

Análise do avanço da cunha salina em sistema aquífero costeiro

Analysis of the advancement of seawater intrusion in coastal aquifer system

Aryane Mota de Oliveira^{1*} , Pedro Henrique de Omena Toledo² ,
Cleuda Custódio Freire¹ , Maurício de Gois Gomes¹ , Ana Carolina Sarmiento Buarque¹ 

RESUMO

A exploração indiscriminada de água subterrânea pode causar o colapso dos aquíferos costeiros. Nesse escopo, este trabalho avaliou o comportamento da cunha salina em parte do sistema Barreiras/Marituba, que fica na costa da região metropolitana de Maceió (AL), fazendo uso de modelagem e índices hidrogeoquímicos. O modelo foi calibrado tanto para o fluxo subterrâneo como para a concentração de sólidos totais dissolvidos, nos quais atingiu coeficiente de correlação de 0,764 e 0,682, respectivamente. Foram analisados dois cenários distintos, que permitiram verificar o efeito da exploração de água subterrânea na cunha salina para uma projeção de dez anos. O primeiro considerou a exploração existente até 2015, sem acréscimos de bombeamentos. Como resultado, verificou-se o avanço da cunha salina em duas áreas do domínio e outra área sofreu recuo, além da formação de cones com ascensão vertical da água do mar. No segundo cenário, foram adicionadas, além das licenças de obras hídricas já existentes, como poços, a hipótese de instalação de 36 novos poços de bombeamento, considerando o crescimento da cidade. Porém, nesse caso, não foi possível visualizar variações significativas na zona de mescla em relação ao primeiro cenário. A análise dos índices hidrogeoquímicos apontou para maiores concentrações de cloretos na região próxima à linha do Oceano Atlântico, com pouca influência do nitrato e, no geral, indicou a existência de intrusão de água do mar.

Palavras-chave: contaminação; salinidade de aquíferos; modelagem hidrológica.

ABSTRACT

The groundwater overexploitation can cause the collapse of coastal aquifers. In this scope, this study evaluated the behavior of the salt wedge in part of the Barreiras/Marituba system aquifer present on the coast of the Metropolitan Region of Maceió, Alagoas, using hydrogeochemical modeling and indexes. The model was calibrated for both the underground flow and the total dissolved solids concentration, obtaining a correlation coefficient of 0.764 and 0.682, respectively. Two different scenarios were analyzed, which allowed verifying the effect of the exploitation of groundwater in the salt wedge for a projection of 10 years. The first considered the existing operation until 2015, without any additional pumping. Results shows that saline wedge advanced in two areas of the domain and another site was retreated, in addition to the formation of cones with vertical rise of the sea water. The second scenario, besides the already existing waterworks licenses, was also added by the installation of 36 hypothetical pumping wells, based in the city growth. However, in this case, it was not possible to visualize significant variations in the melting zone in relation to the first scenario. The analysis of hydrogeochemical indices shows to higher concentrations of chlorides in the region near the Atlantic Ocean line, with little influence of nitrate and, in general, indicated the existence of sea water intrusion.

Keywords: contamination; salinity aquifers; hydrological modeling.

INTRODUÇÃO

A depleção das águas subterrâneas e a salinização de aquíferos vêm se tornando uma grande preocupação para os gestores dos recursos hídricos em sistemas aquíferos costeiros de regiões tropicais e subtropicais no mundo (CHANDRAJITH *et al.*, 2014) em consequência das consideráveis perdas econômicas por conta da redução da qualidade de água doce subterrânea. A crescente urbanização nessas regiões aumenta a exigência por água e o subsequente declínio dos recursos

hídricos subterrâneos. Além disso, uma diminuição significativa na recarga e mudanças bruscas no nível do mar também contribuem para esse problema (CHANDRAJITH *et al.*, 2014; BOUBERBALA, 2015).

Devido a sua importância, a intrusão salina foi largamente estudada em todo o mundo ao longo dos últimos 50 anos, com foco na compreensão do funcionamento de aquíferos costeiros em termos de processo de fluxo e transporte, a fim de preservar o sistema costeiro da degradação e para uma gestão sustentável das águas subterrâneas (*e.g.*,

¹Universidade Federal de Alagoas - Maceió (AL), Brasil.

