

ASPECTOS DA SALINIZAÇÃO DAS ÁGUAS DO AQUIFERO CRISTALINO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE, NORDESTE DO BRASIL

ASPECTS OF GROUNDWATER SALINIZATION IN CRYSTALLINE AQUIFER IN RIO GRANDE DO NORTE STATE, NORTHEAST OF BRAZIL

Ana Mônica de Britto Costa¹; José Geraldo de Melo¹ e Fernando Moreira da Silva²

Recebido em: 28/09/2005; aceito em: 25/08/2006

RESUMO Neste trabalho é feita uma avaliação do comportamento espacial e temporal de parâmetros hidroquímicos que caracterizam a salinização das águas do aquífero cristalino/RN, e uma abordagem sobre os aspectos relativos à origem e mecanismos da salinização. O estudo foi realizado a partir de um banco de dados hidroquímicos, obtido de resultados de análises físico-químicas de amostras de águas de poços da região. Os dados foram tratados por meio da aplicação de técnicas estatísticas e geo-estatísticas, especificamente da *Krigagem* dos dados. Os argumentos estatísticos confirmaram a existência de subáreas do aquífero cristalino com águas de salinidade distintas, porém com uma tendência a diminuição da salinidade das águas no sentido de leste (Agreste) para oeste (Serrana). Os resultados sugerem que os componentes do ciclo hidrológico, associados à dinâmica da atmosfera e a um relevo movimentado, criam condições diferentes em termos da hidroquímica do aquífero cristalino, cujas diferenças são intensificadas em período de situações climáticas extremas.

Palavras-chave: água subterrânea, semi-árido, salinidade, rochas cristalinas

ABSTRACT In this work is done the evaluation of the spatial and temporal behavior of the hydrochemical parameters that characterize the water salinization of the crystalline aquifer. In addition, some aspects of the origin and mechanisms of the salinization are considered. The study was carried out taking in account a hydrochemical database, resulted of physico-chemical analysis of water samples from the wells drilled in the region. The data were handled using statistics and geo-statistics techniques, specifically the *Kriging*. It was verified the occurrence of different types of water, with salinity increasing from the east to the west. The origin of these differences is a function of the hydrologic cycle, associated with the dynamic of the atmosphere and the characteristic relief of the region that is intensified in extreme climate situation.

Key words: Ground water, semi-arid, salinization, crystalline rock

INTRODUÇÃO

O Estado do Rio Grande do Norte em 60% da sua superfície é coberto por rochas cristalinas Pré-Cambrianas, as quais ocupam uma área da ordem de 30.658 km². Este domínio está inserido na região do semi-árido do nordeste brasileiro onde a irregular distribuição espacial e temporal das chuvas, associada à elevada evapotranspiração, tem caracterizado o fenômeno das secas, o que tem, historicamente, provocado inúmeros transtornos sócio-econômicos a região. O caráter de semi-aridez, associado à natureza pouco permeável dos terrenos, por sua vez condicionam a ocorrência de rios e riachos temporários e reduzidas taxas de infiltração das águas de chuva.

As águas subterrâneas ocorrem preenchendo as zonas de fraqueza das rochas (fendas e fraturas) formando um aquífero fissural que, embora seja em geral referido como de baixo potencial hidrogeológico e com problemas de salinização, tem um papel muito importante no suprimento de população rural e uso na pecuária, notadamente naqueles setores fora da área de influência de reservatórios superficiais ou barragens (COSTA, 2002).

Neste artigo são abordados os aspectos relativos à salinização das águas, descrevendo e

avaliando o comportamento de parâmetros hidroquímicos que respondem por esta salinização. A análise integrada dos resultados das avaliações hidroquímicas em associação com os fatores climáticos, geomorfológicos e geológicos, conduziram a um diagnóstico sobre a origem e mecanismos da salinização das águas do aquífero cristalino no Rio Grande do Norte.

A região das rochas cristalinas está situada na porção meridional do Estado (Figura 1) e limita-se ao norte pela Bacia Potiguar (idade cretácica), ao sul e oeste com os Estados do Ceará e Paraíba e ao leste com a bacia costeira (idade Tércio-Quaternária). Devido a grande extensão da área estudada, na condução dos estudos a mesma foi subdividida em macroregiões relativamente homogêneas: Agreste (Leste), Seridó (Centro) e Serrana (Oeste), de conformidade com suas peculiaridades fisiográficas.

Estudos já realizados na região semi-árida do Rio Grande do Norte concluíram que as águas das bacias sedimentares podem ser utilizadas nas diversas atividades sócio – econômicas, enquanto que as águas do aquífero fissural cristalino, de maneira geral, são melhor aproveitadas na manutenção da pecuária (ALBUQUERQUE, 1970).

¹Departamento de Geologia da UFRN (*anacosta55@hotmail.com*); (*jgmelo@ufrnet.br*)

²Departamento de Geografia da UFRN (*fmoreyra@ufrnet.br*)

O fator determinante da composição química das águas da região nordeste do Brasil, a qual é dominada por rochas cristalinas, é o clima, com influências locais de fatores de natureza geológica (litotipos), modo de ocorrência das águas e condições de circulação (CRUZ e MELO 1974).

Os tempos de residência das águas no aquífero cristalino do nordeste brasileiro, de acordo com resultados de estudo de isótopos ambientais, estão situados entre 10 e 100 anos (SALATI et al., 1979). Verificou-se que o solo

influi decisivamente na salinidade das águas do cristalino, tendo sido observada a relação “solo salino – água salgada”, “solo não salino – água doce / salobra” (SANTOS et al., 1984). Segundo Costa (1986), o nível de salinidade das águas subterrâneas do aquífero fissural do Estado do Rio Grande do Norte é comandada principalmente pelo clima, sendo secundariamente influenciada pelo relevo e pelas águas superficiais, tendo ainda, uma relação incipiente com os litotipos, o tipo de fratura e a profundidade do poço.

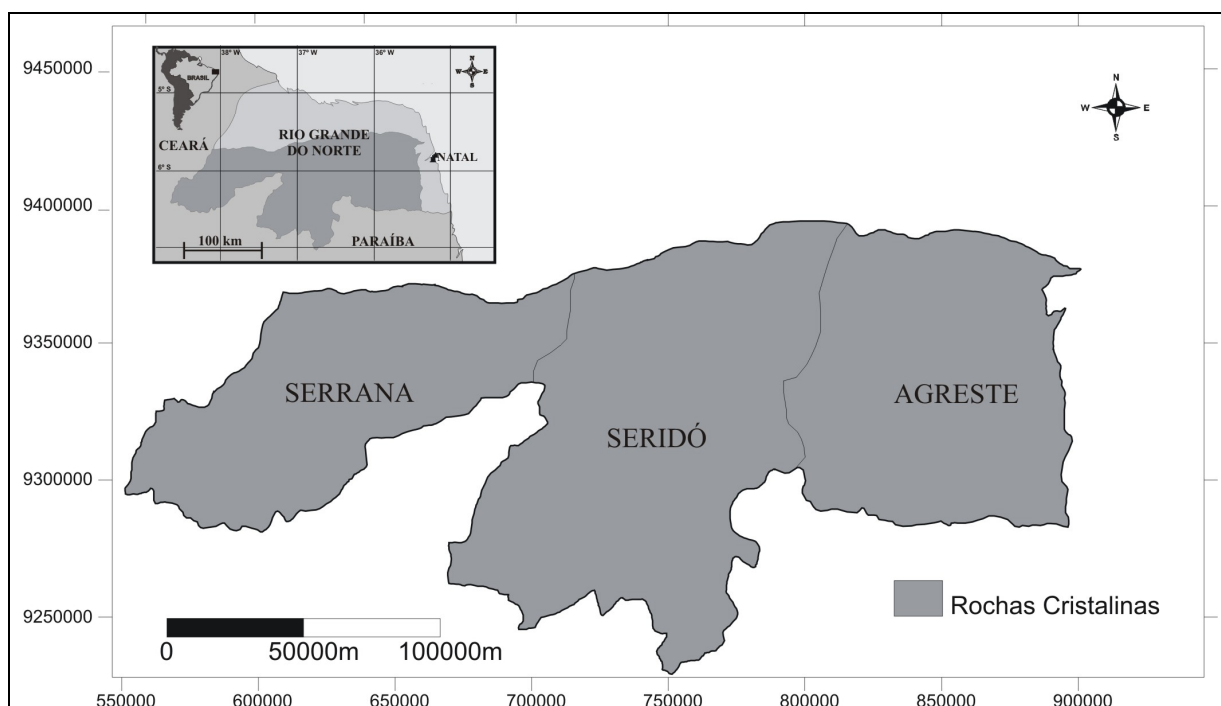


Figura 1- Localização da área estudada
Figure 1- Study area location map

ASPECTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho foi realizado tomando como base, principalmente, o banco de dados de poços da Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte (SERHID/RN), elaborado para o Plano de Recursos Hídricos do Estado, que reúne dados hidroquímicos do período 1998-2000.

