08	0,73	2,30	1,82	0,12	1,63	5,56	0,50	1,54	0,803	C2S1T1
CL 591 A	6,66	1,92	0,29	0,38	1,90	0,11	1,07	6,73	0,41	3,04	0,315	C1S3T1
CL 895A	6,68	1,64	0,16	0,32	1,28	0,00	0,61	10,06	0,48	2,02	0,199	C1S1T1
CL 898	7,78	10,48	0,61	1,39	19,88	0,16	11,26	17,27	0,25	21,96	2,240	C2S3T3
CL 902A	6,30	1,92	0,37	0,71	3,23	0,16	3,55	5,23	0,51	4,13	0,654	C1S2T2
CL 902C	7,18	2,12	1,63	3,02	11,59	0,00	18,87	1,30	1,45	7,75	2,400	C2S1T3
CT 631	6,21	0,60	0,08	0,22	2,97	0,06	2,96	7,36	0,40	5,34	0,415	C1S2T1

CT 634	5,20	0,16	0,20	0,38	1,68	0,17	3,32	0,78	1,71	1,65	0,457	C1S2T1
DN 080	6,67	1,44	1,84	1,79	5,10	0,15	10,42	0,78	1,85	3,78	1,056	C2S1T2
DN 095	5,64	0,28	0,10	0,20	0,82	0,04	1,80	2,75	0,71	1,21	0,236	C1S2T1
DN 104	6,12	0,24	0,35	0,30	1,22	0,03	2,35	0,69	1,83	1,18	0,270	C1S2T1
DN 113	6,81	4,28	2,39	3,47	4,50	0,24	11,26	1,79	1,08	2,98	1,385	C2S1T2
DN 137	6,02	0,52	0,51	0,36	1,03	1,00	2,25	1,02	1,43	1,09	0,374	C1S2T1
DN 139	6,44	1,00	0,41	0,14	1,28	0,15	1,43	2,45	0,78	1,88	0,285	C1S2T1
DN 141	5,90	0,52	0,22	0,36	1,25	0,07	2,11	2,32	0,82	1,63	0,335	C1S2T1
DN 141A	5,78	0,28	0,29	0,34	1,82	0,00	3,21	0,98	1,46	1,92	0,479	C1S2T1
DN 141B	6,65	0,76	0,20	0,24	1,28	0,17	1,68	3,73	0,60	1,97	0,280	C1S2T1
DN 149	5,41	0,16	0,22	0,30	1,25	0,16	2,87	0,71	1,83	1,21	0,355	C1S2T1
DN 159	7,42	3,32	2,04	2,78	0,97	0,08	14,92	1,63	1,20	0,69	1,643	C2S1T1
DN 160	6,26	0,80	0,39	0,83	2,73	0,26	4,53	2,06	0,92	2,92	0,688	C1S2T1
DN 161	5,91	0,40	0,10	0,14	1,22	0,18	1,46	3,92	0,58	2,03	0,224	C1S2T1
DN 164	7,26	1,00	0,18	0,30	1,99	0,10	2,56	5,45	0,47	3,21	0,384	C1S2T1
DN 166	7,45	3,24	0,59	0,42	2,32	0,13	1,20	5,48	0,48	3,46	0,448	C1S2T1
DN 267A	6,19	2,12	3,06	3,67	12,17	0,11	23,94	0,69	2,22	7,09	2,850	C2S1T3
DN 278	5,96	0,80	0,63	0,93	6,60	0,24	8,90	1,27	1,37	6,15	1,150	C2S2T2
DN 279	5,43	0,12	1,84	4,36	7,20	0,16	20,98	0,07	10,62	2,63	2,320	C2S1T2
DN 283	6,50	1,64	1,53	1,49	6,52	0,16	11,88	1,07	1,58	5,27	1,548	C2S1T2
DN 286	5,50	0,12	3,26	9,12	10,49	0,22	37,34	0,04	17,69	2,87	4,700	C3S1T3
DN 292	6,61	3,88	7,96	6,15	0,84	0,89	25,09	0,49	2,91	0,39	3,170	C3S1T1
DN 293	6,67	2,08	2,96	3,37	8,10	0,09	17,48	0,70	2,18	4,86	2,160	C2S1T2
DN 296	4,34	0,08	1,63	7,74	24,02	0,00	42,24	0,05	15,12	7,10	4,670	C3S1T3
DN 453	7,28	3,60	1,31	0,79	3,40	0,29	3,21	2,76	0,78	3,83	0,751	C2S1T2
DN 454	7,36	3,76	0,37	1,86	3,97	0,00	4,17	10,25	0,35	3,78	0,904	C2S1T2
DN 568B	5,81	0,28	2,65	5,75	10,49	0,22	27,91	0,11	8,14	3,98	3,800	C3S1T3
DN	6,73	2,88	6,12	4,17	5,40	0,26	0,00	0,47	2,88	2,88	2,180	C2S1T2