²Universidade Federal de Pernambuco - Recife (PE), Brasil.

*Autor correspondente: aryry_mota@hotmail.com

Recebido: 29/07/2016 - Aceito: 27/06/2017 - Reg. ABES: 167251

REILLY & GOODMAN, 1985; CUSTÓDIO, 1987; VENGOSH *et al.*, 1999; GATTACCECA *et al.*, 2009; KHASKA *et al.*, 2013).

A magnitude da intrusão salina é influenciada pelos ambientes naturais geológicos, pelo gradiente hidráulico, pela taxa de retirada de água subterrânea e pela recarga (CHOUDHURY; SAHA; CHAKRABORTY, 2001; PULIDO-LEBOEUF, 2004; BATAYNEH, 2006). Diversas pesquisas a respeito dessa intrusão em aquíferos costeiros têm sido realizadas em vários países, com o uso de diferentes métodos. Vários autores estão utilizando levantamentos geoquímicos e geofísicos para demarcar a interface entre a água doce e a salgada (*e.g.*, LEE & SONG, 2007; SHERIF *et al.*, 2006). Alguns íons específicos, como Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} e Br^- , são enriquecidos pela intrusão da água do mar e podem ser utilizados como delineadores de sua influência. Em particular, Cl^- e Br^- têm sido utilizados para estimar a influência da água do mar sobre as águas subterrâneas (GHABAYEN; MCKEE; KEMBLOWSKI, 2006). Além disso, relações iônicas tais como $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$, Na^+/Cl^- , Br^-/Cl^- e $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ podem ser efetivamente utilizadas para avaliar o grau de intrusão salina (BOUBERBALA, 2015).

Uma forma mais abrangente de perceber o avanço da cunha salina no aquífero é a modelagem do sistema. Nesse sentido, o código SEAWAT foi desenvolvido pela combinação de MODFLOW e MT3DMS para simular, em três dimensões, o fluxo subterrâneo com densidade variável utilizando a concentração de salinidade para estimar a densidade dos fluidos e, assim, determinar a intrusão da cunha salina no aquífero. A salinidade é representada pelos sólidos totais dissolvidos, por possuírem valores muito próximos (GUO & LANGEVIN, 2002). Além disso, o SEAWAT vem sendo testado para diversas finalidades, apresentando bons resultados (COBANER *et al.*, 2012), assim como também o FEFLOW, que trabalha com o mesmo princípio (KERROU; RENARD; TARHOUNI, 2010; SEFELNASR & SHERIF, 2014).

O aquífero costeiro presente em Maceió (AL), cidade localizada no litoral do Nordeste brasileiro, é representado pelos aquíferos: Formação Poção, Formação Maceió, Formação Marituba, Formação Barreiras e Sedimentos de Praia e Aluvião, os quais foram definidos por estudos que levaram em consideração a geomorfologia, pedologia e hidrogeologia (TOLEDO, 2016). O comportamento litoestratigráfico evidencia que os aquíferos Barreiras e Marituba, conceituados, respectivamente, como livre e confinado, encontram-se em amplas áreas em estado de comunicação permanente, ou seja, compõem um único sistema hidráulico, o qual se denomina sistema aquífero Barreiras-Marituba (SILVA, 2013).

Barreiras e Marituba, alvos do trabalho, isolados ou em conjunto, são considerados como de média potencialidade. Eles representam os principais aquíferos de Maceió e vêm sendo exaustivamente explorados para abastecimento público, privado e industrial. Isso causa constante alteração no sentido original do fluxo subterrâneo, criando centros de fluxos radiais; além disso, o rebaixamento excessivo da superfície potenciométrica, em alguns bairros, está acarretando depleção das

reservas permanentes e salinização pelo desequilíbrio da zona de mescla (ROCHA, 2005). Análises da qualidade da água em poços localizados próximos à linha da costa apresentaram salinidade elevada, inviabilizando o uso para consumo humano. Por representar 68% do volume destinado ao abastecimento público, esse sistema aquífero é de grande importância econômica e social para a região.

Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo analisar o avanço da cunha salina em sistema aquífero costeiro através de dois métodos. No primeiro, alguns índices e algumas razões iônicas foram utilizados na investigação das possíveis fontes de contaminação e na avaliação da qualidade da água subterrânea. O segundo consistiu na aplicação de modelo de simulação, código SEAWAT, com o intuito de modelar a salinização do sistema aquífero Barreira/Marituba em parte da região metropolitana de Maceió em dois cenários futuros elaborados com base em evidências observadas.

ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi realizado em parte da região metropolitana de Maceió (RMM) (Figura 1), contemplando parte dos municípios de Rio Largo, Satuba e Santa Luzia do Norte, localizados no estado de Alagoas. A região situa-se em bacia sedimentar e limita-se a nordeste pela região hidrográfica do Pratygy, a sudoeste pela Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú e pelo Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CEMMM), a noroeste pela linha da falha principal no contato com o cristalino e a sudeste pelo oceano Atlântico.

Aspectos climáticos

A área de estudo está inserida em região de clima quente e úmido, com temperatura média anual em torno de 25°C e índice de aridez de Martone igual a 40 (NOBRE, 2006; SALDANHA *et al.*, 1980), possui regime de chuvas uniforme, sendo que apenas duas estações são bem definidas. Março a agosto compõem o período da estação chuvosa, quando ocorre cerca de 75% da precipitação total anual (NOBRE, 2006). Essas estações podem ser observadas na Figura 2, por meio da precipitação média mensal da região.

Hidrogeologia

A litologia do sistema aquífero de Maceió é composta de uma sucessão de camadas areníticas intercaladas por camadas argilosas. Esse sistema compreende três formações, Barreiras, Marituba e Poção; as duas primeiras estão hidráulicamente interligadas e integram um sistema aquífero, compreendendo um ambiente geológico heterogêneo; além disso, constituem excelentes aquíferos por apresentarem grandes espessuras de arenitos areias, sobressaindo-se em relação às demais quanto à transmissibilidade de fluidos (NOBRE, 2006; NOBRE & NOBRE, 2001).