Foram efetuadas avaliações e interpretações de 2.909 resultados análises químicas de água, com homogeneização dos dados para torná-los mais representativos. Um total de 673 resultados correspondeu a análises químicas completas com a determinação de todos os cátions e ânions principais, cujo balanço iônico indicou erros menores do que 6%.

Na análise estatística dos resultados adotou-se a metodologia de *Krigagem* objetivando tornar mais precisa a interpolação espacial de cada

variável. Este é um processo de estimação de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes conhecidos, sendo considerados como independentes pelo semi-variograma (LANDIM, 1998).

Foi inicialmente preparada uma base cartográfica georeferenciada utilizando o programa *ArcView*, que permitiu a elaboração dos mapas hidroquímicos. O software *Surfer* foi a principal ferramenta de interpolação de dados hidroquímicos e obtenção de curvas de isovalores de parâmetros hidroquímicos.

CONDICIONANTES CLIMÁTICOS, FISIOGRAFICOS E GEOLÓGICOS

A área de estudo está inserida na região de clima semi-árido do Estado do Rio Grande do Norte, que se caracteriza por médias pluviométricas anuais distintas em diferentes

setores do Estado. Nos setores leste (Agreste) e central do Estado (Seridó) a média anual está situada entre 650mm e 700mm/ano; a Oeste (Serrana), em torno de 800mm/ano, com ocorrências localizadas de até 1000mm/ano (reconhecidas como microclimas).

Com base na classificação de Köppen, existem três domínios climáticos: climas dos tipos BSs'h', BSw'h' e Aw. O primeiro caracteriza a área leste (Agreste) por um clima semi-árido, com estação chuvosa se adiantando para o outono; o segundo caracteriza a área central do Estado (Seridó), de clima semi-árido predominantemente, com estação chuvosa que se atrasa para o outono; o terceiro domínio compreende a porção do alto oeste do Estado (Serrana) que apresenta clima tropical chuvoso, com estação chuvosa que se atrasa para o outono (IDEC, 1975).

Na área de estudo atuam cinco sistemas sinóticos: Ondas de Leste (WE), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Linhas de Instabilidade (IT), Vórtice Ciclônico de Alta Troposfera (VCAT) e os Anticiclones Subtropicais do Atlântico (ASA); a passagem dos mesmos é acompanhada de instabilidade e chuvas, ou de estiagem e seca prolongada. Estes sistemas, interagindo com o oceano atlântico, e com o relevo bastante irregular, resulta em um macroclima de temperaturas homogêneas, mas com variações na precipitação pluviométrica (SILVA et al., 1999).

O clima semi-árido da área de estudo, com chuvas concentradas num período anual muito curto, aliado à ocorrência de solos pouco profundos sobre um substrato de rochas cristalinas pré-cambrianas propicia a ocorrência de rios e riachos intermitentes e favorecem um rápido escoamento superficial e baixas taxas de infiltração.

As unidades lito-estratigráficas que ocorrem na área de estudo (Figura 2) se referem ao Grupo Caicó, que constitui o Complexo Gnáissico-Migmatítico, formado predominantemente de ortognaisses, granodioritos, tonalitos e granitos;

Grupo Seridó que compreende a Formação Seridó (micaxistos em geral), Formação Equador (quartzitos) e Formação Jucurutu (paragnaisses); Granitóides Brasileiros de Umarizal formado por granitos e pegmatitos diversos; e coberturas terciárias sedimentares.

A infiltração ocorre essencialmente nas zonas de fraqueza das rochas (fendas e fissuras), podendo as taxas de infiltração serem mais elevadas sob os domínios das planícies aluviais e/ou solos com cobertura vegetal.

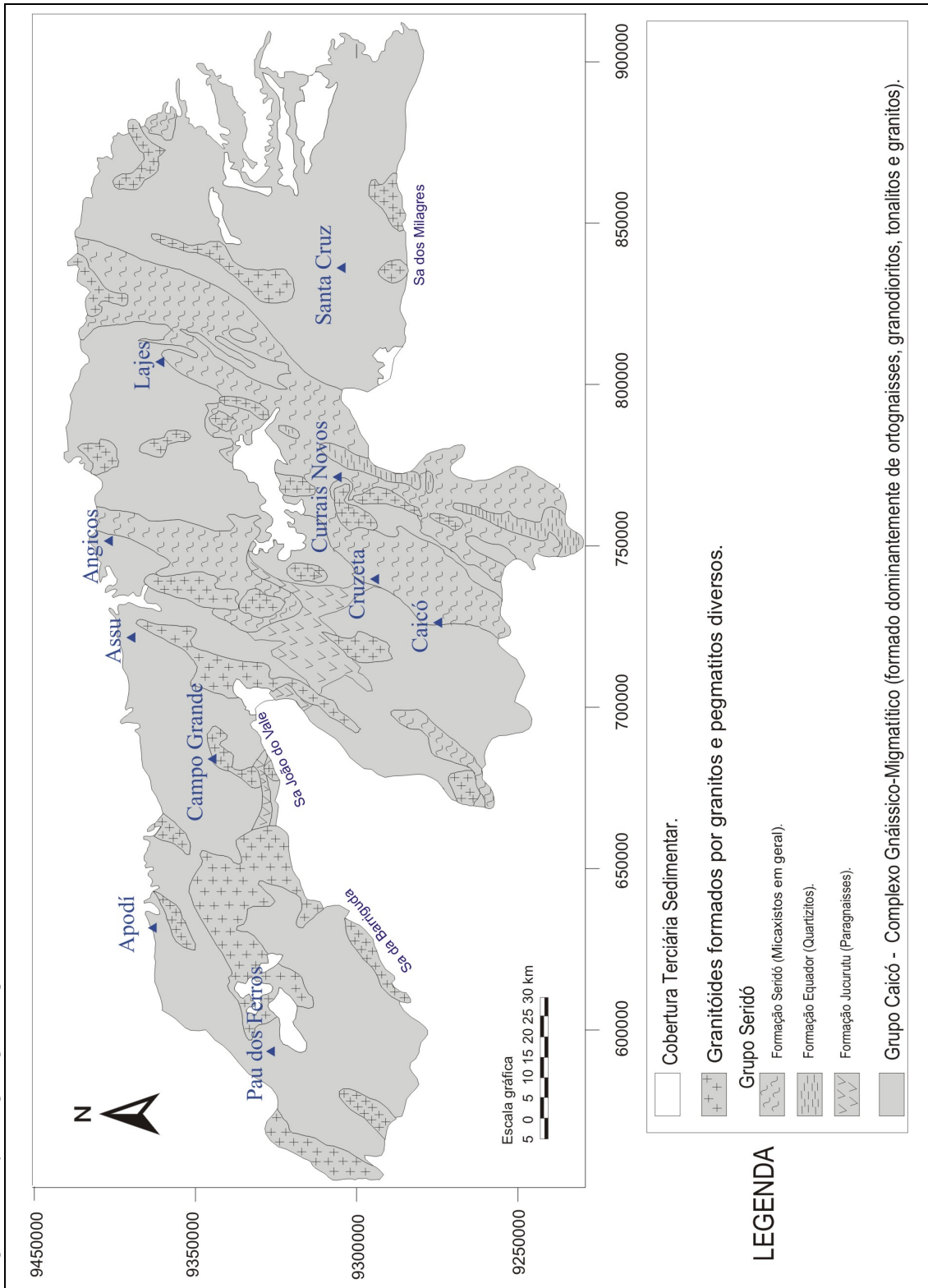
AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA E COMPORTAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE PARÂMETROS HIDROQUÍMICOS

Nesta avaliação são considerados os resultados das análises químicas das amostras selecionadas, que incluem condutividade elétrica, pH e sólidos totais dissolvidos, além dos cátions sódio, cálcio, magnésio e os ânions cloreto, sulfato e bicarbonato. Inicialmente os resultados foram submetidos a um tratamento estatístico simplificado (Tabelas 1 a 4) e, em seguida, o comportamento espacial dos parâmetros envolvidos foram avaliados com base nos mapas de isovalores dos respectivos parâmetros (Figuras 3 a 6).