725A													
DR 941	6,90	4,84	6,94	2,98	4,80	0,12	12,67	0,70	2,15	3,00	2,120	C2S1T2	
DR 945	6,45	2,64	1,71	1,11	2,07	0,13	4,67	1,54	1,14	1,95	0,797	C2S1T1	
DR 950	6,97	3,92	1,84	1,86	1,39	0,06	4,39	2,14	0,93	1,18	0,895	C2S1T1	
DR 967	6,12	1,00	3,67	0,99	3,60	0,03	9,86	0,27	3,73	2,34	1,092	C2S1T2	
DR 969	6,05	0,76	4,28	1,79	6,90	0,13	19,15	0,18	5,27	3,67	1,986	C2S1T2	
DR 973	5,47	0,32	0,14	0,22	0,76	0,09	1,80	2,24	0,82	1,06	0,234	C1S2T1	
DR 973 A	5,17	0,16	0,53	1,31	2,98	0,15	0,63	0,30	3,42	1,94	0,887	C2S1T1	
DT 104	5,43	0,40	0,24	0,60	3,48	0,34	4,73	1,63	1,07	3,81	0,600	C1S2T2	
DT 415	7,00	1,40	1,43	1,98	8,10	0,25	12,59	0,98	1,66	6,00	1,506	C2S1T2	
DT 418	5,12	0,08	1,22	1,79	5,10	0,11	10,73	0,07	9,86	2,11	1,282	C2S1T2	
DT 435	6,67	1,56	0,65	0,79	4,35	0,33	4,96	2,39	0,86	4,78	0,932	C2S2T2	
DT 453	5,83	0,36	0,43	0,32	1,68	0,28	2,79	0,84	1,63	1,70	0,430	C1S2T1	
DT 454	6,17	0,20	0,51	0,56	2,20	0,03	4,36	0,39	2,85	1,69	0,631	C1S2T1	
PS 0083	5,36	0,16	1,02	3,57	9,78	0,19	3,75	0,16	6,49	4,36	2,140	C2S1T3	
PS 0083A	5,25	0,12	0,27	0,44	1,90	0,03	19,43	0,45	2,5	1,57	0,497	C1S2T1	
PS 0401	5,40	0,20	0,29	0,20	2,97	0,01	4,80	0,70	1,78	2,99	0,593	C1S2T1	
PS 124	6,53	0,64	1,51	0,85	2,10	0,06	5,52	0,42	2,79	1,56	0,852	C2S1T1	
S 3468	6,84	3,52	17,34	12,91	14,24	0,39	63,22	0,20	5,79	4,66	6,490	C3S1T3	
UP 004	6,67	2,52	0,92	0,60	0,57	0,05	0,79	2,75	0,74	0,70	0,362	C1S2T1	
UP 007	6,59	3,08	3,88	4,17	10,24	0,18	22,25	0,79	1,84	5,91	2,780	C2S1T3	
UP 007A	6,83	5,60	0,87	0,87	6,09	0,11	3,41	6,45	0,45	7,49	0,956	C2S2T2	
<b>Aquífero Cristalino</b>													
UP 002	7,96	0,11	0,11	0,41	0,62	0,10	31,26	0,97	1,84	0,58	3,820	C3S1T1	
CL 273 B	6,58	0,18	0,26	0,71	1,19	0,44	43,69	0,70	2,41	0,95	5,470	C3S1T1	

## **2. Vulnerabilidade e riscos potenciais de contaminação das águas subterrâneas do aquífero Açu**

### **2.1 - Conceitos fundamentais**

O risco potencial das águas subterrâneas serem afetadas por contaminantes dispostos sob a superfície do terreno, é uma função do grau de vulnerabilidade do sistema aquífero e do tipo, natureza e tempo de disposição deste contaminante sobre o terreno. A vulnerabilidade diz respeito a maior ou menor facilidade das águas subterrâneas serem afetadas. É uma característica natural intrínseca do próprio aquífero, que depende do seu tipo, natureza litológica, condutividade hidráulica do meio insaturado, e profundidade das águas subterrâneas freáticas. Ou seja, a vulnerabilidade não pode ser modificada facilmente. A carga contaminante, por outro lado depende da atuação do homem, podendo ser controlada, e, por conseguinte influenciar nos riscos de contaminação.

O conceito de vulnerabilidade tem sido questionado haja vista que a definição de áreas mais ou menos vulneráveis é uma questão do tempo e do tipo de contaminante relacionado um determinado evento ou atividades de contaminação. Tem-se ressaltado, inclusive, que em muitos aquíferos livres e semi-confinados, no caso de contaminantes persistentes e móveis, como é o caso de nitratos e cloretos, o sistema aquífero será inevitavelmente atingido com o decorrer do tempo, além de que uma vez que um aquífero pouco vulnerável é atingido dificilmente o mesmo será recuperado. De qualquer forma, entende-se que os mapas de vulnerabilidade constituem um recurso muito importante no caso do manejo de águas subterrâneas, já que os mesmos indicam os domínios mais susceptíveis de serem afetados tornando mais factível a aplicação de medidas de proteção em função da atividade em desenvolvimento ou que se pretende implantar.

As atividades urbanas constituem atividades potenciais de contaminação para as águas subterrâneas situadas sob o domínio das mesmas que tem sido bastante discutida nas duas últimas décadas diante dos impactos que tem sido gerado como é o caso da contaminação de águas subterrâneas por nitrato devido ao sistema de disposição local de efluentes com uso de fossas e sumidouros, tal como ocorre com a cidade de Natal.

