

ATRIBUTOS E MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DO AQUÍFERO CARBONÁTICO RASO EM ÁREAS DA BACIA POTIGUAR – RN/BRASIL.

José Braz Diniz Filho¹; Edeweis Rodrigues de Carvalho Júnior²; Paula Stein¹; Germano Melo Júnior¹; Maria de Fátima Batista de Carvalho³; Fátima Ferreira do Rosário³; José Carlos Ribeiro Filho²; Natalina Maria Tinoco Cabral¹; Alan Kellnon Nóbrega Carvalho¹

RESUMO

Procedeu-se no estudo a determinação de atributos e a concepção de um modelo hidrogeológico conceitual do aquífero Carbonático raso em áreas da Bacia Potiguar. Desta forma se tem elementos que podem fundamentar a compreensão, análise e influência de controles hidrogeológicos que justifiquem e garantam as condições de *background* das substâncias dissolvidas nas águas subterrâneas, e as prováveis variações nos seus teores normais de ocorrência no referido aquífero. Nesse entendimento os fatores hidrogeológicos determinam possibilidades de que os teores de *background* possam resultar de processos geoquímicos de interação água-rocha ligados ao fluxo subterrâneo, bem como por influência de variações hidroestratigráficas, padrões estruturais, climáticas, processos de recarga, mistura de águas, e proximidades do aquífero raso com linha de costa oceânica.

Palavras-chave – Modelo conceitual, *Background*, Aquífero Carbonático

ABSTRACT

It has proceeded in the study the determination from attributes and the conception from a hydrogeologic conceptual model from the Carbonatic aquifer in areas from the Potiguar Basin. The conceptual model permit to make analysis knowing the influence of hydrogeologic controls over the conditions of occurrence of *background* groundwater and the variations in concentrations of dissolved elements. The hydrogeologic factors indicate that the *background* values can result on water-rock interaction geochemistry processes according the groundwater flow, as well as the influence of hydrostratigrafic variations, structural, climatic standards, processes of recharge, water mixture, and neighborhoods of the water-bearing evenness with oceanic shoreline.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Geologia, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Avenida Senador Salgado Filho, Lagoa Nova, Campus Universitário, Caixa Postal 1639, CEP 59072-970, Natal/RN, Fone (84) 3215-3807. E-mail: brazdf@geologia.ufrn.br; paula.stein@gmail.com; germano@geologia.ufrn.br; natalinacabral@gmail.com; alankellnon@gmail.com

² Petrobras/UN-RNCE, Natal/RN, (84) 3235-3590. E-mail: edeweis@petrobras.com.br; jc-ribeiro@petrobras.com.br

³ Petrobras/CENPES, Rio de Janeiro/RJ, (21) 3865-6157. E-mail: fatc@petrobras.com.br; fatimariosario@petrobras.com.br

1. INTRODUÇÃO

A caracterização e compreensão dos controles geológicos e hidrogeológicos de certo sistema aquífero, associadas aos aspectos de uso e ocupação do solo em seus domínios superficiais, são itens fundamentais para locação de poços de monitoramento visando a definição de valores de *background* de substâncias químicas (naturais) dissolvidas nas águas subterrâneas.

A grande importância dos estudos de teores *background* é ter dados analíticos que expressem de forma a mais fidedigna possível a composição química natural das águas subterrâneas de certo aquífero, em determinada área geográfica, de maneira que sirvam como referencial para ações de controle ambiental e das atividades antropogênicas.

O modelo conceitual permite agregar esses aspectos, sendo concebido para fundamentar a compreensão dos controles hidrogeológicos que possam ser analisados em sintonia com as variações naturais na composição química (*background*) das águas subterrâneas de uma área, sem ou com interferência desprezível de poluentes liberados no meio ambiente por fatores antropogênicos.

As avaliações possibilitam a locação de poços de monitoramento em setores não afetados, ou que não apresentem fontes de contaminação com potencial para afetar a qualidade natural das águas do aquífero, dentro ou fora do domínio de estudo (Battele, 2004), tendo como elemento chave de controle, o fluxo das águas subterrâneas.

Procedeu-se a concepção de um modelo conceitual, neste estudo, através do conhecimento de atributos hidrogeológicos e das possibilidades de contaminação do aquífero em áreas específicas, que explicitaram as relações naturais água-rocha (*background*). O trabalho faz parte de um estudo desenvolvido mediante parceria entre o Laboratório de Geoquímica Ambiental (Departamento de Geologia/UFRN) e a Petrobras (UN-RNCE-SMS/CENPES), atendendo demanda específica deste último para fins de gerenciamento ambiental no âmbito de sua área de atuação na Bacia Potiguar, Estado do Rio Grande do Norte.

2. ÁREA DE ABRANGÊNCIA DO ESTUDO

Os atributos e modelo hidrogeológico conceitual foram caracterizados para um conjunto de três áreas, selecionadas na parte emersa de ocorrência da Bacia Potiguar/RN (Figura 1), que são: Canto do Amaro (abrangência dos municípios de Mossoró-Areia Branca); Estreito (município de Assu); Salina Cristal (município de Macau).

Essas áreas apresentam os seguintes cenários: (i) inclui trechos geográficos representativos do contexto climático/geológico/pedológico/geoquímico/hidrogeológico da Bacia Potiguar; (ii) Inclui trechos geográficos sem influência ou apenas minimamente influenciados por presença antropogênica. As dimensões das áreas estudadas foram de 387 km² (Canto do Amaro), 203 km² (Estreito) e 192 km² (Salina Cristal).

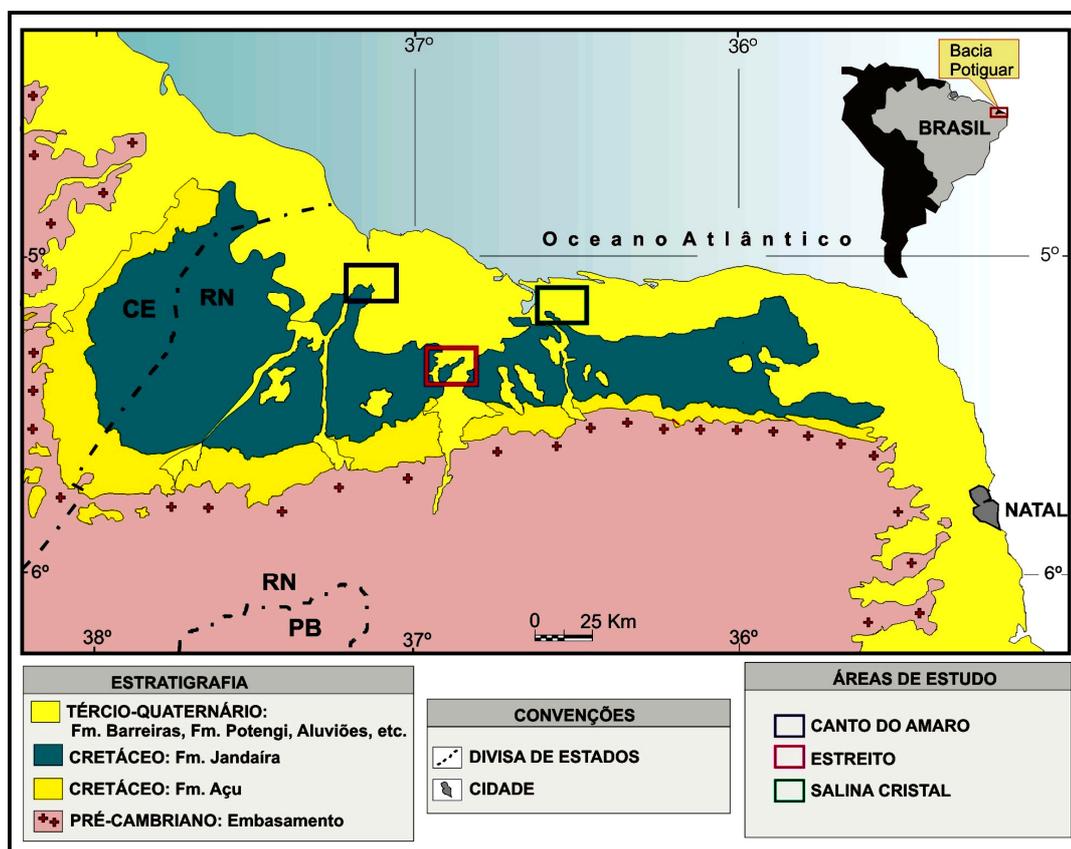


Figura 1. Localização geográfica das três áreas de estudo.