Condutividade elétrica (CE)

A condutividade elétrica é o parâmetro que melhor expressa a salinidade das águas. Quanto maior a salinidade de uma água, mais esta água conduz a corrente elétrica. A condutividade elétrica de uma água varia com a temperatura e assim sendo, a mesma é geralmente ajustada a temperatura de 25 °C. A condutividade elétrica das águas das rochas cristalinas no seu contexto geral varia de 28,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 24320,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com um valor médio de 4359,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e um valor modal de 3952 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabela 1). Os resultados do tratamento estatístico mostraram, ainda, que apenas 28,3% das águas possuem condutividade elétrica inferior ou igual a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Figura 2- Mapa geológico da área estudada
Figure 2- Study area geological map



(Fonte: DNPM, 1998, simplificado pelos autores)

Tabela 1- Tratamento estatístico dos dados químicos das águas subterrâneas da região cristalina/RN
 Table 1- Univariate statistics on groundwater chemical data from the crystalline region/RN

Parâmetros	CE ($\mu\text{S/cm}$)	STD (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	pH
Média	4.359,7	3.291,8	653,5	191,7	223,3	1.741,7	108,1	359	7,2
Moda	3.952	470	200	29	24	81	14	448	7
Desvio Padrão	4.489,5	3.655,2	683,6	225,6	283,2	2.075,3	166,5	168,1	0,74
Coefficiente de Variação	103%	111%	105%	118%	127%	119%	154%	47%	10%
Mínimo	28,5	19	6	1,88	1	3	1	1,92	4,8
Máximo	24.320	36.695,2	6.183	1.528	1.971	14.717	1.523	897	9
Contagem	692	1.769	1.205	784	1.287	1.286	1.273	764	804

A figura 3 apresenta a distribuição espacial da condutividade elétrica. Os maiores valores de condutividade elétrica estão situados na zona Agreste, cuja média é da ordem de 6527,8 $\mu\text{S/cm}$ (Tabela 2), com valores que vão de 28,5 $\mu\text{S/cm}$ a 24320,0 $\mu\text{S/cm}$ (este é o valor máximo de condutividade elétrica encontrado nas rochas cristalinas). O valor modal é da ordem de 10640,0 $\mu\text{S/cm}$ e maior que a média aritmética. Portanto, na zona Agreste a condutividade

elétrica registrada, é bem mais elevada em termos médios do que o obtido para a região cristalina como um todo (4359,7 $\mu\text{S/cm}$).

A zona Seridó apresenta águas com uma condutividade elétrica média de 3004,2 $\mu\text{S/cm}$, com um mínimo de 60,0 $\mu\text{S/cm}$ e um máximo de 20368,0 $\mu\text{S/cm}$ e valor modal de 972,8 $\mu\text{S/cm}$. Portanto, a média da condutividade elétrica obtida é bem inferior àquela obtida para a zona Agreste (6527,8 $\mu\text{S/cm}$, Tabela 3).

Tabela 2- Tratamento estatístico dos dados químicos das águas subterrâneas da zona Agreste da região cristalina/RN

Table 2- Univariate statistics on groundwater chemical data from the Agreste zone of crystalline region/RN

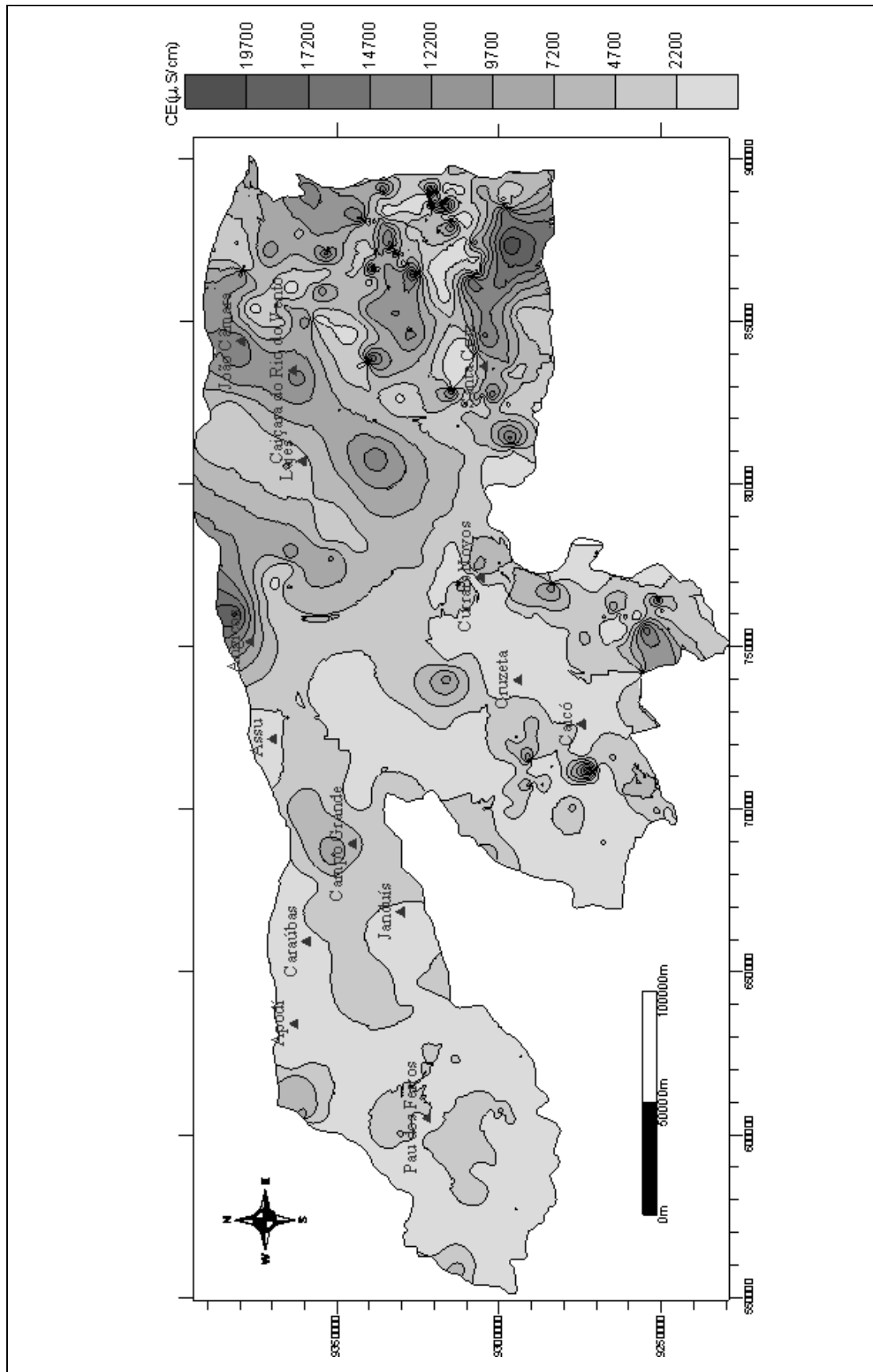
Parâmetros	CE ($\mu\text{S/cm}$)	STD (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	pH
Média	6.527,8	4.821,8	921,1	259,7	335,7	2.560	138,6	328,2	7
Moda	10640	548	500	4	59	306	14	497	7
Desvio Padrão	5.123,5	4348	752,6	272,3	332,6	2324,8	180,7	181,3	0,8
Coefficiente de Variação	78%	90%	63%	105%	99%	91%	130%	55%	11%
Mínimo	28,5	128	14	4	1	11	1	1,92	5
Máximo	24.320	30.018	6.183	1.528	1.971	14.717	1.186	810	9
Contagem	310	737	620	360	681	684	673	353	365

Tabela 3- Tratamento estatístico dos dados químicos das águas subterrâneas da zona Seridó da região cristalina/RN

Table 3- Univariate statistics on groundwater chemical data from the Seridó zone of crystalline region/RN

Parâmetros	CE ($\mu\text{S/cm}$)	STD (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	pH
Média	3.004,2	2.633,8	458,9	143,9	116,8	995,3	89,5	406,7	7,2
Moda	972,8	400	200	67	24	89	20	371	7
Desvio Padrão	3.343,7	3.178,6	531,4	176,5	150,3	1421,5	145,1	154,8	0,7
Coefficiente de Variação	111%	121%	116%	123%	129%	143%	162%	38%	9,20%
Mínimo	60	222	6	1,88	1	3	1	8	4,8
Máximo	20.368	36.695,2	3.636	1.046	938	8.727	1.398	897	8,7
Contagem	246	482	347	270	361	360	360	258	275

Figura 3- Mapa de iso-conductividade (CE) das águas subterrâneas do cristalino/RN
Figure 3- Groundwater isoconductivity map from the crystalline region/RN



As águas da zona Serrana apresentam a menor condutividade elétrica, com média de 1869,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e moda de 1208,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O valor mínimo registrado para esta zona foi de 63,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e o máximo, de 10488,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabela 4).