O desenvolvimento agrícola com o uso indiscriminado de agroquímicos no caso de defensivos agrícolas e matéria orgânica no caso de substâncias orgânicas constituem um outro tipo de atividade de grande risco para as águas subterrâneas que tem sido muito pouco avaliado, mormente no Brasil. Neste caso o processo de contaminação das águas subterrâneas por nitrato é direto. Tem-se conhecimento de que a região de Baraúna, na própria Bacia Potiguar, está com as águas subterrâneas bastante afetadas com valores elevados de cloreto, potássio e nitrato. A presença de cloreto e potássio em concentrações elevadas tem sido atribuída ao uso do cloreto de potássio de forma indiscriminada como fertilizante.

Outros contaminantes perigosos como é o caso de metais pesados e hidrocarbonetos podem, em função de atividades urbanas, industriais e agrícolas, estarem afetando as águas subterrâneas, entretanto estes componentes raramente são avaliados.

## 2.2 - Avaliação da vulnerabilidade

Existem várias metodologias para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos, que se diferenciam pelas especificidades dos parâmetros utilizados nas avaliações. No presente trabalho foi utilizado o método GOD, o qual se baseia fundamentalmente em apenas três variáveis (Figura 15): **G**rowndwater occurrence – Tipo de aquífero; **O**verall Aquifer **C**lass – Litologia do aquífero; e **D**epth – Profundidade da água do aquífero. Trata-se de uma metodologia mais adequada para estudos de reconhecimento e avaliações regionais.

O tipo de ocorrência da água subterrânea é identificado dentro de um intervalo de 0 a 1; a caracterização dos estratos acima da zona saturada do aquífero conduzirá a um segundo ponto na escala 0,4 a 1; e, o passo final é a determinação da profundidade do nível freático no caso de aquíferos livres, ou a profundidade do teto do aquífero (base da camada confinante) no caso de aquíferos confinados, que permite a definição do terceiro ponto, numa escala de 0,4 a 1. O valor do Index GOD é definido pelo produto dos três correspondentes valores finais obtidos. A interação entre e os resultados permite a obtenção do correspondente mapa de vulnerabilidade do aquífero.

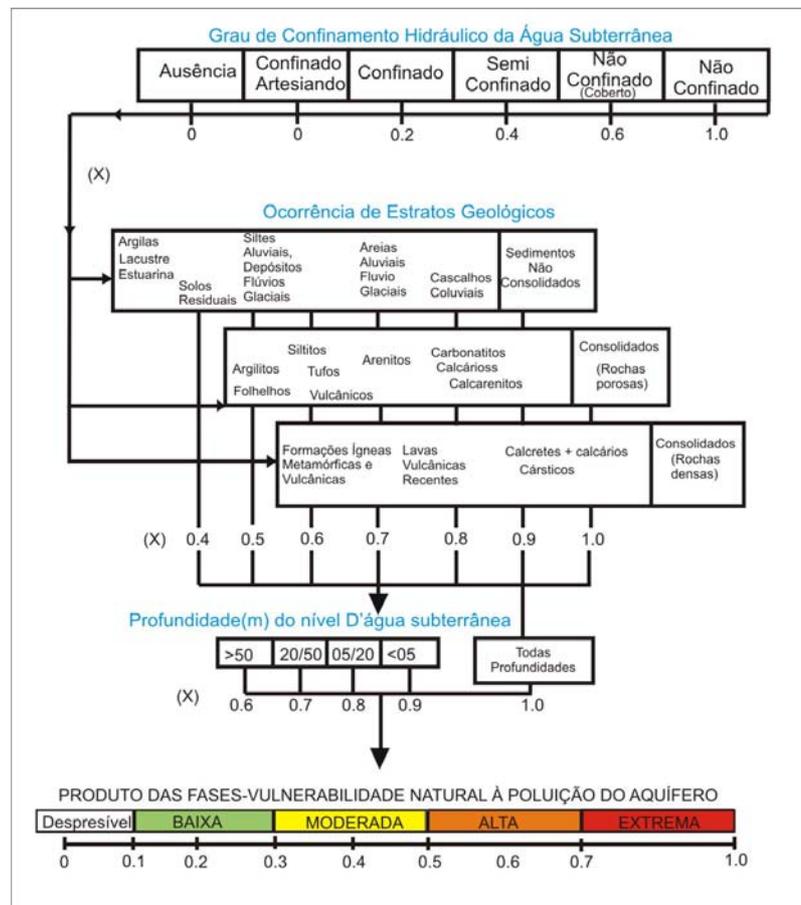


Figura 15 - Índice de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero Açu (Foster *et al.* 2002)

A profundidade das águas subterrâneas na área é condicionada fundamentalmente ao relevo, ou seja, nas regiões mais elevadas, como é o caso de divisores de água, as águas subterrâneas estão mais profundas e nos vales, como é o caso das planícies aluvial do Açú e os vales do rio do Carmo e de Afonso Bezerra, as águas são mais rasas.