A origem da bacia sedimentar estudada está relacionada a sistema de Riftes do Nordeste Brasileiro, geneticamente ligados à abertura do Oceano Atlântico no Cretáceo Inferior (Matos, 1987). O arcabouço estrutural da bacia é composto por *grabens* (Boa Vista, Umbuzeiro), altos internos (Alto de Quixaba) e plataformas rasas do embasamento (Touros, a leste; Aracati, a oeste) (Bertani *et al.*, 1990) (Figura 02). O preenchimento sedimentar da Bacia Potiguar incluiu as fases Rifte, Transicional, e Drifte, esta última responsável pelas seqüências *Transgressivas* da Formação Açú (arenitos fluviais grossos a médios) e Jandaíra (carbonatos de plataforma rasa). A *Seqüência Regressiva* é representada pelas Formações Barreiras e Tibau, constituídas por arenitos costeiros. Os campos de óleo e gás situam-se em reservatórios siliciclásticos depositados durante as fases rifte, transicional e drifte.

No contexto das áreas estudadas (Canto do Amaro, Estreito, Salina Cristal), e considerando os aspectos geológicos regionais elencados, predominam as rochas carbonáticas da Formação Jandaíra e siliciclásticas da Formação Barreiras/Tibau, aflorantes. Desta forma, estas unidades compõem regionalmente os principais aquíferos rasos estudados: os aquíferos Carbonático e o Siliciclástico.

As áreas se inserem numa região de clima semi-árido, com totais anuais de 812,0 mm/ano (Mossoró), 639,5 mm/ano (Assu) e 597,8 mm/ano (Macau) (Normal Climatológica 1961-1990/INMET). O período chuvoso vai de Fevereiro a Junho (principalmente de Março a Maio), no qual se formam os excedentes que irão recarregar os aquíferos. O período de estiagem vai de Outubro a Janeiro. A Evapotranspiração Potencial é de 1542,4 mm/ano em Mossoró, e 1529,2 mm/ano em Macau, portanto, bem superior à precipitação média anual.

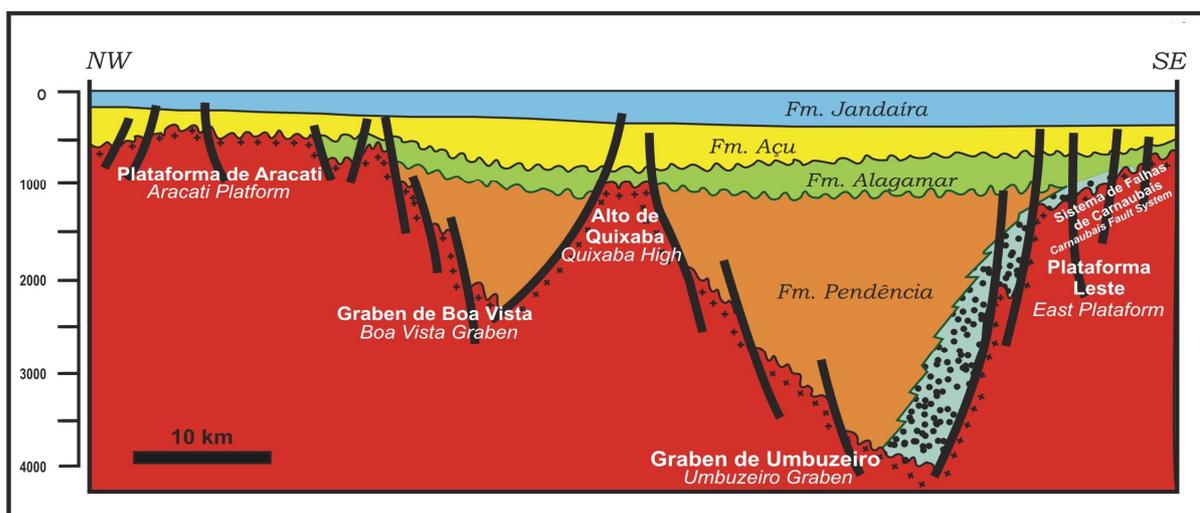


Figura 2. Seção típica da Bacia Potiguar, mostrando seu estilo estrutural e estratigráfico em terra. (Bertani *et al.*, 1990).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas do estudo hidrogeológico foram realizadas entre Março/2005 e Janeiro/2008, compreendendo levantamento de dados diretos, indiretos e procedimentos para tratamento e interpretação de resultados. A fase de levantamentos de dados envolveu procedimentos e métodos relacionados a:

- Reconhecimento de campo um raio médio de 5 km a partir do ponto referente às principais atividades petrolíferas, em cada área (Canto do Amaro, Estreito, Salina Cristal);
- Cadastramento de 96 poços, dos quais 28 tubulares produtores de particulares, 15 poços amazonas/cacimbões de particulares, e 53 poços de monitoramento preexistentes, de propriedade da Petrobras e concentrados em pequenos domínios em cada área;

- c) Trabalhos de investigação direta, que compreenderam na execução de 36 sondagens e construção de 25 poços de monitoramento, com o método de percussão (máquinas perfuratrizes JUPER);
- d) Nivelamento topográfico de todas as sondagens e poços de monitoramento, usando GPS geodésico;
- e) Três testes de aquífero, um em cada área, bombeando-se 01 poço de monitoramento construído, e outro poço de monitoramento servindo como poço de observação;
- f) Tratamento, integração e interpretação dos resultados, incluindo o traçado de mapas potenciométricos do aquífero Carbonático com dados de sondagens (a partir dos quais foram locados e executados os poços de monitoramento em setores tidos como de *background*), estudo de seções hidrogeológicas e integração num modelo hidrogeológico conceitual.

4. HIDROGEOLOGIA

4.1. Contexto teórico dos sistemas aquíferos cárstico-fissurais

Em termos teóricos, a evolução e formação de aquíferos cárstico-fissurais requer três condicionantes: a litologia, que determina a maior facilidade de dissolução da rocha; as estruturas desenvolvidas no maciço rochoso carbonático (fraturas, falhas, planos de estratificação, etc), que permitem a infiltração de água que irá dissolver os minerais; e o clima, que irá disponibilizar águas para evolução dos processos de carstificação (Costa, 1990; Domenico & Schwartz, 1990; Freeze & Cherry, 1979; Mandel & Shiftan, 1981).

As características composicionais das rochas carbonáticas, essencialmente calcários constituídos predominantemente por calcita (CaCO_3), possibilitam que o maciço rochoso seja susceptível ao ataque químico e dissolução dos minerais, por águas ácidas, com formação de porosidade secundária (condutos, canais, cavernas, etc.). As estruturas (fraturas, falhas, planos de estratificação, etc) otimizam os processos de dissolução da rocha, na medida em que facilitam a infiltração e aumentam a área de contato da água percolante (solvente) com os blocos rochosos. O clima, por sua vez, é um elemento chave, pois irá determinar o nível de desenvolvimento dos sistemas cársticos em função da disponibilidade de água para dissolução das rochas carbonáticas. Isto significa que, em climas úmidos, as feições de dissolução de rochas carbonáticas são mais desenvolvidas e ocorre predominantemente próximas a superfície. Sob condições de climas secos essas feições desenvolvem-se preferencialmente em subsuperfície, na zona saturada.