Tabela 4- Tratamento estatístico dos dados químicos das águas subterrâneas da zona Serrana da região cristalina/RN

Table 4- Univariate statistics on groundwater chemical data from the Serrana zone of crystalline region/RN

Parâmetros	Cond ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	STD (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	S ₀ ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	pH
Média	1.869,7	1.818,3	240,2	117,2	67,8	539,1	50,6	349,5	7,3
Moda	1.208,4	705	78	111	35	81	16	379	8
Desvio padrão	1.550,9	1.769,3	260,5	104,7	68,4	672,1	133,1	138,1	0,7
Coefficiente de Variação	83%	97%	108%	89%	101%	125%	263%	39%	9,6%
Mínimo	63,6	19	14	3	1	7	1	15	5
Máximo	10.488	16.162	2.803	795	564	6.129	1.523	857	8,5
Contagem	136	550	238	154	245	242	240	153	164

Sólidos Totais Dissolvidos (STD)

Os sólidos totais dissolvidos correspondem ao somatório de todos os cátions e ânions presentes nas águas e expressa de forma absoluta o grau de salinidade das águas, apresentando boa correlação com a condutividade elétrica. Assim sendo, o comportamento observado para os sólidos totais dissolvidos é similar àquele observado para a condutividade elétrica das águas.

No contexto geral da região das rochas cristalinas, os sólidos totais dissolvidos variaram de 19,0 mg/l a 36.695,0 mg/l (Tabela 1), com uma média de 3291,8 mg/l, cujo coeficiente de variação atingiu 111%, considerando um universo de 1769 pontos amostrados, o que demonstra a natureza irregular desta variável. Somente 27,4% das águas dos poços possuem valores iguais ou inferiores a 1000 mg/l; os 72,6% restantes são superiores a este valor, atestando a alto nível de salinização das águas do aquífero cristalino. A figura 3 mostra uma mudança gradual da salinidade das águas do cristalino de leste (maior salinidade) para oeste (menor salinidade), ou seja, da zona Agreste para a Serrana.

O desvio padrão (3655,2 mg/l) e o coeficiente de variação de (111%) constata a alta dispersão em torno da média, demonstrando, assim, a complexidade e heterogeneidade no comportamento dos sólidos totais dissolvidos das águas da região das rochas cristalinas no seu conjunto. Isto sugere diferentes condições de recarga, armazenamento e da dinâmica do fluxo subterrâneo do meio fissural. Essa grande variabilidade estatística atesta a necessidade de se estabelecer um zoneamento hidroquímico por região, com possíveis influências das características fisiográficas e climáticas de cada contexto.

De conformidade com os resultados apresentados, as águas, de um modo geral, são de salinidade elevada a muito elevada e esta característica constitui o fator limitante ao seu uso. Analisando o comportamento dos sólidos totais dissolvidos em cada uma das zonas referidas, fazem-se as seguintes observações:

O valor médio dos sólidos totais dissolvidos obtido na zona Agreste foi de 4821,8 mg/l, variando de 128,0 mg/l a 30018,0 mg/l (Tabela 2), correspondente a um coeficiente de variação de 90%. Apenas 12,1% dos poços apresentaram sólidos totais dissolvidos inferior ou igual a 1000 mg/l. Portanto, a zona Agreste é a que concentra maior número de poços (647,8) com águas de salinidade mais elevada.

Na zona Seridó, os sólidos totais dissolvidos são estatisticamente menores que os valores encontrados na zona Agreste, embora a média de 2633,8 mg/l seja também bastante elevada. O coeficiente de variação dos sólidos totais dissolvidos na zona Agreste foi o mais elevado (121%) das três zonas, demonstrando que a variação da salinidade das águas nesta zona é muito grande e atestando, mais uma vez, o caráter anisotrópico do aquífero cristalino. Este caráter com relação a salinidade das águas pode ser visualizado no mapa de isovalores de sólidos totais dissolvidos (Figura 4).

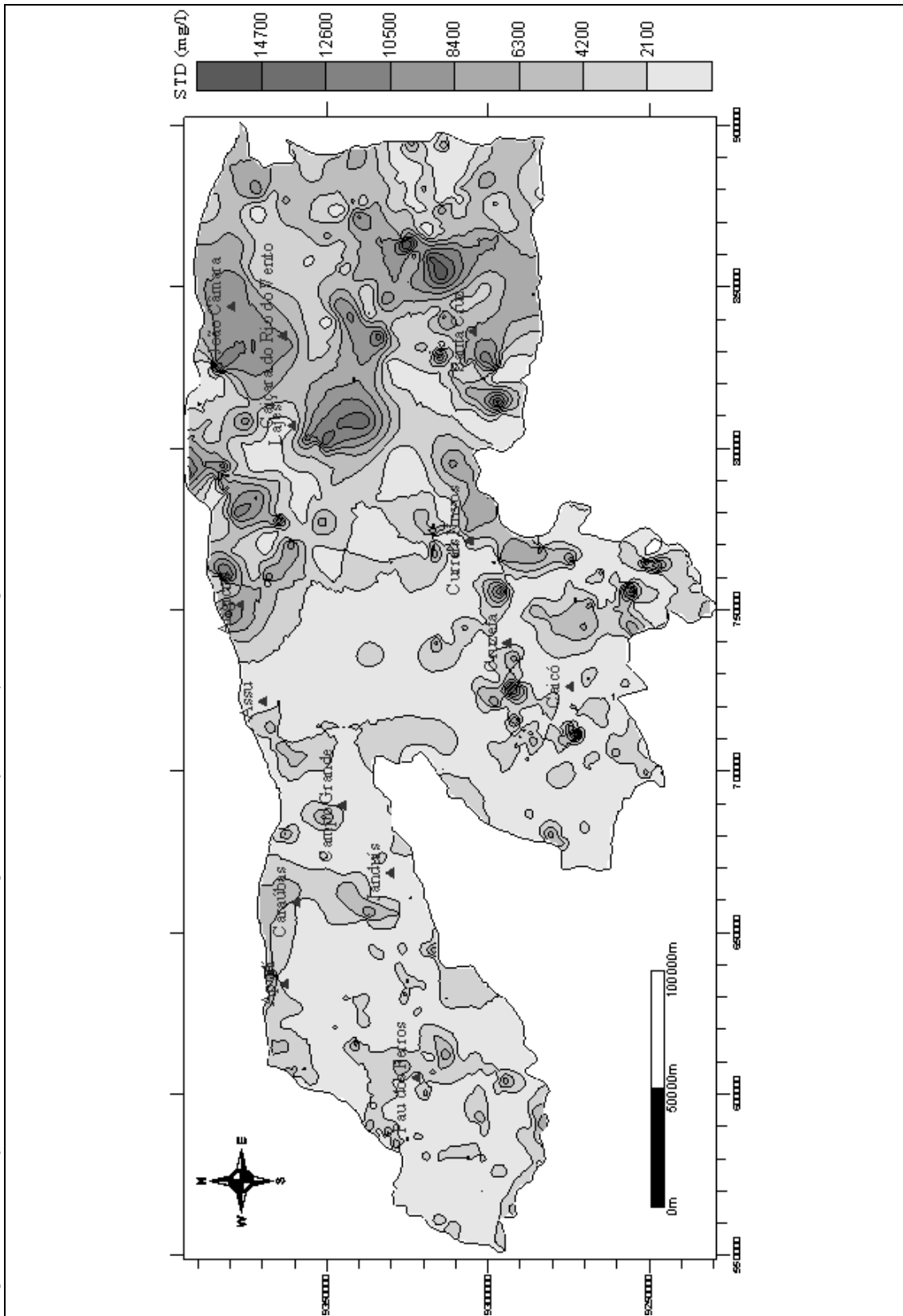
Com relação a zona Serrana, os sólidos totais dissolvidos variaram de 19,0 mg/l a 16162,0 mg/l, com uma média de 1818,3 mg/l e valor modal de 705,0 mg/l. O coeficiente de variação neste caso atingiu 97%. Esses resultados evidenciam os níveis de salinização mais baixos nas águas dos poços da zona Serrana, as quais são classificadas como doces.

pH

O pH das águas do aquífero cristalino variou de 4,8 a 9, com média de 7,2, sugerindo uma certa tendência, no contexto geral, a águas ligeiramente básicas. Com efeito, 81,8% das amostras consideradas apresentaram valores

entre 6 e 8, com a predominância de águas com pH entre 7 e 8. Tomando por base os valores médios de pH obtidos por zonas, verifica-se que na zona Agreste o pH é neutro (7) e nas zonas Seridó e Serrana, o pH é ligeiramente básico, de 7,2 e 7,3, respectivamente.

Figura 4- Mapa de isoteor de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) das águas subterrâneas do cristalino/RN
 Figure 4- Isolines of Total dissolved solids content in groundwater from the crystalline region/RN



Sódio

As águas das rochas cristalinas revelaram um teor de sódio variando de 6,0 mg/l a 6183,0 mg/l, com média de 653,5 mg/l e coeficiente de variação de 105%. A maioria dos poços (75%) apresentou águas com concentração de sódio superior a 200 mg/l. No mapa da figura 5 pode ser observado que as águas com maiores teores de sódio ocorrem no setor leste da área estudada, mais especificamente na zona Agreste, onde a média de sódio atinge 921,1 mg/l, e, portanto, é onde se encontram as águas mais salinas. As águas na zona Seridó (central) apresentam teor médio de sódio bem inferior, da ordem de 458,9 mg/l e na zona Serrana (oeste) as concentrações de sódio são ainda bem mais baixas, da ordem de 240,2 mg/l.