No setor Oriental da área, a profundidade das águas subterrâneas varia de menos de 10 m nos vales a mais de 40 m nos domínios de maior destaque topográfico, e, no setor Ocidental a profundidade das águas subterrâneas varia de menos de 10 m a mais de 60 m. Ver Figura 16.

O aquífero Açú, conforme ficou evidenciado anteriormente é em geral um sistema livre com ocorrência localizadas de semi-confinamentos. O meio poroso insaturado no domínio da área, de conformidade com os perfis de poços perfurados varia bastante de fácies desde arenitos finos a grossos e arenitos a arenitos com intercalações de folhelhos.

A aplicação desses resultados de âmbito regional associado as informações localizadas obtidas em cada um dos poços, conduziu ao a elaboração do mapa de vulnerabilidade do aquífero Açú (Figura 17), a qual ficou assim caracterizada:

- A vulnerabilidade é elevada na planície aluvial do rio Açú e nos vales dos rios Do Carmo e Nulungu;
- A vulnerabilidade é moderada mais expressivamente no setor Oriental da área, a oeste do rio Açú e em torno da Lagoa de Piató, além de domínios mais restritos próximos as cidades de Afonso Bezerra e Upanema;
- A vulnerabilidade é baixa em praticamente em todo o setor Ocidental da área ou a oeste do vale do Açú. Também, no setor Oriental da área em uma faixa relativamente estreita contígua aos calcários da formação Jandaira.

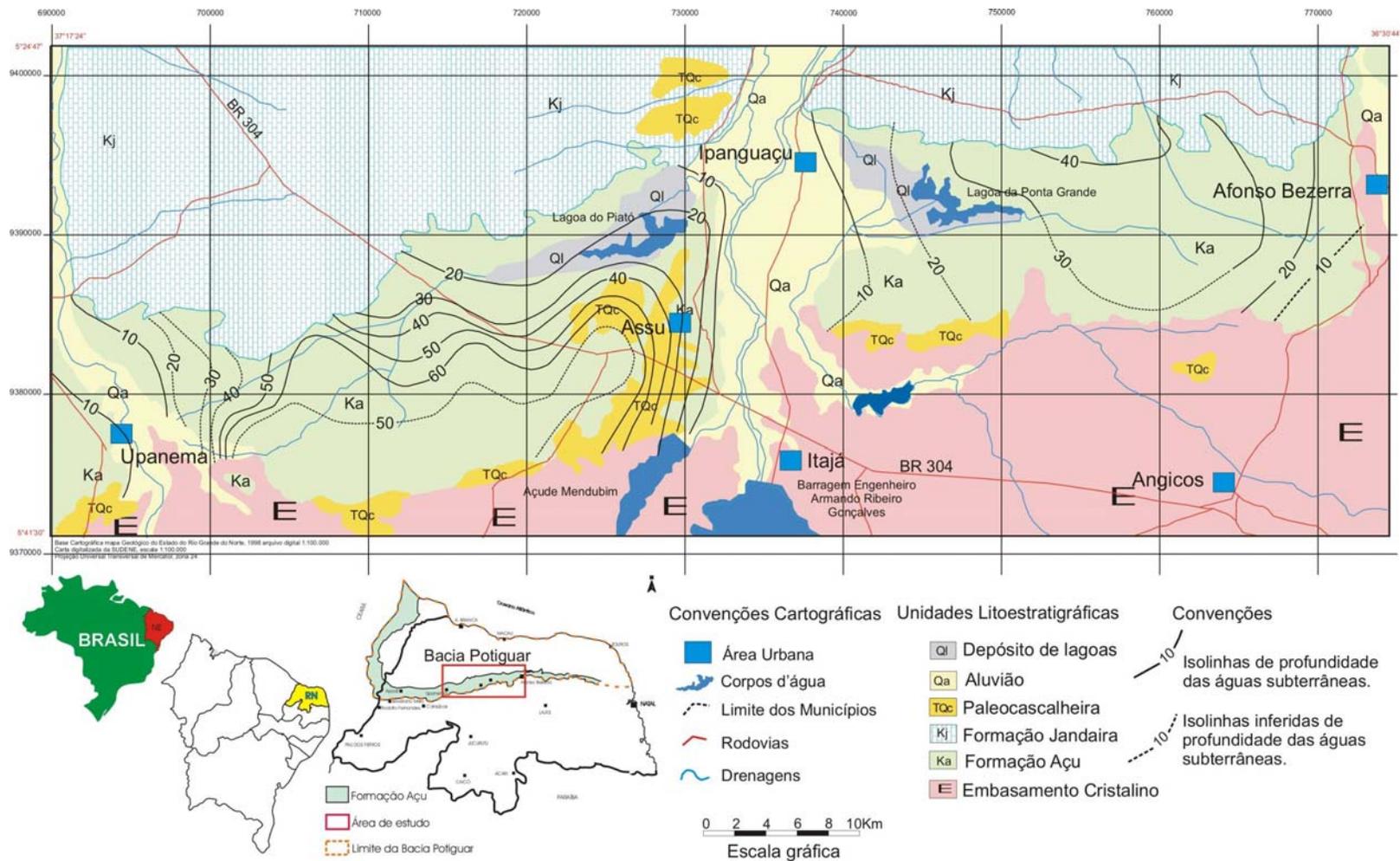


Figura 16 - Profundidade do Nível das Águas Subterrâneas (CPRM, 2001)