O princípio e mecanismos de desenvolvimento dos sistemas cársticos são ilustrados na Figura 3. Ao longo de fraturas/falhas ocorre a infiltração de águas ácidas (rica em CO₂ capturado da atmosfera, solo e zona não saturada). As águas ácidas infiltradas dissolvem a calcita da rocha, se enriquecem em cálcio, e em seguida prosseguem circulando pelo aquífero sob um gradiente hidráulico condicionado pelo gradiente natural da bacia. Nas saídas naturais (fontes, frentes de fluxo, etc) as águas subterrâneas emergem saturadas em bicarbonato de cálcio. A taxa de erosão por dissolução é proporcional à descarga na saída (canal).

Percebe-se que o desenvolvimento do sistema cárstico está associado diretamente ao fluxo das águas subterrâneas. Num estágio mais avançado de dissolução, a erosão química vai alargando e aprofundando os condutos, à medida que o fluxo subterrâneo transporta quimicamente o material dissolvido. Com isso há um rebaixamento progressivo do nível freático denotando o caráter de interligação dos condutos do sistema cárstico, originando fontes secas e topograficamente suspensas, tornando os carstes mais evoluídos. Desta forma, fica evidenciado que a formação do aquífero cárstico é um processo estreitamente ligado ao fluxo subterrâneo natural, na medida em que o escoamento subterrâneo vai propiciando o desenvolvimento de maior porosidade e permeabilidade (formação de condutos e canais interconectados), no seio do maciço rochoso.

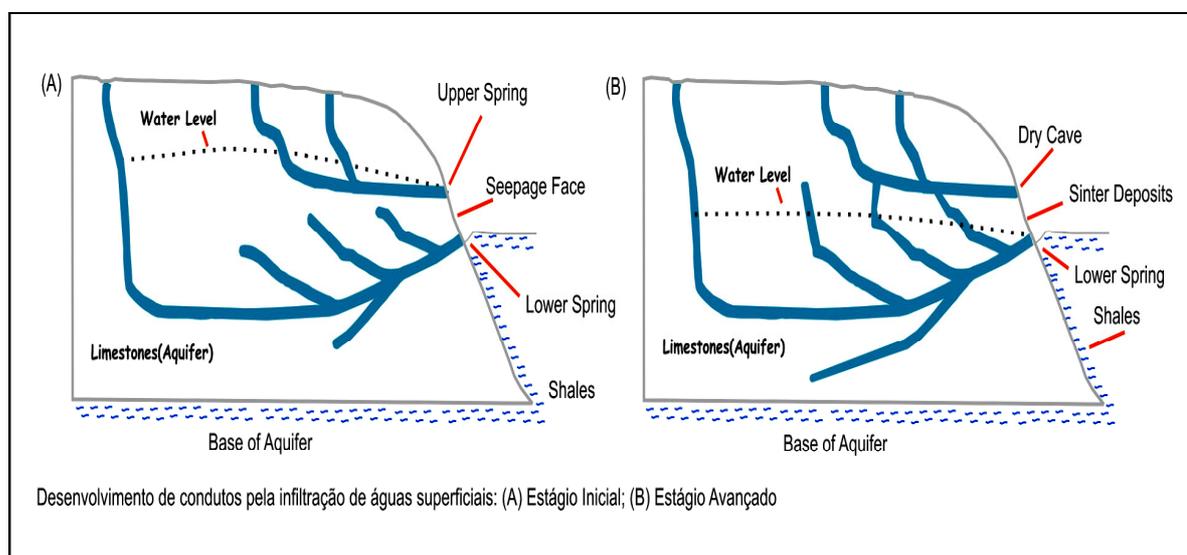


Figura 3. Conceitos sobre o desenvolvimento de estruturas cársticas (modificado de Mandel & Shiftan, 1981).

Uma das classificações (White, 1969 – In: Costa, 1990) destaca o aquífero cárstico do tipo “fluxo difuso”, cujas características principais são: rochas carbonáticas que têm sofrido ao mínimo os processos de dissolução; cavidades de dissolução limitadas em tamanho e número (juntas ou planos de estratificação alargados); cavernas são de ocorrência rara (pequenas e pouco integradas);

Alto grau de interconexão entre as pequenas cavidades de dissolução; o aquífero na superfície mostra formas cársticas suavizadas; possui superfície hidrostática bem definida; têm elevada porosidade primária.

De acordo com Domenico & Schwartz (1990), a carstificação é um feição evolutiva, na qual a dissolução da rocha ao longo do tempo resulta no desenvolvimento gradual de um sistema de condutos integrados. Da mesma forma o conceito de fluxo difuso é reforçado, afirmando que neste tipo de fluxo as águas se movem através de grande número de pequenos condutos (fraturas/planos de estratificação). Nesse sentido, o condicionamento climático da região deve propiciar formações cársticas distintas. Em climas úmidos, as feições de dissolução de rochas carbonáticas ocorrem predominantemente mais desenvolvidas e próximas a superfície, enquanto que, sob condições de climas secos, essas feições desenvolvem-se mais comumente em subsuperfície, na zona saturada.

4.2. Geologia Local

As informações de subsuperfície (Figura 4) constataram a ocorrência de duas unidades litoestratigráficas principais na área de estudo: material siliciclástico (associado regionalmente aos materiais das Formações Barreiras/Tibau); e o material carbonático, principalmente calcários (associados à Formação Jandaíra), em concordância com a geologia regional.

No domínio das três áreas estudadas (Canto do Amaro, Estreito, Salina Cristal) o material Siliciclástico ocorre como unidade de cobertura da Bacia Potiguar, sendo constituído de forma predominante por arenitos finos a grossos com marcante matriz argilosa, e intercalações de argilitos/siltitos e conglomerados. O material Carbonático compreende calcários da porção superior da Formação Jandaíra (Cretáceo), compondo o substrato do material siliciclástico, e localmente aflorante. Em geral são calcários cinzas, amarelados e esbranquiçados, puros e impuros, finos a médios. Apresentam também lentes/intercalações/camadas de argilitos, folhelhos e arenitos calcíferos.

4.3. Hidrogeologia Local

O estudo revelou que os materiais siliciclásticos e os materiais carbonáticos (Figura 4) compõem as unidades litoestratigráficas que constituem os principais sistemas aquíferos rasos no domínio estudado, aqui denominados de aquífero Siliciclástico e aquífero Carbonático (subjacente ao aquífero Siliciclástico).

A espessura litológica do aquífero Siliciclástico mostra grande amplitude de variação, entre zero e 107,0 metros, caracterizando descontinuidade e/ou variação espacial na espessura do material

siliciclástico. O valor médio é de 28,0 metros. O aquífero Carbonático apresenta espessuras estudadas que variaram de 8,0 a 110,0 metros, com média de 40,0 metros. Deve ser ressaltado que as espessuras estudadas são parciais, tendo em vista que os valores máximos alcançados foram função da ocorrência da primeira entrada de água efetivamente saturada detectada nos furos. O nível das águas subterrâneas do aquífero carbonático tende a se tornar mais raso nos setores topograficamente mais baixos. Neste caso, considerando as três áreas, o nível das águas subterrâneas nos poços de monitoramento variou de 6,0 a 115,0 metros.

4.3.1. Seções hidrogeológicas

As características hidrogeológicas de subsuperfície foram destacadas em seções hidrogeológicas (Figuras 5 e 6).

Demonstra-se, na porção superior, o aquífero Siliciclástico (sobreposto ao aquífero carbonático), cuja camada aquífera ocorre de forma irregular e descontínua, sendo também predominantemente insaturado. Desta forma o aquífero Siliciclástico não representa uma unidade amostral persistente e representativa para determinação dos valores de *background*, principalmente por não apresentar uma espessura litológica contínua, espacialmente muito heterogênea, bem como por ser normalmente insaturado.