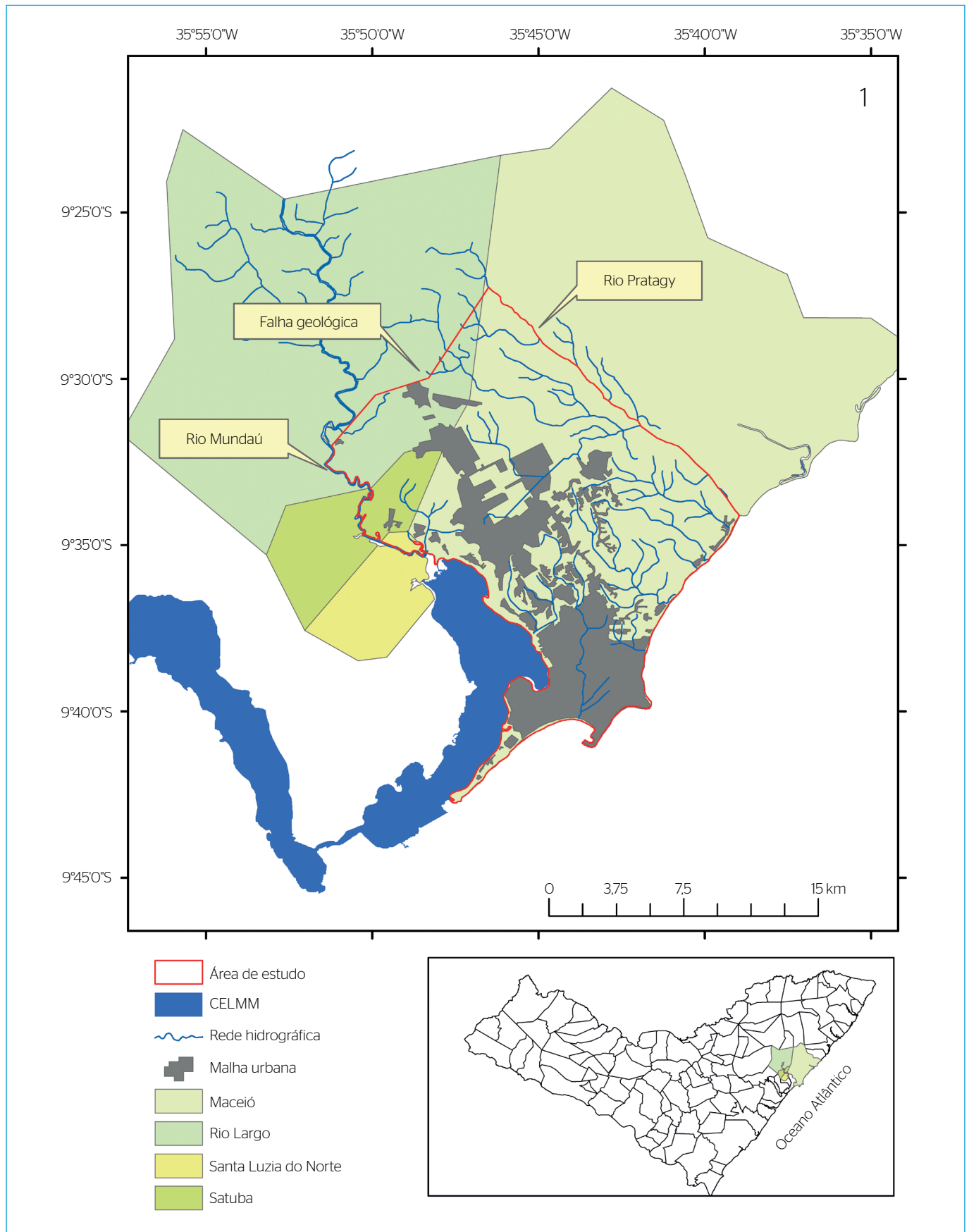


Figura 1 - Área de estudo, parte da região metropolitana de Maceió.

O sistema aquífero Barreiras-Marituba é caracterizado, geralmente, por uma zona livre superior e diversos horizontes confinados, influenciados pelas variações sazonais, sendo que sua área de ocorrência coincide com a do aquífero Barreiras e grande parte dos Sedimentos de Praia e Aluvião (SILVA, 2013). O sistema é formado pelas camadas mais exploradas na área de estudo.

A formação Barreiras apresenta melhor desempenho, pois seus sedimentos clásticos são, geralmente, espessos e saturados, isso em regiões de tabuleiros, apresentando, em geral, comportamento livre

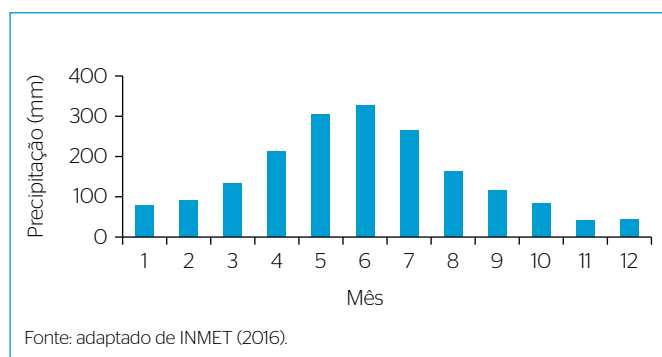


Figura 2 - Precipitação média mensal.

e espessura homogênea, podendo alcançar 150 m de profundidade (NOBRE, 2006). A Figura 3 apresenta o perfil geológico da região de estudo.

Aquíferos convencionais apresentam condutividade hidráulica entre 10^{-3} e 10^{-2} $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e produção na ordem de $40 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. O sistema Barreiras-Marituba, tendo os dois horizontes permeáveis, atinge valores de produção em torno de $300 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$; ademais, foram verificadas potencialidades hidráulicas excelentes, com valores de condutividade hidráulica que variam de 10^{-3} a 10^{-1} $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, nos quais a recarga do sistema é dada através de infiltração direta da precipitação, principalmente na época de inverno (NOBRE, 2006; NOBRE & NOBRE, 2001).