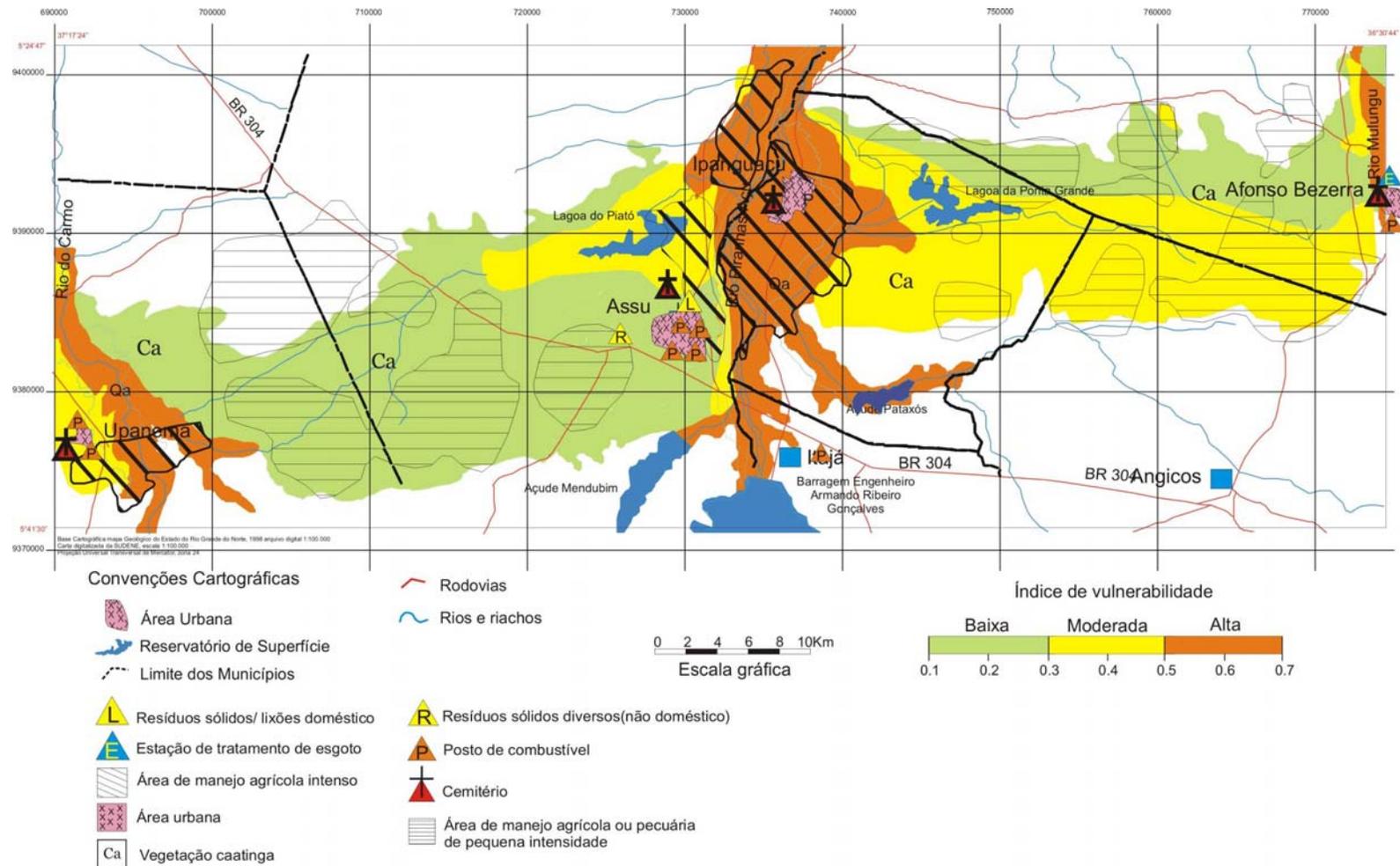


Figura 17 - Vulnerabilidade das águas subterrâneas do aquífero Açu

### 2.3 - Caracterização dos riscos de contaminação

Os riscos potenciais de contaminação das águas subterrâneas em sua conceituação básica conforme descrito anteriormente é uma função do caráter de vulnerabilidade do aquífero e da carga contaminante disposta sobre ou sob a superfície do terreno. Segundo esta concepção o aquífero pode apresentar uma alta vulnerabilidade, porém se não existe carga contaminante o risco é baixo. Também, a vulnerabilidade pode ser baixa, porém dependendo da natureza e intensidade da carga contaminante o risco pode ser elevado. Foi utilizando esses argumentos que procedeu a caracterização dos riscos potenciais de contaminação das águas subterrâneas na área de estudo (compreendida entre Afonso Bezerra e Upanema).

Na área do presente trabalho foi identificadas atividades urbanas e atividades industriais com riscos potenciais para as águas subterrâneas.