O aquífero Carbonático se distribui de forma mais contínua, sendo registradas entradas de água em todos os domínios investigados, portanto, de ocorrência espacial mais persistente. Desta forma, o aquífero Carbonático é efetivamente o sistema aquífero mais representativo como unidade amostral para definição de valores de *background*.

Considerando o topo dos calcários como camada-guia, e considerando a estruturação regional da Bacia Potiguar (*grabens* e altos internos, Figura 2), e registros da neotectônica ruptural difundidos na literatura geológica, constata-se nas seções que provavelmente as áreas sofreram movimentação tectônica (falhas normais), com ocorrência de altos e baixo estruturais (*horsts e grabens*), indicando os prováveis sistemas originais de fraturas através dos quais se processou a infiltração de águas e desenvolvimento dos carstes. Os falhamentos sugerem um certo controle na espessura dos aquíferos estudados (Siliciclástico e Carbonático), bem como na ocorrência localizada de níveis saturados no aquífero Siliciclástico.

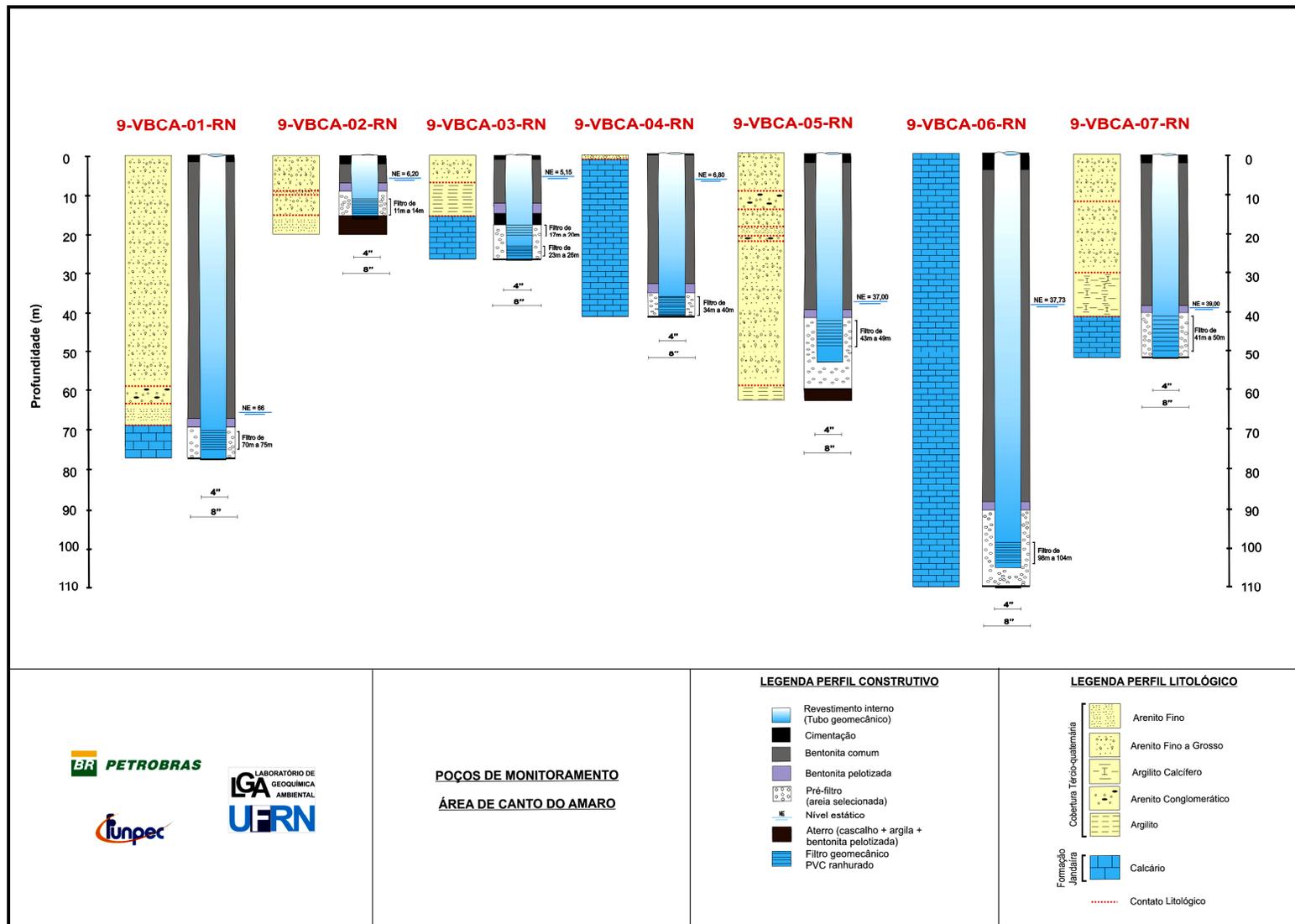


Figura 4. Perfis litológicos-construídos executados na área de Canto do Amaro.

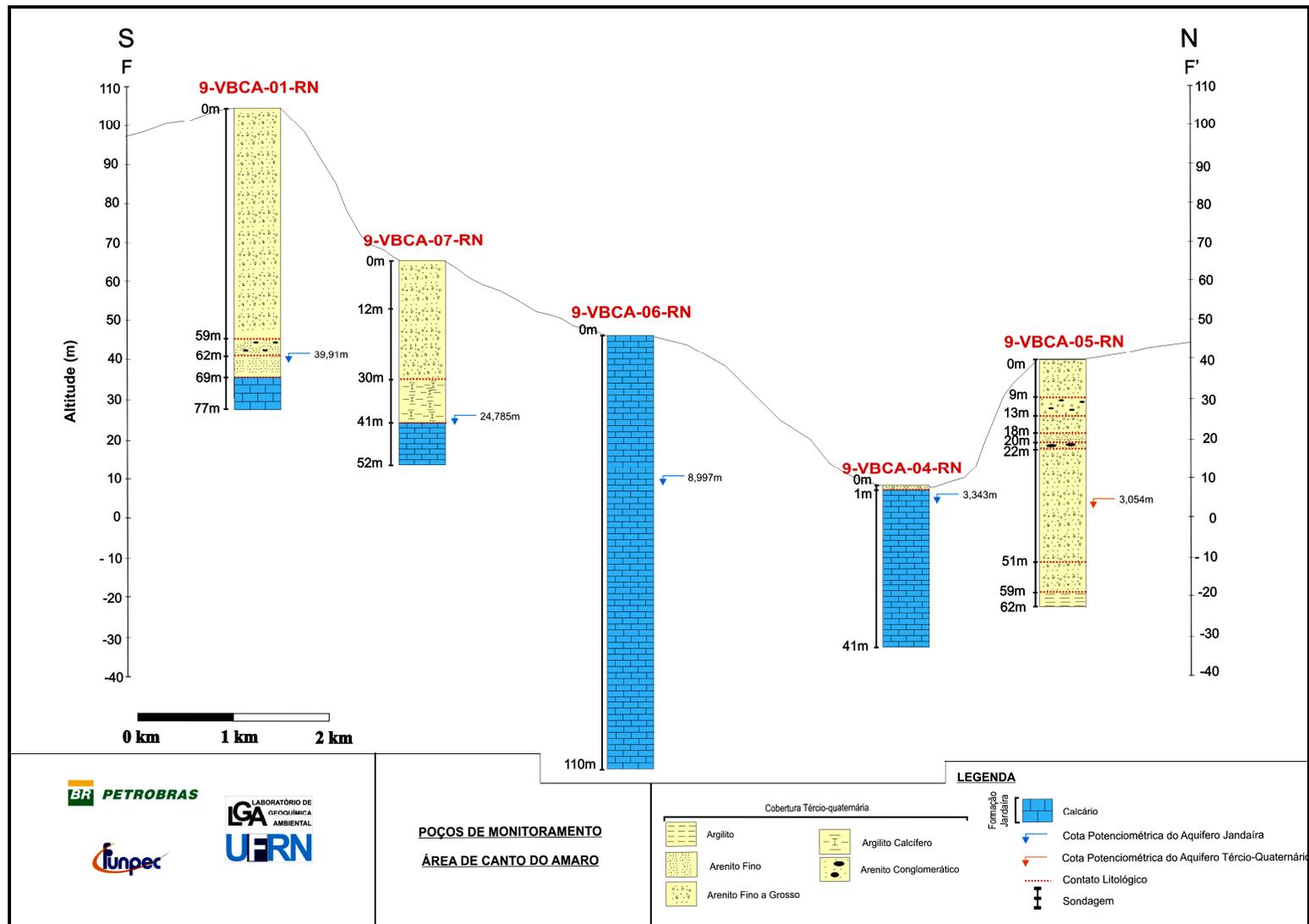


Figura 5. Seção Hidrogeológica CA F-F', em Canto do Amaro.