Cálcio

Regionalmente, o teor de cálcio nas águas das rochas cristalinas variou de 1,88 mg/l a 1528,0 mg/l, com média de 191,7 mg/l. O coeficiente de variação atingiu 118%. De acordo com os resultados da amostragem considerada, 69,2% dos poços possuem águas com teor de cálcio inferior ou igual a 200 mg/l, ou seja, são águas com teor de cálcio não muito elevado. Em termos de distribuição espacial, verifica-se com certa frequência áreas localizadas com concentração de cálcio distintamente mais elevado, notadamente na zona Agreste.

A concentração média de cálcio obtida para a zona Agreste foi de 259,7 mg/l, com um valor mínimo de 4,0 mg/l e máximo, de 1528,0 mg/l (correspondente ao valor máximo obtido para toda a região do cristalino).

Na zona Seridó, a concentração de cálcio em termos médios é de 143,9 mg/l, portanto bastante inferior ao valor obtido para a zona Agreste. O valor mínimo de cálcio registrado na zona Seridó foi de 1,88 mg/l e máximo de 1046,0 mg/l. A zona Serrana é a que apresenta águas com teores de cálcio mais baixo, com média de 117,2 mg/l, chegando a variar de 3,0 mg/l a 795,0 mg/l.

Magnésio

A concentração de magnésio nas águas das rochas cristalinas varia de 1,0 mg/l a 1971,0 mg/l, com um valor médio de 223,3 mg/l. O coeficiente de variação é da ordem de 127%. As águas, na sua maioria (66%), apresentam teor de magnésio inferior a 200,0 mg/l, ou seja, são águas com teores moderados de magnésio. A distribuição espacial do magnésio apresenta um comportamento similar ao observado para o cálcio.

Os teores mais elevados de magnésio ocorrem na região Agreste. Verifica-se a ocorrência de núcleos de concentrações de magnésio mais elevados dispersos nas demais zonas. Há uma diminuição nas concentrações médias do íon magnésio no sentido de leste para oeste conforme indicado a seguir: zona Agreste – 337,5 mg/l; zona Seridó- 116,8 mg/l e zona Serrana- 67,8 mg/l.

Cloreto

No contexto geral, o cloreto apresenta-se bastante elevado, com uma média de 1741,7 mg/l. Há, entretanto uma variação de 3,0 mg/l a 14.714,0 mg/l. Cerca de 78,2% das análises indicaram uma concentração de cloreto superior a 250,0 mg/l, o que permite caracterizar em geral as águas como impróprias para o consumo humano. Esses resultados atestam o elevado nível de salinização das águas subterrâneas do aquífero cristalino.

De acordo com o mapa de isotores de cloreto (Figura 6), constata-se que toda a região do aquífero cristalino apresenta elevado teor de cloreto, contudo, chama-se atenção para os núcleos de concentração distintamente mais elevados, principalmente, na zona Agreste e ao sul da zona Seridó. Na zona Serrana, tal como verificado nas demais zonas, o cloreto é o ânion dominante, porém o teor médio de cloreto nas águas da zona Serrana (539,1 mg/l) é inferior a zona Seridó (995,3 mg/l) e muito menor que o valor médio correspondente a zona Agreste (2560,0 mg/l).

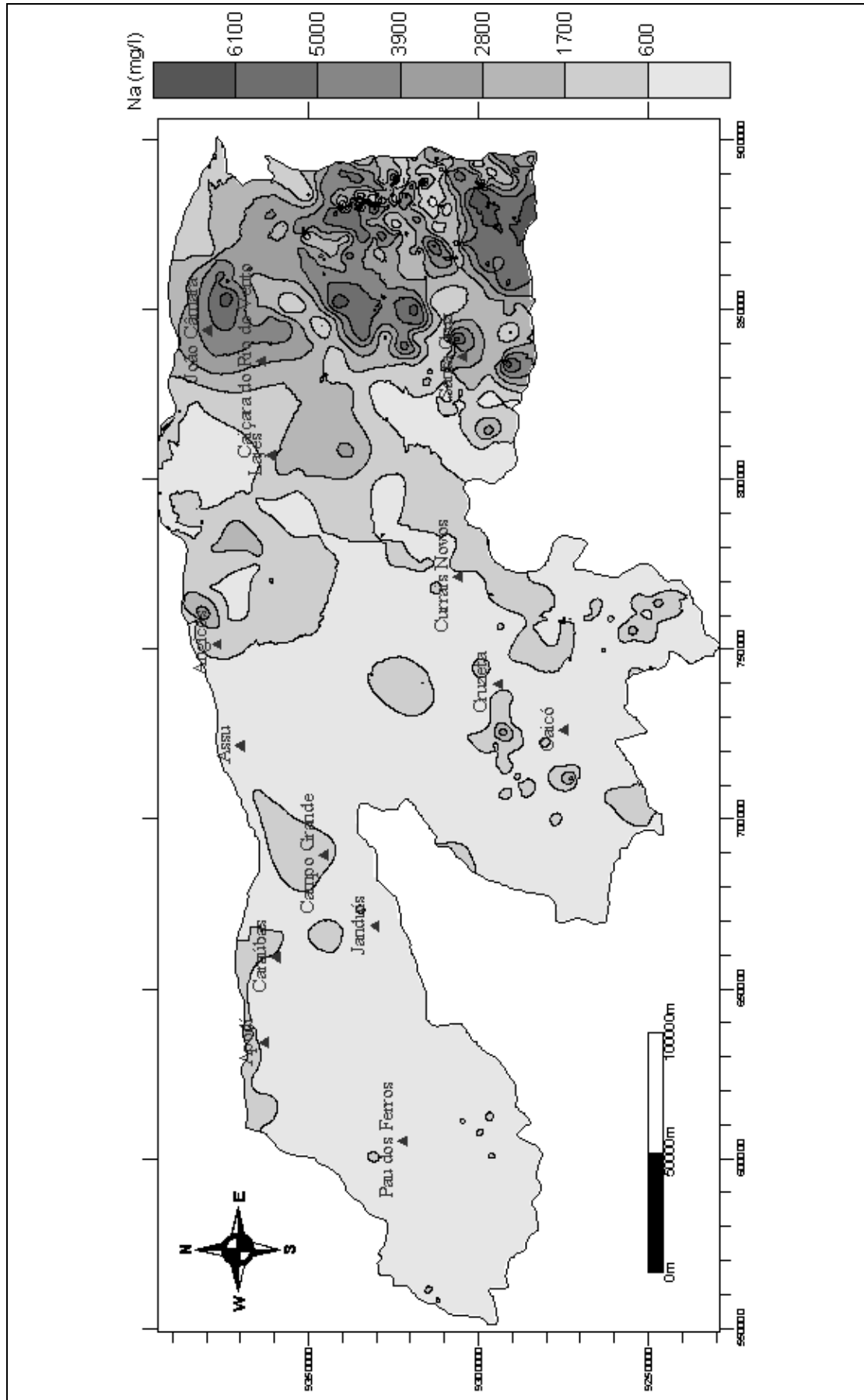
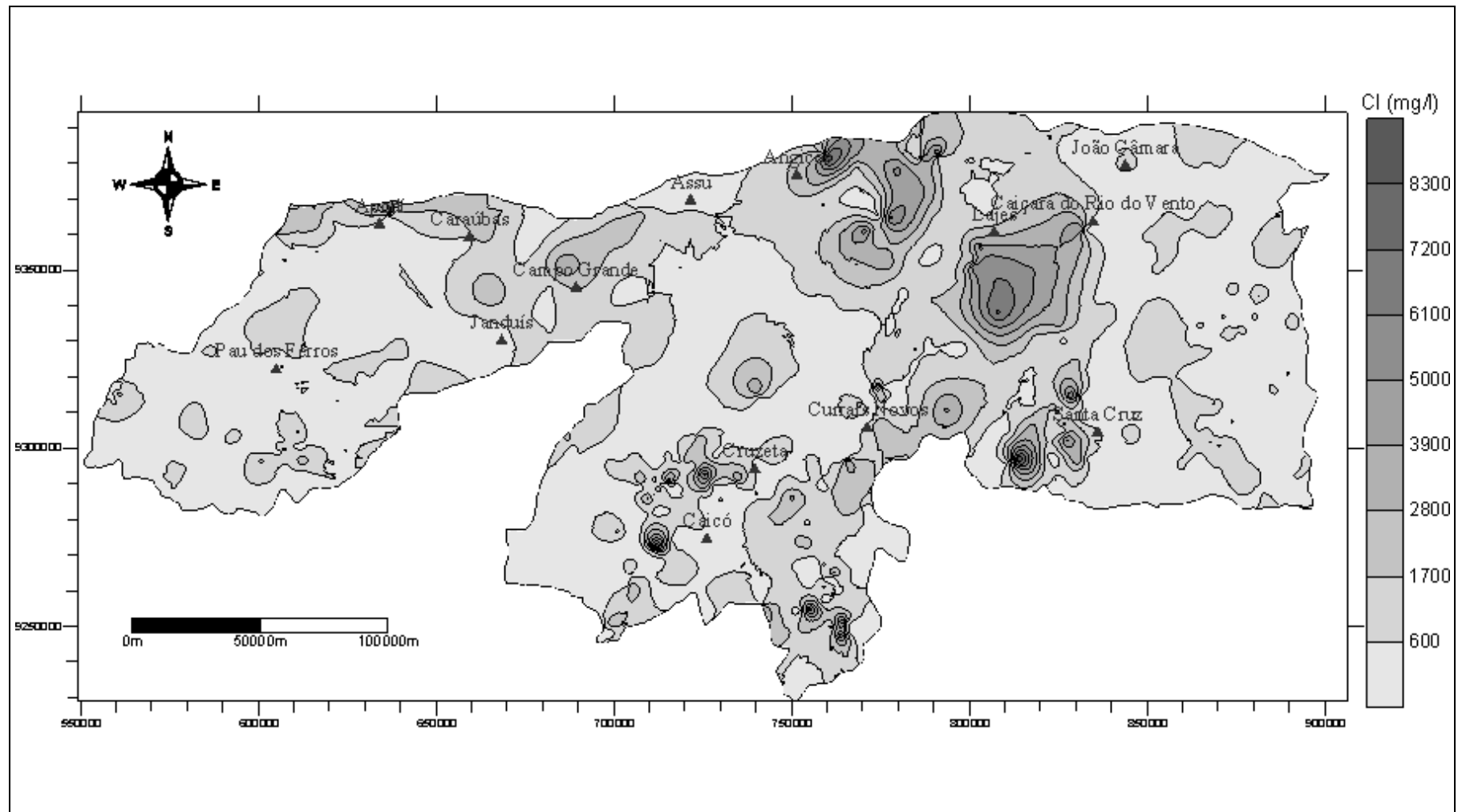