O domínio com maior risco potencial de contaminação das águas subterrâneas corresponde parte central da área, na planície aluvial do rio Açu, a qual apresenta elevada vulnerabilidade e o desenvolvimento indiscriminado de atividades urbanas e agrícolas.

As atividades urbanas estão concentradas nas cidades de Açu e Ipanguaçu, as quais apresentam o sistema de disposição local de efluentes com o uso de fossas e sumidouros além da presença de postos de combustível e cemitérios, no domínio da área da cidade e resíduos sólidos urbanos e não urbanos (depósito de saís) nas imediações da cidade de Açu. Em sua forma geral, e, em ordem decrescente de ocorrência, os contaminantes potencialmente envolvidos correspondem a nitrato, metais e hidrocarbonetos.

As atividades agrícolas correspondem ao desenvolvimento de culturas com manejo agrícola intenso, com o uso de fertilizantes e agroquímicos, com sérios riscos para as águas subterrâneas por nitrato e metais pesados.

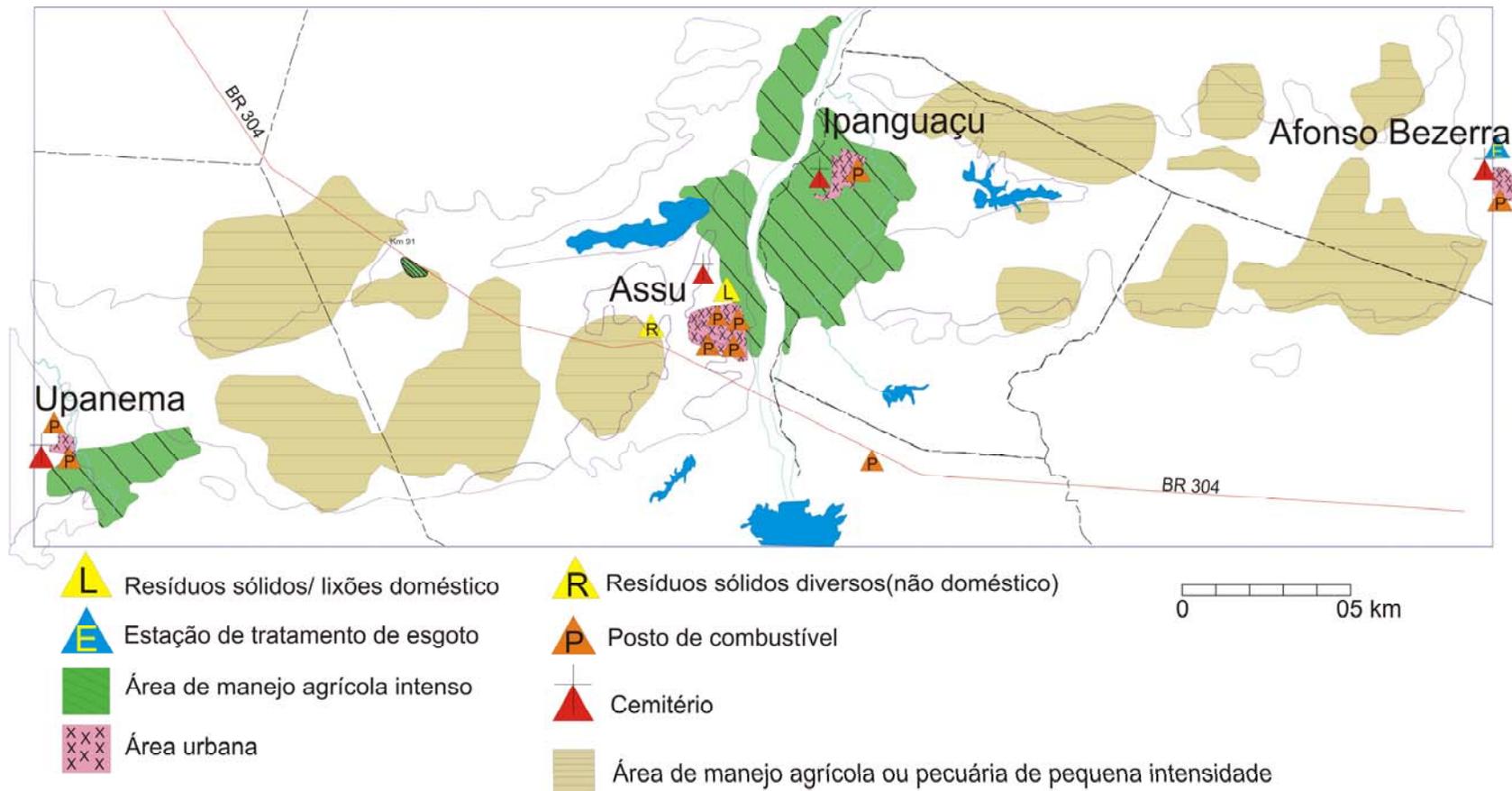
O processo de contaminação pode estar sendo retardado ou reduzido através da recarga contínua e direta do aquífero aluvial com águas da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves.

Um outro domínio com riscos potenciais moderado a elevado para as águas subterrâneas é no setor oeste da área em Upanema e a sudoeste desta cidade, porém, numa extensão bem menor e de menor intensidade, associado as atividades urbanas, com destaque para sistema de saneamento “in situ” e desenvolvimento de agricultura de manejo intenso.