METODOLOGIA

Análise qualitativa da água subterrânea

Para a análise qualitativa, foram catalogados 89 poços com dados de qualidade da água. Além destes, foram coletadas 12 amostras ao longo da linha da costa (Figura 4).

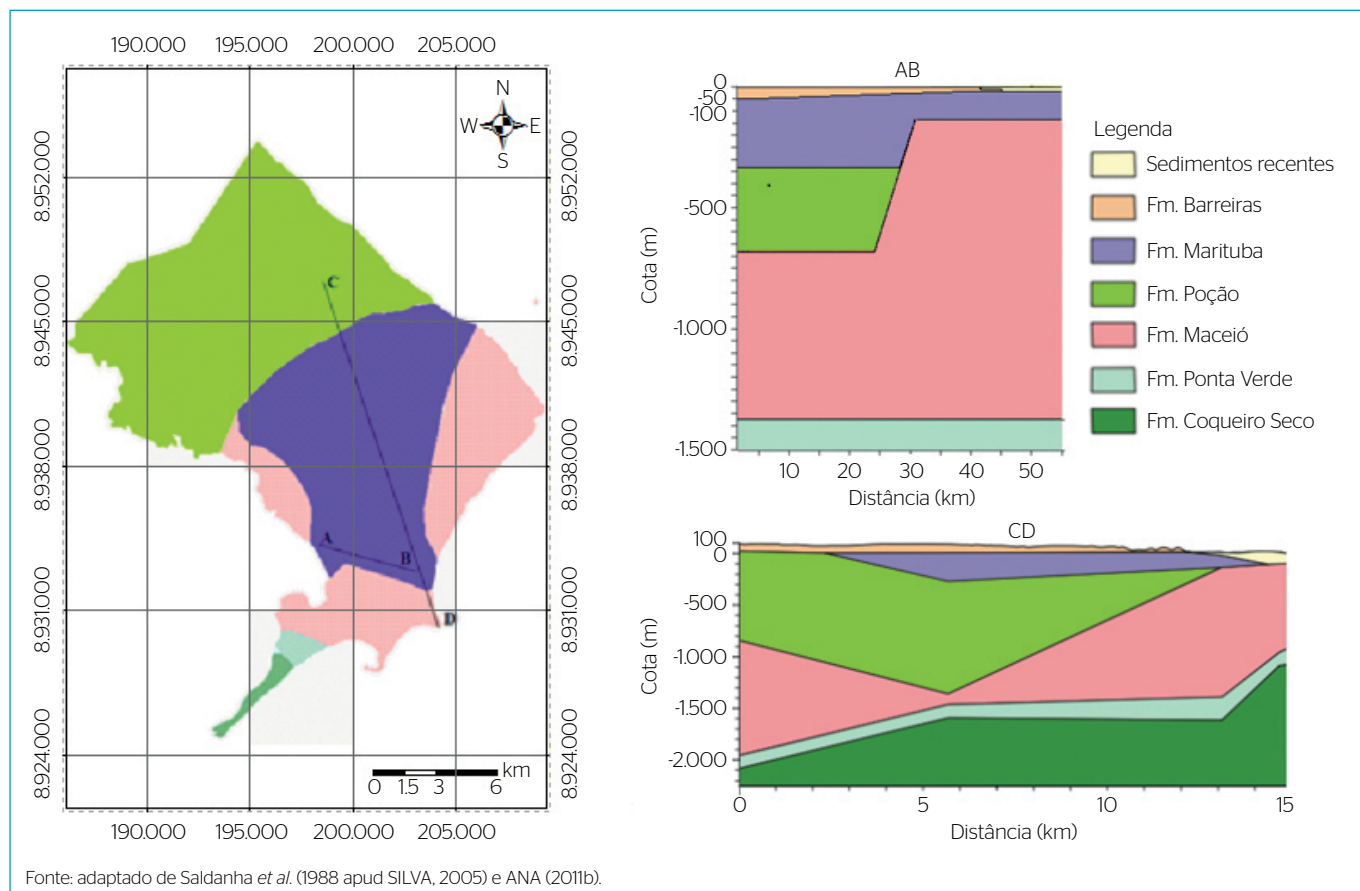


Figura 3 - Síntese do perfil geológico da área de estudo.