Figura 5- Mapa de isoteor de sódio (Na) das águas subterrâneas do cristalino/RN
Figure 5- Isolines of sodium content in groundwater from the crystalline region/RN

Figura 6- Mapa de isoteor de cloreto (Na) das águas subterrâneas do cristalino/RN
Figure 6- Isolines of chloride content in groundwater from the crystalline region/RN



Sulfato

As concentrações de sulfato nas águas das rochas cristalinas apresentam valores que variam de 1,0 mg/l a 1523,0 mg/l, com uma média de 108,1 mg/l. O coeficiente de variação é da ordem de 154%. De acordo com os resultados, verificou-se que 85,2% das amostras apresentaram teor de sulfato inferior ou igual a 200 mg/l.

Considerando um limite de 400,0 mg/l de sulfato, verifica-se que 94,1% estão abaixo deste valor, ficando apenas 5,9% das amostras com teor de sulfato muito elevado. As elevadas concentrações de sulfato nas águas ocorrem na zona Agreste (média de 138,6 mg/l). Nas zonas Seridó e Serrana as concentrações de sulfato em média são bem menores, ou seja, 89,5 mg/l e 50,6 mg/l, respectivamente.

Bicarbonato

As águas do aquífero apresentam em média um valor de 359,0 mg/l, com teor mínimo de 1,92 mg/l e máximo de 897,0 mg/l. Este parâmetro apresentou um menor coeficiente de variação (47%).

Os resultados mostram que 80,2% das análises apresentam concentração de bicarbonato superior a 200,0 mg/l. Este parâmetro apresenta concentrações mais elevadas nas zonas Seridó (média de 406,7 mg/l) e Serrana (média de 349,5 mg/l) e menores concentrações na zona Agreste (média de 328,2 mg/l).

Percebe-se, entretanto que essas diferenças não são muito acentuadas. Com base nas considerações apresentadas, verifica-se que a salinização das águas do aquífero cristalino é, em geral, mais elevada na zona Agreste e mais baixa na zona Serrana.

ASPECTOS RELATIVOS A ORIGEM E MECANISMOS DE SALINIZAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Com o objetivo de avaliar o comportamento de cátions e ânions à medida que a salinidade das águas subterrâneas do aquífero aumenta, foram construídos gráficos da correlação da condutividade elétrica das águas com os correspondentes íons maiores (Figura 7)

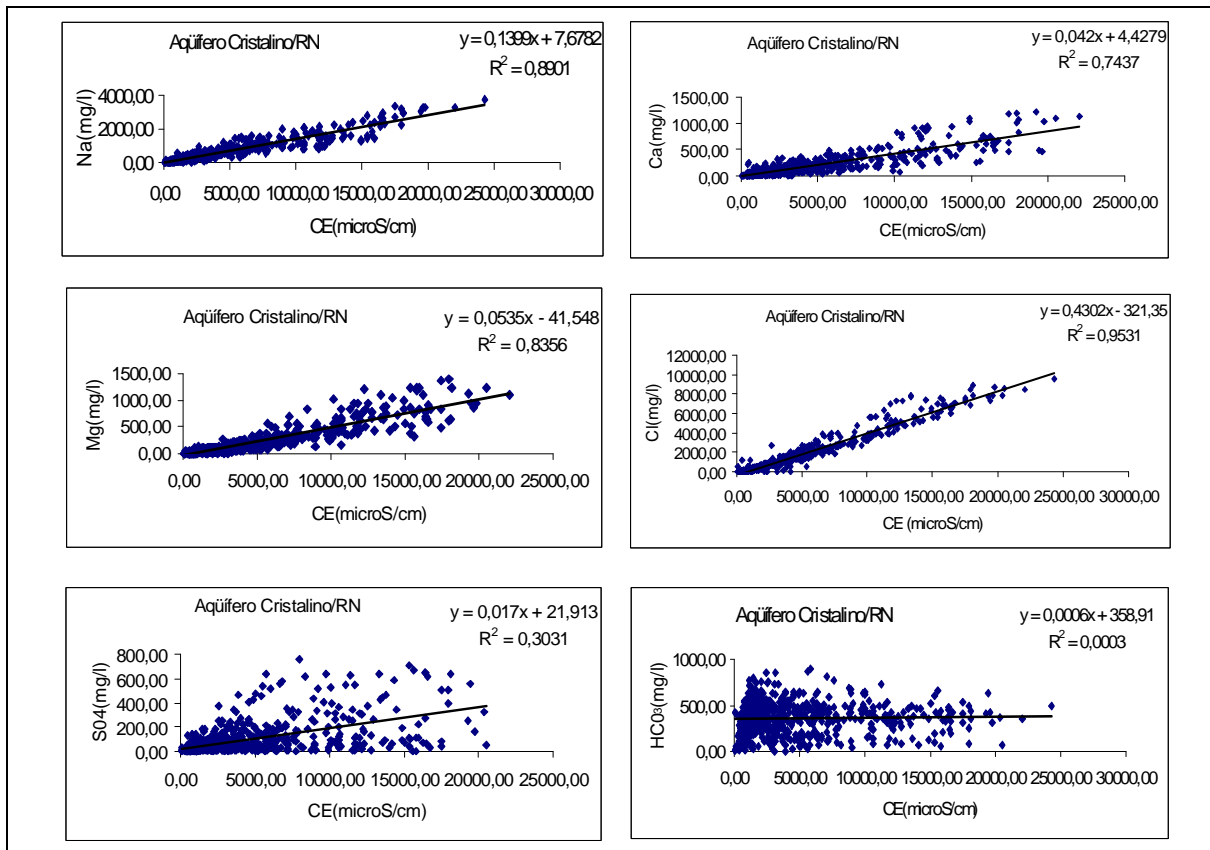


Figura 7- Diagrama de dispersão, regressão e coeficiente de explicação (R²) entre a condutividade elétrica (CE) e sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio(Mg), cloreto (Cl), sulfato (SO₄) e bicarbonato (HCO₃) das águas subterrâneas do cristalino/RN

Figure 7- Scatter plot, regression line, and determination coefficient (r²) of electrical conductivity versus sodium, calcium, magnesium, sulfate, bicarbonate contents in groundwater from the crystalline region/RN

Os gráficos demonstram uma boa correlação positiva entre a condutividade e os íons sódio (89%), cálcio (74%), magnésio (83%) e cloreto (95%), e uma fraca correlação positiva entre a condutividade e o sulfato (30%), e nenhuma correlação com o bicarbonato (0%). Fica assim caracterizado que a salinidade das águas cresce proporcionalmente à medida que aumenta a concentração dos íons sódio, cálcio, magnésio e cloreto. Portanto, a salinidade das águas do aquífero cristalino não está associada às variações nas concentrações do bicarbonato, podendo algumas vezes ser influenciada pelo sulfato associado aos outros íons (Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}).