Na maior parte da área ainda não se desenvolve atividades de risco para as águas subterrâneas. A condição atual compreende tão somente atividades com manejo agrícola e pecuária de pequena intensidade.

O setor Oriental da área de estudo, em sua maior parte, apresenta uma vulnerabilidade moderada, portanto é conveniente que a ocupação e o uso da terra em todo setor, seja implementada com a implementação de medidas de manejo adequadas que impeçam a geração de impactos nas águas subterrâneas.

O setor Ocidental da área, apesar de ter sido caracterizado com baixa vulnerabilidade, notadamente pela elevada profundidade das águas subterrâneas, deve ser igualmente tratado, de forma similar ao apresentado para o setor Oriental para que não haja riscos potenciais de contaminação pela ação de contaminantes de maior ação impactante.



**Figura 18 - Ocupação do solo e fontes potenciais de contaminação das águas subterrâneas**

## BIBLIOGRAFIA

- AIHS 1970. ASSOCIATION INTERNATIONALE D'HYDROLOGIE SCIENTIFIQUE – Alimentation artificielle des nappes souterraines. Inventaire international des installations existantes. Publication n° 87. 1970.
- ALMEIDA, F. F. M.; BHUSUI, Y.; BRITO NEVES, B. B. & FUCK, R. A. (1977) Província estrutural brasileira. Atlas VII. Simpósio de Geologia do Nordeste: 363 – 991.
- APOLUCENO, D. M. (1995) Faciologia e Sistemas Depositionais das Formações Açú e Jandaíra, Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, na região de Apodi, RN. Departamento de Geologia, UFRN, Natal/RN, Relatório de Graduação, 139p.
- ARARIPE, P. T. & FELJÓ, F. P. (1994) *Bacia Potiguar. Boletim Geociências PETROBRAS, Rio de Janeiro, 8 (1): p127-141.*
- ARCHANJO, C.J. & SALIM, J. (1986) *Posição da Formação Seridó no contexto estratigráfico regional (RN-PB). In: SBG, Simp. Geol. NE, 12, João Pessoa, Boletim, 270-271.*
- Back W (1960). Origin of hydrochemical facies in groundwater in the Atlantic Coastal plain. Proceedings, International Geological Congress (Copenhagen), 1:87-95.
- Back W (1966). Hydrochemical facies and groundwater flow patterns in northern part of the Atlantic Coastal plain. U. S. Geological Survey Professional Paper 498-A.
- BERTANI, R. T.; COSTA, I. G. & MATOS, R. M. D. (1990) *Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: PETROBRAS (ed.). Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro, p291-310.*
- BIZE, J.; BOURGUET, L. & LEMOINE, J. 1972.– L'alimentation artificielle des nappes souterraines. Masson. Paris.
- BOURGUET, L. 1970. Inventaire international des aménagements d'alimentation artificielle. Dépouillement et synthèse des réponses. SPEPE., rapport Burgéap R. 55-E. 151.
- Brasil – CPRM (2006). Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte, escala 1:500.000. DNPM, UFRN, PETROBRAS, CRM.
- CALMBACH, T & WATERLOO HYDROGEOLOGY, INC. – 2002 – *Aqueous Geochemical Analysis, Plotting and Modeling. AquaChem*
- CASTANY, G. (1975) *Prospección y explotación de las águas subterráneas. Barcelona: Omega, p. 738.*
- COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO RIO GRANDE DO NORTE (2000) *Relatório Técnico Captação de Upanema. CAERN/Natal.*
- CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M. R. (1983) *Hidrogeologia subterrânea. Barcelona: Omega. Tomo I e II.*
- DEMETRIO, J. G.; CORREIA, L.C. & SARAIVA, A.L. 2006. Utilização de imagens SRTM na confecção de mapas potenciométricos. XIV CONG. BRAS. DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. ABAS. Curitiba, 2006.
- DOMENICO, P. A. & SCHWARTZ, F. W. (1990) *Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley and Sons Ed., N. York. 824p.*
- DREVER, J. I. (1988) *The geochemistry of natural waters. Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall. 1988. 437p.*
- DRISCOLL, F. G. – (1986) – *Groundwater and wells. 2 ed. Minnesota: H.N. Smyth Comp. Inc., p796-820.*
- Edmunds WM (1981). *Hydrogeochemical investigations. In: Case-studies in groundwater resources evaluation. Ed by J.W. Lloyd. Clarendon Press, Oxford, pp 87-112.*