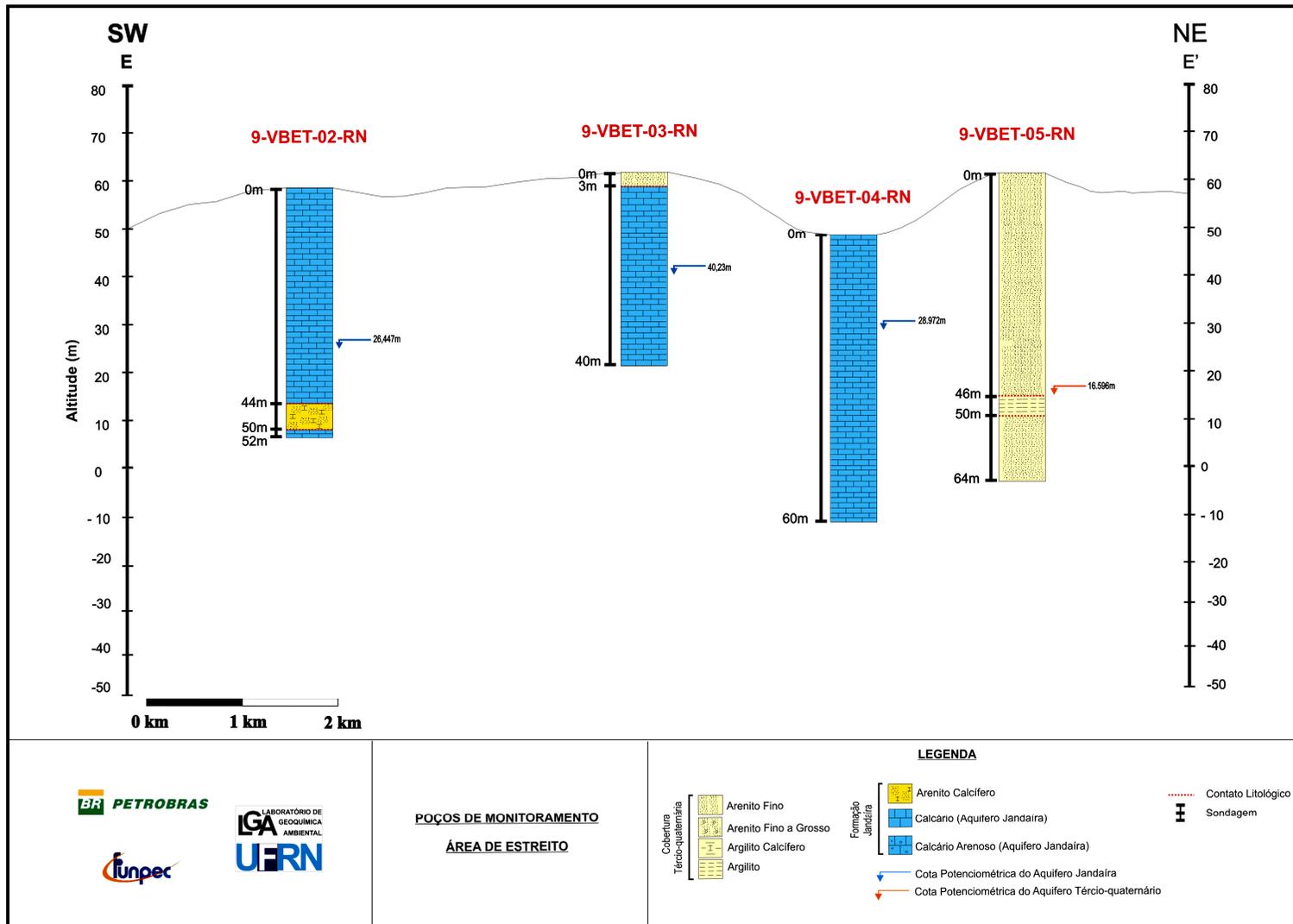


Figura 6. Seção Hidrogeológica ET E-E', em Estreito.

O posicionamento das entradas de água do aquífero carbonático ocorre em cotas menores (mais profundos), comparado ao posicionamento mais elevado (mais raso) do nível potenciométrico, em relação ao nível do mar. Este comportamento reflete que, após ser ultrapassada certa espessura de maciço rochoso insaturado, ocorreu o fenômeno de ascensão do nível da água nos furos com interceptação de entradas saturadas em profundidade.

O nível potenciométrico do aquífero carbonático, após ascensão, é espacialmente ajustado a uma altura potenciométrica uniforme ao longo das seções, evidenciando um caráter de interligação dos condutos cársticos no desenvolvimento do padrão de fluxo subterrâneo. Desta forma, e tendo em vista que, nas áreas estudadas, o nível potenciométrico situa-se predominantemente abaixo do topo do aquífero Carbonático, este compreende um sistema de natureza livre. O aquífero Siliciclástico compõe um sistema de transferência e recarga do aquífero Carbonático. Há domínios do aquífero carbonático mais próximos do oceano e/ou marés (em Canto do Amaro e Salina Cristal), evidenciando uma maior possibilidade de que sejam influenciados localmente pela intrusão salina natural.

4.3.2. Parâmetros hidrodinâmicos e avaliações sobre aquífero carbonático

Foram realizados três testes de aquífero (um em cada área), em poços de monitoramento bombeados e observados cujas distâncias variaram entre 4,3 a 7,4 metros. A duração média dos testes foi de seis horas, com intervalos de tempo de recuperação entre 20 e 80 minutos. A interpretação dos dados se procedeu mediante o uso do *software Aquifer test*, cujas curvas foram mais bem ajustadas aos métodos de Theis e Cooper-Jacob. A Tabela 1 apresenta os valores interpretados como os mais representativos para o aquífero Carbonático no âmbito estudado.

Tabela 1. Parâmetros hidrodinâmicos mais representativos do aquífero carbonático, considerando as três áreas de estudo (Canto do Amaro, Estreito, Salina Cristal).

Valor	Condutividade Hidráulica (K) (m/s)	Transmissividade (T) (m ² /s)
Mínimo	$4,6 \times 10^{-6}$	$4,6 \times 10^{-5}$
Máximo	$9,9 \times 10^{-5}$ m/s;	$6,92 \times 10^{-4}$ m ² /s;
Médio	<u>$6,1 \times 10^{-5}$ m/s</u>	<u>10^{-4} m²/s.</u>

Os testes de bombeamento também tiveram como objetivo verificar os fenômenos de interconexão hidráulica no domínio do aquífero carbonático, visto que este meio hidrogeológico é conceitualmente de caráter muito heterogêneo e anisotrópico. Dessa maneira, se teria mais garantia

de que o aquífero carbonático estudado se tratava de um sistema formado por condutos efetivamente interligados. Os poços e os respectivos piezômetros testados foram construídos com zona filtrante posicionada praticamente na mesma entrada de água no aquífero Carbonático, nos pontos considerados.