Essas amostragens seguiram as diretrizes do Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (CETESB, 2011). A partir disso, foi possível realizar comparações com os parâmetros já estabelecidos em literatura de indicadores de salinização (Tabela 1), bem como produzir gráficos indicadores, em que o *r* representa que o valor do íon está expresso em miliequivalente por litro (meq.L⁻¹) — este leva em consideração a

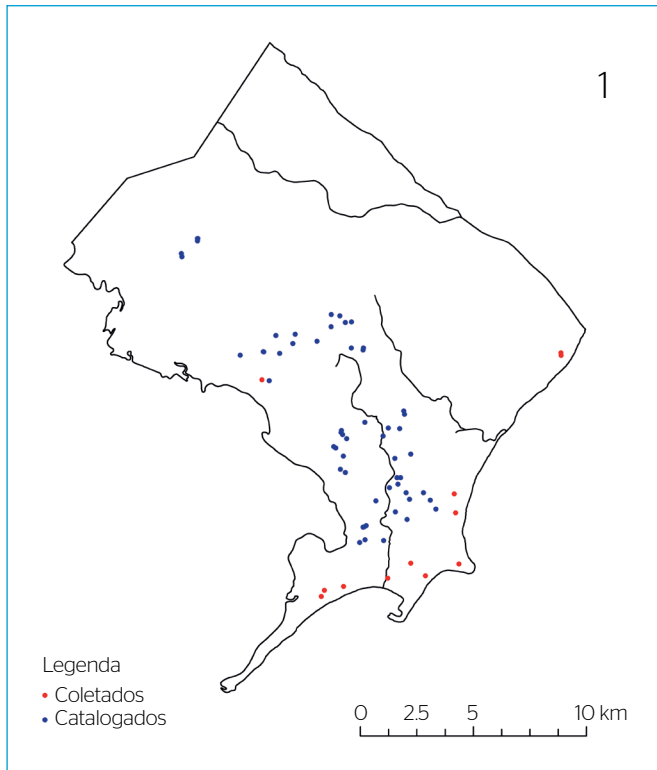


Figura 4 - Localização dos 89 poços catalogados e dos 12 que sofreram coleta.

Tabela 1 - Parâmetros para avaliação da fonte de contaminação da água subterrânea.

Indicador	Referência	Significado	Referência
Sódio (mg.L ⁻¹)	0,1-10	Águas subterrâneas	Custódio e Llamas (1983)
Magnésio (mg.L ⁻¹)	1-40	Águas subterrâneas	Custódio e Llamas (1983)
Cloretos (mg.L ⁻¹)	<100	Águas subterrâneas	Custódio e Llamas (1983)
rMg ²⁺ /rCa ²⁺	>0,9	Contato com água do mar	Hem (1985)
rCl/rHCO ₃	0,1-5	Águas continentais	Custódio e Llamas (1983) e Hem (1985)
Na/Cl	<0,557	Intrusão da água do mar	Shammas e Jacks (2007)
Mg/Cl	0,05-0,14	Contaminação por água do mar	Olofsson (1996) e Shammas e Jacks (2007)

concentração do soluto iônico em peso e a equivalência química e é dado pela Equação 1:

$$n^{\circ} \left(\frac{meq}{L} \right) = \frac{C}{\frac{PM}{V}} \quad (1)$$

Em que:

C = concentração (mg.L⁻¹);

PM = peso molecular;

V = valência (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983).

Nesse sentido, foi considerado como 100% de probabilidade de indício de intrusão salina quando os valores dos 7 parâmetros fossem superados em determinado poço, diminuindo para 0% os indícios dessa intrusão quando nenhum deles fossem superados.