A ausência de correlação da condutividade elétrica com o bicarbonato permite associar a salinidade das águas à hipótese da influência de fatores climáticos, pois é sabido que o bicarbonato é oriundo principalmente de relações intempéricas das rochas. A elevada correlação da condutividade com o cloreto pode indicar que o alto teor de salinidade das águas do cristalino não está relacionado ao processo de decomposição / intemperismo químico das rochas cristalinas, visto que o cloreto não é hidromórfico e que segundo Falcão (1980), tais rochas não estão aptas a liberar, por simples decomposição, elevados teores do íon cloreto.

A salinidade das águas nas diferentes zonas consideradas não parece ser influenciada pela geologia, já que nos diferentes domínios ocorrem praticamente os mesmos tipos litológicos (Figura 2).

Este comportamento observado da salinidade das águas das rochas cristalinas do Rio Grande do Norte é característico de regiões semi-áridas. De acordo com Silva (1984), na maioria das vezes as águas em rochas cristalinas em regiões úmidas apresentam o bicarbonato como íon dominante. Os ânions cloreto e sulfato ocorrem em pequenas quantidades. Conforme Brown et al. (2000), as rochas ígneas e metamórficas geralmente possuem menor concentração de sólidos totais dissolvidos nas águas do que as rochas sedimentares, porque elas contêm minerais que, no geral, são menos solúveis.

Comumente as substâncias mais abundantes nas águas subterrâneas em rochas ígneas e metamórficas são: bicarbonato (HCO_3^-), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e sílica (SiO_2), que estão relacionadas ao intemperismo e dissolução das rochas carbonáticas, ferromagnesianas e silicáticas. Em estudo de caso na bacia do rio

Piracicaba em São Paulo.

Rocha (2000) encontrou águas com baixa concentração de sais em aquífero cristalino, caracterizadas como bicarbonatadas sódicas, apresentando valores de sólidos totais dissolvidos abaixo de 200mg/l. Porém, o clima neste domínio é úmido e as precipitações são elevadas.

As águas em rochas cristalinas de região semi-árida em outras partes do mundo, a exemplos dos resultados obtidos por Plote (1968, apud CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983) no Saara, onde se registrou poços com águas com 3500 a 20000 mg/l de resíduo seco, apresentam as mesmas características encontradas no semi-árido do Brasil. Neste sentido, considera-se que o mecanismo de salinização dessas águas estejam associados à influência das condições climáticas, visto que, provavelmente, se fosse somente devido a dissolução e intemperismo das rochas, essas águas seriam principalmente bicarbonatadas e/ou magnesianas.

Em função destas hipóteses, Costa et al. (2002) realizaram uma investigação a fim de analisar o comportamento dos sólidos totais dissolvidos em situações climáticas extremas, com base em eventos distribuídos segundo critérios temporais e espaciais, e de acordo com a distribuição normal reduzida. Constatou-se que os teores de sólidos totais dissolvidos são afetados espacialmente pelos eventos climáticos extremos (seca e chuva).

Na zona Agreste, as chuvas são causadas principalmente pela atuação das Ondas de Leste (SILVA et al., 1999), que estão carregadas de núcleos higroscópicos marinhos, ricos em sódio e cloreto, quando submetidos aos ventos do quadrante leste (alísios) que proporcionam o transporte de massa; isto, provavelmente, contribui para que as águas cheguem mais salinizadas neste domínio e, por conseguinte, no aquífero. Aliando-se estes fatores ao relevo (Planalto da Borborema), que em média apresenta condições adequadas para formação de uma circulação local tipo sotavento, com inversão térmica na baixa troposfera, o que dificulta a formação de nuvens e, conseqüentemente, propicia a formação de um núcleo com déficit hídrico máximo, ou seja, locais que apresentam baixa precipitação e elevada evapotranspiração. Desta forma, essa área apresenta um núcleo com forte concentração de sais (Figura 4) nas águas, delimitado geograficamente entre os municípios de Lajes e Caiçara do Rio dos Ventos.

Pode-se, também, atribuir o aumento da salinidade das águas da zona Agreste aos terrenos de relevos planos e pouco movimentados da Depressão Sertaneja, pois, segundo CUSTÓDIO; LLAMAS (1983), áreas de planícies, regionais ou locais, pouco profundas, propiciam a pouca mobilidade das águas devido às condições de baixa energia potencial do terreno, permanecendo por muito tempo no mesmo local e submetidas a evaporação, favorecendo o aumento da salinidade.

Compreende-se, portanto, que a presença dos núcleos higroscópicos trazidos pelas Ondas de Leste para zona Agreste são apenas condicionantes para a salinidade das águas do aquífero, cujo desenvolvimento depende, principalmente, da alta evapotranspiração e a baixa precipitação na região, que são intensificados ainda mais em locais onde ocorre a interferência do relevo (área de sotavento) que se verifica no setor ocidental na zona Agreste. De fato, o litoral leste do Estado também sofre ação direta das Ondas de Leste, com grande influência dos núcleos higroscópicos marinhos. Entretanto, os aquíferos possuem águas reconhecidamente de boa qualidade para consumo, devido às elevadas precipitações pluviométricas (média em torno de 1500 mm/ano) e a presença de solos permeáveis que favorecem a infiltração e, conseqüentemente, propicia maior renovação das águas do aquífero, evitando o acúmulo de sais.

De uma maneira geral, existe certa semelhança dos fatores físicos da zona Seridó e Agreste (principalmente clima, geologia e solo) que interferem na qualidade das águas. Todavia, o sistema Ondas de Leste raramente ultrapassa o Planalto da Borborema, estando a zona Seridó condicionada, principalmente, a atuação das Zonas de Convergência Intertropical e do Vórtice Ciclones da Alta Troposfera, que não estão necessariamente associados aos ventos marítimos, colaborando para a ocorrência de águas menos salinizadas. Desta forma, uma das hipóteses para a ocorrência de altos teores de sais presentes nas águas do Seridó são, principalmente, devido a inter - relação relêvo - clima-litotipos. Neste caso, a área de sotavento acentua a evaporação e diminui as precipitações.

Na parte mais setentrional da zona Seridó, entre os municípios de Angicos e Pedro Avelino, bem como no trecho meridional, nos municípios de Equador, Santana do Seridó, Parelhas e Jardim do Seridó, que estão a sotavento do Planalto da Borborema, e ainda o município de Currais Novos, que está a sotavento da Serra de Cuité, encontram-se os núcleos de maior salinidade das águas, onde são menores as possibilidades de seu

aproveitamento natural para consumo humano e animal, além de sua utilização para irrigação e indústria.

Na zona Serrana, as águas de melhor qualidade (menos salinas) do aquífero cristalino é conseqüência, provavelmente, da ocorrência de maiores precipitações, maior infiltração e renovação das águas do aquífero, o que produz maior diluição e menor concentração salina, tornando as águas mais adequadas aos diversos usos.

As maiores precipitações na zona Serrana devem-se a atuação de três sistemas sinóticos: as Zonas de Convergência Intertropical, Vórtice Ciclones da Alta Troposfera e as Linhas de Instabilidade. Estes sistemas não estão diretamente associados aos ventos marítimos, portanto, as precipitações possuem menos núcleos higroscópicos marítimos.

A presença de núcleos de salinidade na zona Serrana pode ser, por exemplo, devido a presença de outros tipos de solos. Os núcleos formados em torno dos municípios de Caraúbas, Janduí, Campo Grande (que está também a sotavento da serra de João do Vale), entre outros, compreende a formação dos Regossolos Eutróficos e os Latossolos Vermelhos – Amarelo Eutróficos, que possuem mineralidade natural elevada.

Os fatores analisados são possíveis causadores da salinidade das águas, em caráter regional. Existem casos, no entanto, em que os fatores locais são mais importantes. Há situação em que a salinidade é causada por fatores locais determinados, por controle estrutural do arcabouço rochoso, tais como: zonas mais fraturadas e/ou falhadas, intensidade, espaçamento e conexão entre os planos de fraturas, e condições locais de recarga (cobertura aluvial e controle morfológico do terreno). No entanto, isto não desconsidera a influência do clima e dos sistemas sinóticos, que atuam em grande escala.

Os resultados encontrados levaram a sistematização das diversas causas possíveis de salinização das águas no aquífero cristalino do Rio Grande do Norte. Desta forma, propõe-se um modelo conceitual geomorfoclimático, conforme a figura 8 que ilustra um sistema com modelagem integrada e multi-objetiva, determinístico e com bases físicas e conceituais, apresentando o balanço hídrico nos diversos horizontes estruturais, desde a troposfera até a litosfera. Em suas rotinas, a evapotranspiração potencial (ETP) é sensível a mudanças do fluxo de calor sensível, bem como, do déficit hídrico, interativamente associado com a quantidade de precipitação (ΣP).