A interpretação constou em verificar a influência do bombeamento no rebaixamento no nível dos piezômetros, pelo possível efeito da evolução do cone de depressão. Desta forma, foram determinados os rebaixamentos nos poços de observação, cujos valores variaram de 0,216 metros a 3,808 metros. Em função dos valores de rebaixamento registrados, se constata que o cone de rebaixamento resulta de um sistema com condutos interligados, revelando que as águas subterrâneas se integram no sistema cárstico, e são induzidas pelo gradiente hidráulico que define um padrão de escoamento subterrâneo natural.

Os condicionantes litológico-composicionais do aquífero Carbonático estudado, embasados no conhecimento da literatura geológica regional da Bacia Potiguar, permitem associar a sua origem a sistemas e depósitos sedimentares de ambientes marinhos rasos e/ou transicional (Figura 7). Tem-se o aquífero Carbonático constituído predominantemente por camadas mais espessas e contínuas de calcários puros e impuros (Fácies carbonática, na Figura 7), como ocorre preferencialmente em Canto do Amaro e Estreito. Por outro lado, há evidências de que a unidade carbonática seja representada por maior incidência de arenitos calcíferos e argilitos (fácies arenito e argilito, na Figura 7) intercalados e/ou em alternados com calcários menos espessos, como evidenciado na área de Salina Cristal.

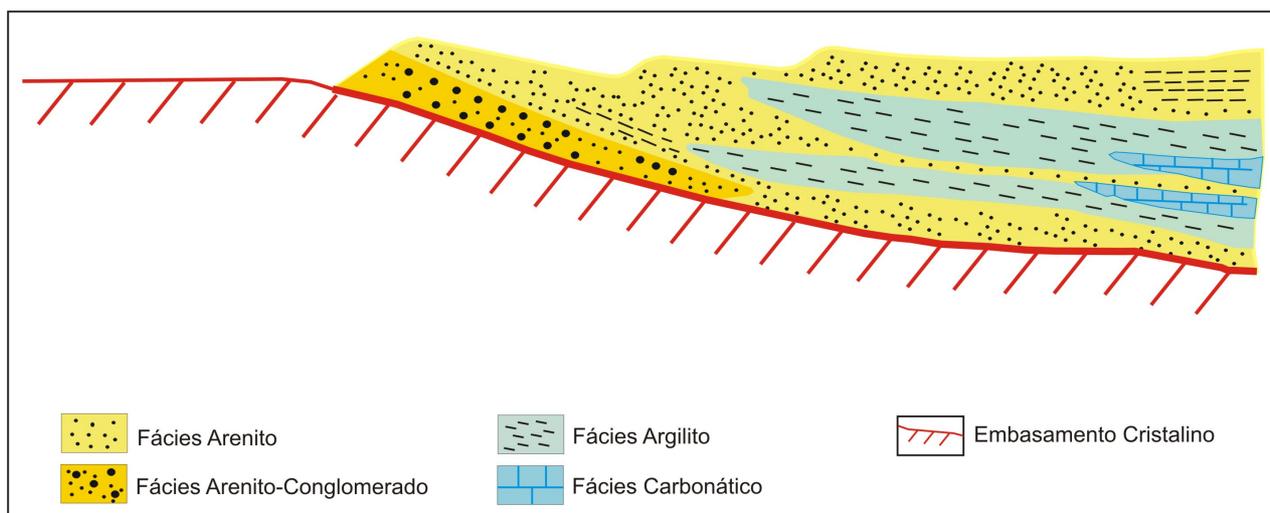


Figura 7. Situação esquemática da litoestratigrafia condicionada por mudanças de fácies em bacias de plataforma continental – Resulta da formação de depósitos sedimentares em Ambientes marinhos rasos e/ou transitacionais (Mandel & Shiftan, 1981 - modificado).

No âmbito do estudo o aquífero Carbonático se encontra estratigraficamente e fisicamente subjacente ao aquífero Siliciclástico, além de não se registrar condutos/cavernas plenamente desenvolvidas na superfície do terreno. Este fato sugere que o aquífero Carbonático estudado consista num sistema cárstico pouco desenvolvido em superfície, e mais em subsuperfície na zona saturada, pela ação das águas subterrâneas. Deve ser considerado também o condicionamento climático, que provavelmente interfere na menor disponibilidade de água de recarga para dissolução da rocha carbonática, o que provavelmente resultou no menor desenvolvimento e nas pequenas dimensões dos condutos/cavidades cársticas, mesmo em subsuperfície.

O fenômeno hidráulico de ascensão do nível da água nos poços, após interceptar entradas de água saturadas em profundidade, consiste de fluxos ascendentes sob pressão hidrostática, sendo o fluxo descendente de natureza gravitacional, ligado a carstes bem desenvolvidos (Costa, 1989).

4.3.3. Fluxo das águas subterrâneas do aquífero carbonático

Os testes de bombeamento e os aspectos estruturais e hidráulicos detectados em subsuperfície (nível potenciométrico espacialmente uniforme e ajustado a uma mesma altura potenciométrica) demonstraram que o aquífero Carbonático estudado se trata de um sistema com condutos/canais/cavidades interligados. Nesse sentido foram definidos os mapas potenciométricos do aquífero Carbonático conforme mostrado na Figura 8.

A potencimetria demonstrada nas três áreas revelou um comportamento uniforme no escoamento das águas subterrâneas do aquífero carbonático, mesmo se tratando de um aquífero de caráter cárstico-fissural, normalmente heterogêneo e anisotrópico. Este fato de uma forma geral já havia sido detectado na análise das seções hidrogeológicas e potencimetria elaborada com informações de sondagens.

Em Canto do Amaro o fluxo subterrâneo se dá para norte/noroeste (sentido da linha de costa), sob um gradiente hidráulico médio da ordem de 0,37%. As regiões tipicamente de *background* se referem aos setores leste e sul da área (poços 9-VBCA-01-RN, 9-VBCA-07-RN, 9-VBCA-10-RN, 9-VBCA-06-RN, 9-VBCA-09-RN, 9-VBCA-10-RN). Em Estreito, com fluxo das águas subterrâneas para leste (sentido do vale do Rio Açú), o gradiente hidráulico médio é de 0,54%. Podem-se considerar como de *background* os setores norte (poço 9-VBET-04-RN), sul/sudoeste (poços 9-VBET-02-RN, 9-VBET-07-RN) e oeste (poços 9-VBET-03-RN, 9-VBET-08-RN).