- FEITOSA, E. C. & DEMETRIO, J. G. A. 1997. *Recursos hídricos subterrâneos – Relatório Diagnóstico – vol 1. PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HIDRICOS DO RIO GRANDE DO NORTE. SERHID. HIDROSERVICE. LABHID.*
- FENZL, N. – (1988) – *Introdução a Hidrogeoquímica. Universidade Federal do Pará. Belém. 188p.*
- FETTER, C. W. – (1994) – *Applied hydrogeology. 3<sup>a</sup> ed. New Jersey: University of Wisconsin – Oshkosh.*
- Freeze RA, Cherry JA (1979) *Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 204 p*
- HEALY, R. W. & COOK, P. G. – (2002) – *Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal, 10 (1), 91-109.*
- Hussein M. T. (2004). *Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile Basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques. Hydrogeolog J 12 (2):144-158*
- HVORSLEV, M. J. – (1951) – *Time Lag and Soil Permeability in Groundwater Observations. U S Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station, Bulletin 36.*
- JARDIM DE SÁ, E. F. – (1994) – *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana. Universidade de Brasília, Brasília. Tese de Doutorado, n3, 803p.*
- LERNER, D. N. – (1997) – *Groundwater recharge. In: Geochemical Processes, Weathering and Groundwater recharge in Catchments. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 109-150.*
- LERNER, D. N.; ISSAR, A. S. & SIMMERS, I. – (1990) – *Groundwater recharge: a Guide to understanding and estimating natural recharge. International Association of Hydrogeologists, vol 8. Hannover: Heise.*
- Lloyd JW, Heathcote J.A. (1985) *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater, an introduction. Clarendon Press, Oxford,*
- LOGAN, J. – (1965) – *Interpretação de análises químicas de água. Recife: U.S. Agency for International Development. 65p.*
- Mather J. (1997). *Relationship between rock, soil and groundwater compositions. In: Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments. O.M. Saether & Caritat (eds). Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp 305-328*
- MATHER, J. – (1997) – *Colletion and analysis of groundwater samples. In: Geochemical Processes, weathering and groundwater recharge in catchments A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 167-184.*
- McNEELY, R. N., NEIMAINS, V.P., QWYER, L. – (1979) – *Water Quality Sourcebook; A guide to water quality parameters, Ottawa, Canadá. 89p*
- McDONALD, M.G. & HARBAUGH, A.W. 1988. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. USGS. TWI 6-A1.*
- MANOEL FILHO, J. 1971 – *Inventário Hidrogeológico do Nordeste – Folha Jaguaribe NE. SUDENE. DRN. DD. Hidrogeologia, 30.*
- MANOEL FILHO J. & SILVA, J. C. 1999. *Mapeamento dos aquíferos nas bacias receptoras da transposição do rio São Francisco. Avaliação hidrodinâmica e qualitativa. VBA. Min. Integ. Nacional.*
- MANOEL FILHO, J.; DEMETRIO, J. G. & COSTA, W.D. 2003. *Diagnóstico da situação atual e possibilidades de ampliação da exploração de água subterrânea na zona oeste da bacia Potiguar – RN. FADE-UFPE-LABHI*

- Medeiros, W. E; DE SÁ, EFJ. MEDEIROS V C, Lucena LRF (2001). Estrutura geológica do aquífero Açú na Borda Sul da Bacia Potiguar entre Apodi e Upanema, RN. Convênio CAERN/FUNPEC/UFRN. Relatório Técnico.
- Melo J. G., Stein, P (2003). Recursos hídricos subterrâneos da Formação Açú na Borda Sul da Bacia Potiguar, RN – Faixa Upanema-Apodi. Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN). Natal, RN, Brasil.
- Petalas CP; Diamantis IB (1999) Origin and distribution of saline groundwater in the upper Miocene aquifer system, coastal Rhodope area, Northeastern Greece. *Hydrogeology J* 7(3):305-316
- Richter BC, Kreitler BE (1993) Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization. C.K Smoley.
- Robinove CJ, Langford RH, Brookhart JW (1958) Saline water resources of North Dakota. U.S. Geological Survey Water supply Paper 1428, 72 p.
- RÖHRICH, T. & WATERLOO HYDROGEOLOGY, INC. – (2002) – Graphical Analysis and Reporting of Test & Slug Test Data. *Aquifer test*. 268p.
- SANFORD, W. – (2002) – *Recharge and groundwater models: an overview. Hydrogeology Journal*, 10 (1), 110-120.
- SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. – (2002) – *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal*, 10 (1), 18-40.
- SIMMERS, I.; HENDRICKX, J. M. H.; KRUSEMAN, G. P. & RUSHTON, K. R. – (1997) – *Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas. International Association of Hydrogeologist*, 19, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- SOUZA, S. M. – (1982) – Atualização da litoestratigrafia da bacia Potiguar. In: SBG/BA-SE, Congr. Bras. Geol., 32, Salvador, Anais p.509-592.
- SZIKSZAY, M. – (1993) – Geoquímica das águas. Universidade de São Paulo. Boletim IG-USP. Série Didática n 5. São Paulo.
- THEIS, C. V. – (1935) – The relation between the lowering of the piezometric surface and rate and duration of discharge of well using groundwater storage, *Trans. Am. Geophys. Union*, 16<sup>th</sup> Ann. Meeting, part 2.
- VASCONCELOS, E.P., LIMA NETO, F. F. & ROOS, S. – (1990) – *Unidades de correlação da Formação Açú-Bacia Potiguar. In: SBG/Núcleo Nordeste, Congresso Brasileiro de Geologia*, 36, Natal, Anais, 1:227-240.
- VRIES, J. J. & SIMMERS, I. (2002) Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10 (1), 5-17.