Ademais, foi considerado na avaliação o valor de nitrato (NO₃⁻) para verificar possíveis interferências no valor de cloreto, pois, segundo Shammas e Jacks (2007), infiltrações de fossas sépticas têm relação com o aumento nas concentrações de cloretos.

Modelo numérico de fluxo e densidade variável de água subterrânea

O código SEAWAT (GUO & BENNETT, 1998; GUO & LANGEVIN, 2002) é acoplado a equações de transporte e fluxo de dois códigos largamente aceitos e utilizados, MODFLOW (MCDONALD & HARBAUGH, 1988; HARBAUGH *et al.*, 2000) e MT3DMS (ZHENG & WANG, 1999), com algumas modificações para simular os efeitos da variação da densidade no fluxo de águas subterrâneas.

A modelagem do fluxo subterrâneo partiu de informações do nível estático de 231 poços distribuídos ao longo da RMM e, para modelagem da concentração salina, foram utilizados os dados qualitativos de sólidos totais dissolvidos (STD).

As condições de contorno da área de estudo são bem definidas por contornos físicos, com condições de contorno do Tipo 1 (Dirichlet): a carga hidráulica é especificada no contorno (Figura 1). As cargas hidráulicas variaram ao longo dos contornos e foram estimadas com base em observações de campo, tais como relevo e níveis estáticos de poços de observação. As condições de contorno e respectivas faixas de valores de cargas hidráulicas, em metros, adotadas foram Lagoa e Rio Mundaú (20 – 4), Rio Pratygy (60 – 5), Oceano Atlântico (0), Falha Geológica (130 – 20), o Rio Messias (95 – 20), o Rio Jacarecica (60 – 8) e o Rio Reginaldo (50 – 1).

O domínio do modelo foi refinado em 24 camadas com espessura variável em função da topografia, na qual cada uma representa, em média, 3% da profundidade. Variações na taxa de recarga por regiões na RMM não resultaram em alterações relevantes no modelo, de acordo com simulações realizadas, sendo, portanto, utilizado um valor fixo para toda a região de 300 mm.ano⁻¹. O modelo foi calibrado objetivando uma

raiz média quadrática ou valor eficaz (*root mean square* — RMS) ≤ 20 ; dessa forma, tiveram-se os seguintes valores finais dos parâmetros: a condutividade se manteve numa faixa de variação entre 10^{-3} e 10^{-5} cm.s⁻¹ (FETTER, 1988; MARQUES & MARQUES, 2005; ANA, 2011a); a porosidade efetiva foi fixada em 0,15 e a total, em 0,3 para todas as camadas do modelo; e o armazenamento específico para a formação Barreiras-Marituba foi fixado em 1.10^{-5} m⁻¹ (MENEZES JR., 2011).

O valor de salinidade é muito próximo ao de concentração dos STD (GUO & LANGEVIN, 2002; SEFELNASR & SHERIF, 2014). A água subterrânea, mesmo em seu estado natural, apresenta sais dissolvidos, que, com as diversas ações antrópicas, sofrem variações. Neste trabalho, a água subterrânea foi considerada com uma concentração inicial de sal variável espacialmente, de acordo com interpolação de dados observados entre os anos de 2014 e 2015, utilizando o *software* ArcGis10.2[®]. Para isso, os valores de condutividade elétrica foram convertidos em STD seguindo a metodologia descrita por Cobaner *et al.* (2012).

Simulação de cenários

Foram considerados dois cenários, para o ano de 2025, para avaliar a hipótese do avanço da cunha salina. Ambos elaborados em função do aumento da exploração e das consequentes mudanças que podem ocorrer no sistema aquífero. Nos dois, foram adicionados poços com profundidades que variaram de 20 a 300 metros, aproximadamente.

Cenário 1

Este cenário contempla poços outorgados até o ano de 2015, com vazões que variam entre 24 e 960 m³.d⁻¹.