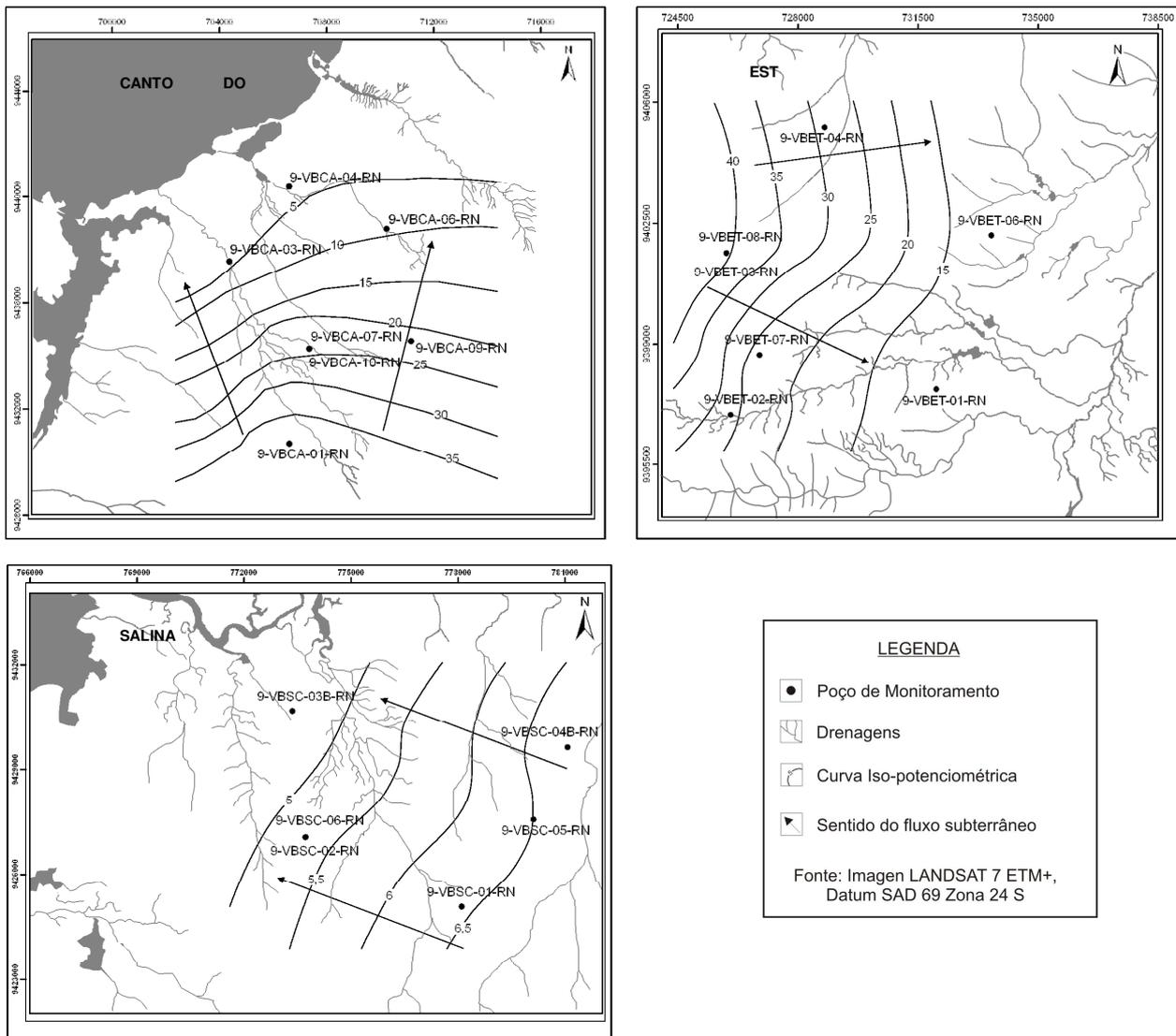


Figura 8. Potenciometria do aquífero carbonático nas áreas estudadas.

Em Salina Cristal o escoamento das águas subterrâneas se dá para noroeste, no sentido do mar e/ou planície flúvio-marinha (área de manguezais e salinas), cujo gradiente hidráulico médio é de 0,029%. A área de Salina Cristal é considerada em quase todo o seu domínio como de *background*, por ser pouco utilizada para atividades de produção de petróleo, à exceção do domínio dos poços 9-VBSC-03A-RN e 9-VBSC-03B-RN, que não é considerado de *background*.

De uma forma geral o aquífero Carbonático estudado se ajusta a um modelo de fluxo difuso de White (1969), citado por Costa (1990) e Domenico & Schwartz (1990), pois, além do fator climático semi-árido não condicionar a formação de grandes condutos superficiais e profundos, os pequenos condutos cársticos interligados favorecem a uma superfície hidrostática bem definida, conforme constado na potenciometria das áreas estudadas.

4.4. Modelo hidrogeológico conceitual da área estudada

O modelo conceitual reconhecidamente fundamenta a compreensão dos aspectos hidrogeológicos integrados passíveis de exercer controle geoquímico na composição e variações de teores de *background* em águas subterrâneas. Nesses termos, poços de monitoramento podem ser locados em setores do aquífero pouco ou não afetados antropogenicamente (Battele, 2004), em concordância com os controles hidrogeológicos, dentre os quais se destaca o fluxo das águas subterrâneas.

A concepção do estudo foi a de caracterizar hidrogeologicamente a porção superior do aquífero Carbonático no domínio da Bacia Potiguar emersa, em áreas específicas (Canto do Amaro, Estreito, Salina Cristal). Foram então desenvolvidos estudos e avaliações para caracterização da ocorrência das águas subterrâneas mais rasas para estabelecimento dos valores de *background*. Teoricamente as águas subterrâneas mais rasas são mais vulneráveis aos efeitos antropogênicos que podem afetar sua composição química natural, e desta forma foram objeto de estudo de *teores de background* visando, no futuro, se propor ações de controle ambiental em função da presença de poluentes de *não background*.

O contexto geológico, estrutural, hidrogeológico e antropogênico integrados possibilitaram o estabelecimento do modelo hidrogeológico conceitual do aquífero Carbonático estudado, conforme demonstrado esquematicamente na Figura 9. Permite uma compreensão sobre a geometria dos sistemas aquíferos, estruturas, dinâmica das águas subterrâneas, vulnerabilidade frente à presença de fontes poluidoras, e outros fatores que poderiam influenciar na assinatura geoquímica das águas.