O modelo conceitual busca expressar a dinâmica do processo de salinização da região do cristalino/RN, associando os diversos componentes: evapotranspiração potencial (ETP), precipitação (ΣP), escoamento superficial (ES), infiltração (I), vento (V), relevo, bem como, os fluxos decorrentes dos sistemas sinóticos atuantes

na região. O sistema proposto descreve os componentes do ciclo hidrológico em três dimensões, procurando expressar um dos princípios básicos do déficit hídrico no ecossistema. Esse princípio assinala que "quanto maior a evapotranspiração e menor a precipitação pluviométrica, maior será o déficit hídrico".

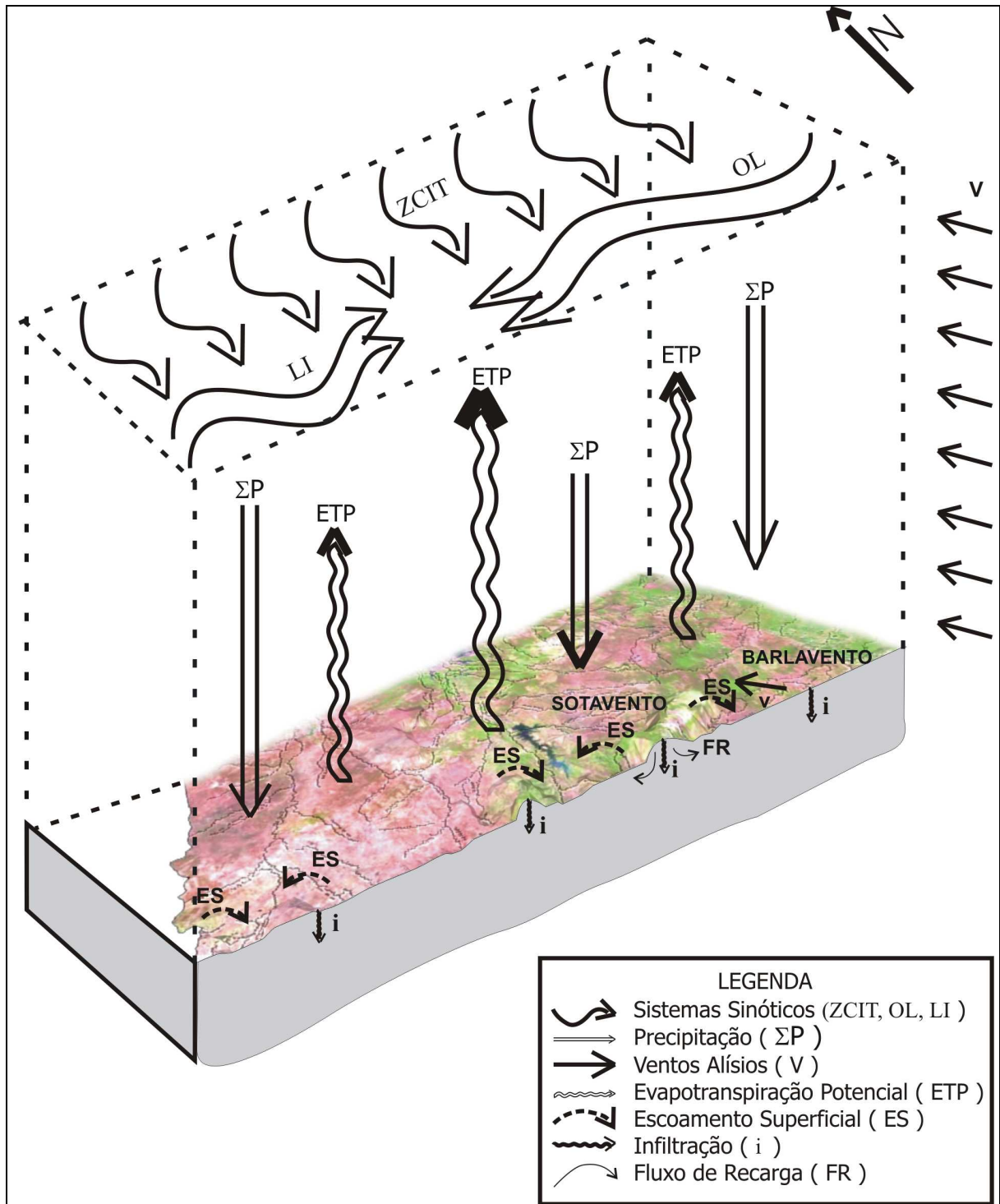


Figura 8- Modelo conceitual geomorfoclimático
 Figure 8- Geomorphological conceptual model

CONCLUSÕES

Os argumentos estatísticos confirmaram a existência de setores da região do aquífero cristalino do Rio Grande do Norte, com águas de distintas salinidades. A condutividade elétrica das águas e os sólidos totais dissolvidos crescem linearmente com as concentrações dos íons sódio, cálcio, magnésio, cloreto e, ocasionalmente, sulfato.

O comportamento observado quanto a ocorrência de diferentes níveis de salinidade no âmbito da área de estudo, ainda não é completamente esclarecido neste trabalho, necessitando, por conseguinte, de estudos mais específicos e aprimorados fundamentados em

dados de monitoramento. As hipóteses levantadas por meio de comparação e associação com fenômenos fisiográficos, meteorológicos, climáticos e geológicos, entre outros, conforme apresentado, constitui, entretanto, um avanço no conhecimento da origem e mecanismos de salinização das águas do aquífero cristalino do Estado do Rio Grande do Norte.

Os resultados sugerem que os componentes do ciclo hidrológico, associados à dinâmica da atmosfera e a um relevo movimentado, criam condições diferentes em termos da salinidade das águas do aquífero cristalino, cujas diferenças são intensificadas em período de situações climáticas extremas.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J.P.T. **Inventário hidrogeológico básico do Nordeste**. Folha nº 15. Jaguaribe/SE. Recife: SUDENE, DD, Série Hidrogeologia nº 32, p.170, 1970.
- BROWN, G. et al. **Os recursos físicos da Terra**. Bloco 4 - Recursos hídricos. Tradução e adaptação: Alvaro P. Crósta. Campinas/SP: Unicamp, p.146, 2000.
- COSTA, A.M.B. **Zoneamento hidroquímico do aquífero cristalino do Rio Grande do Norte**. Dissertação (Mestrado Geociências). Natal, Departamento Geologia – UFRN, p.169, 2002.
- COSTA, A. M. B; MELO, J.G.; SILVA, F.M.; DINIZ FILHO, J.B. Zoneamento da salinidade das águas da aquífero cristalino do Rio Grande do Norte. **Revista de Geologia**. Fortaleza, v.15, p.55 – 65. 2002.
- COSTA, W. D. **Análise dos fatores que atuam no aquífero fissural - área piloto dos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte**. São Paulo, Tese (Doutorado Hidrogeologia). Instituto de Geociências – USP, p.206, 1986.
- CUSTÓDIO, E; LLAMAS, M.R. **Hidrología subterránea**. 2º ed. Barcelona: Ediciones Omega, 2v, 1983.
- CRUZ, W.B.; MELO, F.A.F. **Estudo geoquímico preliminar das águas do Nordeste do Brasil**. Recife, Série: Brasil. SUDENE. Hidrogeologia,19. p.125, 1974.
- FALCÃO, T.C.C. **Estudo hidroquímico da bacia hidrográfica do Riacho do Navio (PE)**. Dissertação (Mestrado em Geologia). Recife: Departamento de Geologia – UFP, p.117, 1980.
- FUNDAÇÃO INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO - IDEC. **Diagnóstico estrutural do Rio Grande do Norte: recursos naturais**. v.II. Natal, p.138, 1975.
- LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, p.226, 1998.
- ROCHA, G.A. Recursos hídricos na bacia do rio Piracicaba, São Paulo. In: BROWN, G. et al. **Os recursos físicos da Terra**. Bloco - 4: Recursos hídricos. Tradução e adaptação: Alvaro P. Crósta. Campinas/SP: Unicamp, p.146, 2000.
- SALATI, E.; LEAL, J.M.; CAMPOS, M.M. **Isótopos ambientais aplicados a um estudo hidrogeológico do Nordeste brasileiro**. Recife: SUDENE / DRN, p.55, 1979.
- SANTOS, J.P.; AZEVEDO, S.G.; MISTRETTA, G. Novos aspectos da salinização das águas subterráneas do cristalino do Rio Grande do Norte. IN: **Comunicação Técnica 314**. São Paulo: IPT, 1984.
- SILVA, A. A. N. Evolução química das águas subterráneas. **Águas Subterráneas**. n.7, p. 5 – 12, abril/1984.
- SILVA, F.M.; COSTA, A.M.B.; SOUSA, B.L. Circulação global e sua influência nos sistemas sinóticos atuantes no Nordeste do Brasil-Fase 1. **Sociedade e Território**. Natal, v.13, n.1, p.44 - 49, jan./jun. 1999.