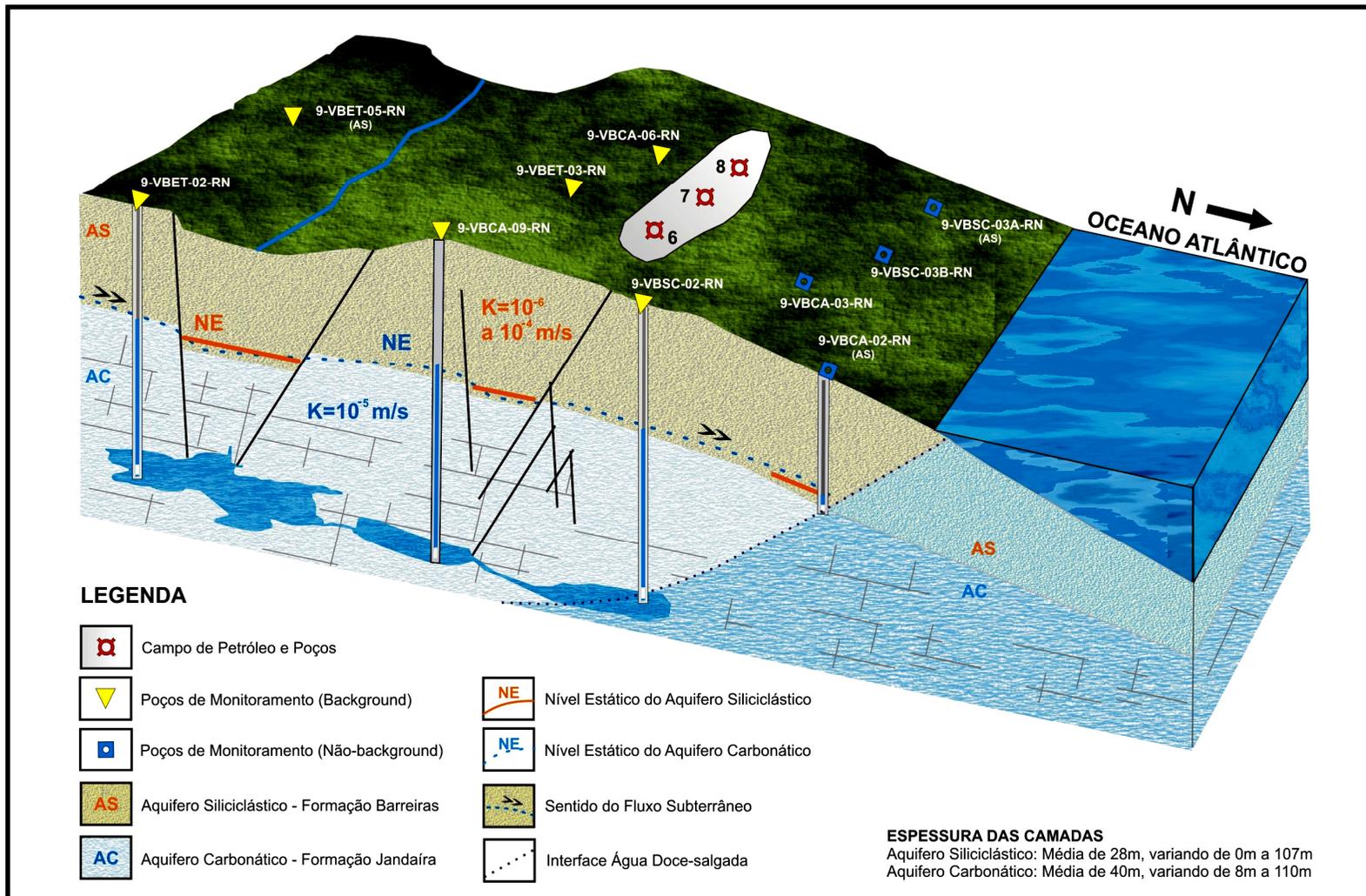


Figura 9. Modelo hidrogeológico conceitual esquemático, retratando as diferentes situações hidrogeológicas do aquífero Carbonático, dos poços de monitoramento de *background* e distintas características das zonas de entradas de água dos poços.

O modelo evidencia que aquífero Siliciclástico apresenta superfície freática desenvolvida somente em determinados setores (exemplo dos poços 9-VBSC-03^a, 9-VBCA-02 e setores saturados em baixos estruturais). A superfície freática, portanto, é descontínua no espaço em função da predominância do caráter insaturado do aquífero.

O aquífero carbonático apresenta uma superfície potenciométrica de caráter regular, contínua e espacialmente homogênea, ligeiramente controlada pelo relevo. Indica que a camada aquífera contém cavidades e condutos saturados interligados e integrados, sendo possível a perfuração de poços com água em todos os domínios geográficos. Estes fatores revelam que o aquífero carbonático se constitui na unidade hidroestratigráfica e amostral mais importante, e representativa para definição dos teores de *background* das águas subterrâneas rasas neste estudo.

Percebe-se, esquematicamente, como se situam os poços de monitoramento de *background* e poços de não *background* (Figura 9). Os poços de *background* foram instalados em domínios afastados de potenciais fontes poluidoras de águas subterrâneas, domínios estes correspondentes a setores topograficamente e/ou potenciometricamente mais elevados (exemplos dos poços 9-VBCA-09-RN; 9-VBCA-06-RN; 9-VBET-05-RN; 9-VBET-02-RN).

Alguns poços, mesmo estando topograficamente e potenciometricamente a jusante, foram considerados de *background*, considerando que se situam afastados de fontes poluidoras, e/ou o padrão de escoamento subterrâneo não evidencia que tais poços pudessem ser afetados por águas eventualmente contaminadas trazidas pelo fluxo subterrâneo (exemplo poço 9-VBSC-02-RN; Figura 9).

Existem setores nos quais os aquíferos (Siliciclástico e Carbonático) estão mais susceptíveis a sofrerem influência da cunha salina natural, especialmente nos domínios costeiros mais próximos ao mar. Citam-se as áreas de Canto do Amaro e Salina Cristal (esquematicamente ilustrados na porção direita da Figura 9; poços VBCA-02-RN, 9-VBCA-03-RN, 9-VBSC-03A-RN e 9-VBSC-03B-RN).

O esquema apresentado no domínio esquerdo da Figura 9 pode ser associado a uma interpretação na área de Estreito, com um vale e um aquífero aluvial de caráter siliciclástico implantado no Rio Açu. O Rio Açu é reconhecidamente de grande potencial hidrogeológico (expressivas coberturas aluviais saturadas; espessura litológica entre 35,0 e 60,0 metros; $K = 10^{-3}$ m/s; Porosidade específica de 10 a 15%; Resíduo Seco de 250 a 500 mg/L) (SERHID, 1998). O aquífero Carbonático subjacente é passível de manter conexão lateral e/ou vertical com o aquífero aluvial, principalmente nos domínios topográficos e potenciométricos mais baixos, dando evidências de que o aquífero Carbonático possa receber influência das águas do aquífero aluvial, que alteram a sua assinatura geoquímica original.

O aquífero Siliciclástico (AS) (Figura 9) compõe uma unidade hidrogeológica que deve favorecer a infiltração de águas de chuva, e transferência das águas infiltradas para recarga do aquífero Carbonático, mesmo que ocorra simultaneamente com recarga advinda de contribuição regional. O aquífero Siliciclástico apresenta caráter litológico e Condutividade Hidráulica indicativa de que se trata de um meio hidrogeológico que impõe uma proteção natural e menor vulnerabilidade à poluição do aquífero Carbonático, demonstrando a importância do aquífero Carbonático como unidade hidroestratigráfica ideal para definição de teores de *background* nas águas subterrâneas.

5. CONCLUSÕES

O aquífero carbonático foi definido como sendo pouco desenvolvido em termos de carstificação. A ascensão do nível potenciométrico sugere uma descompressão da água armazenada nos condutos interceptados, segundo o princípio físico de comunicação dos vasos.

Sendo o poço considerado como um vaso (embora artificial), o nível da água atingirá uma altura equivalente à altura do nível da água estabelecida naturalmente pelos condutos/cavidades naturais (vasos) saturados, e interligados. Estes fatores indicam ser o aquífero Carbonático de natureza livre, com uma superfície potenciométrica bem definida, e posicionada abaixo do topo do aquífero.

A superfície potenciométrica do aquífero carbonático é definida assim como sendo de caráter virtual, evidenciando que o próprio comportamento hidráulico estabelece condições de *background* das águas subterrâneas, dado a menor vulnerabilidade do aquífero em ser afetado por poluentes que trafegam na zona não saturada com as águas de recarga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Battelle, 2004. Guidance for Environmental *Background* Analysis, Volume III: Groundwater. Battelle Memorial Institute e US Naval Facilities Engineering Command, Columbus. 177 páginas.
- Bertani R.T., Costa, I.G. Matos, R.M.D., 1990. Evolução Tectono-Sedimentar, Estilo Estrutural e Habitat do Petróleo na Bacia Potiguar. De Raja Gabaglia, G.P. e Milani E.J. (Coords), Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. PETROBRAS.
- Costa, W. D., 1990. O aquífero cárstico-fissural. Notas de aula. Mestrado em Geociências. UFPE. Recife, PE.
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W., 1990. Physical and Chemical Hydrogeology. Ed. John Wiley & Sons. New York, U.S.A.824p.

- Freeze, R. A.; Cherry, J. A. – Groundwater. 1979. New Jersey: Prentice Hall, 604p. (Mandel & Shiftan, 1981 - modificado).
- Mandel, S. and Shiftan, Z.L., 1981. Groundwater Resources (Water pollution). Academic Press Inc.,U.S. 269 páginas.
- Matos, R.M.D., 1987. Sistema de Riftes Cretáceos do Nordeste Brasileiro. PETROBRAS/DEPEX/DEBAR. Relatório Interno, 34p.
- Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte, 1998. Plano Estadual de Recursos Hídricos. Caracterização Hidrogeológica dos Aquíferos do Rio Grande do Norte. Natal/RN. 78 p.
- White, R.E., 2006. Principles and Practice of Soil Science. Quarta Edição. Blackwell Publishing, Oxford. 363 páginas.
- Wikipedia, 2008. Vasos Comunicantes. [http://pt.wikipedia.org/wiki/Vasos comunicantes](http://pt.wikipedia.org/wiki/Vasos_comunicantes). Acesso em 01/02/2008.