Cenário 2

Foram inseridos novos poços de bombeamento com base nas vazões provenientes de licenças de obras hídricas já solicitadas, totalizando 100 unidades, e 36 poços na região do litoral norte do domínio, que se encontra em plena expansão urbana (Figura 5).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização da qualidade da água subterrânea e avaliação dos indicadores

Os dados qualitativos mostraram que há uma predominância de compostos na ordem de Na⁺>Mg²⁺>Ca²⁺>K⁺ para os cátions e Cl⁻>HCO₃⁻>SO₄²⁻<NO₃⁻ para os ânions entre os anos de 2012 e 2014, mesmo comportamento observado por Chandrajith *et al.* (2014) e Singaraja *et al.* (2014), que também estudaram áreas com geomorfologia sedimentar. Para o ano de 2015, houve uma inversão nessas ordens de predominância, sendo CA²⁺>Na⁺>Mg²⁺>K⁺ para os cátions e HCO₃⁻>Cl⁻>SO₄²⁻>NO₃⁻ para ânions. Segundo ANA (2011a), quando há predominância do bicarbonato sobre

o sulfato e o cloreto, significa que a água não é de circulação regional com longos tempos de residência, pois a ordem normal de predominância para água de circulação regional é Cl⁻>SO₄²⁻>HCO₃⁻.

É importante salientar que rochas calcárias são fontes do íon carbonato, pois são constituídas predominantemente de CaCO₃ (ANA, 2011a). Através do perfil geológico da cidade de Maceió sintetizado por Marques (2004), pode-se perceber a presença de calcário na formação geológica, principalmente na região da linha do mar até uma profundidade de aproximadamente 1.300 m, o que pode influenciar nas concentrações de HCO₃⁻.

Tendo como referência os valores dos parâmetros estabelecidos na Tabela 1, considerando toda a área do domínio, as variáveis de Na⁺ e rMg²⁺/rCa²⁺ foram as que tiveram seu valor padrão para água subterrânea mais ultrapassados, porém, na região costeira, além desses índices, outros que se destacaram foram os de Cl⁻ e Na/Cl.

As análises dos indicadores foram baseadas nos valores de referência apresentados na Tabela 1 e demonstraram que 2, 5, 7, 28 e 58% dos poços apresentaram 85, 14, de 71 a 85, 28 e de 42 a 57% de chances de apresentarem intrusão salina, respectivamente. Existem poços instalados próximos à linha do oceano que possuem menos de 42% de chance de intrusão salina, o que pode ter ocorrido dada a profundidade do poço — poços rasos nessa região possuem menos chances de sofrer salinização do que os profundos.

Sódio, magnésio e cloretos

As variáveis de sódio, magnésio e cloretos indicaram a possibilidade de intrusão salina em aproximadamente 78, 14 e 17% dos poços, respectivamente.

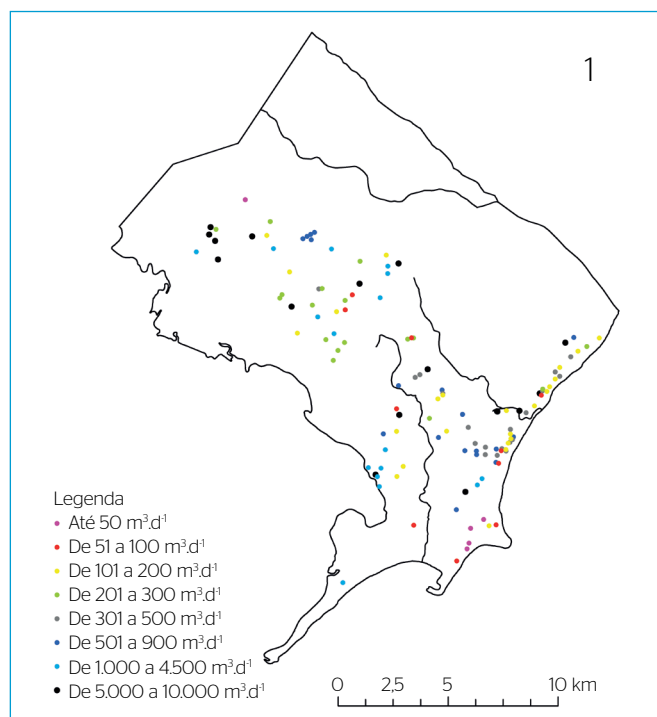


Figura 5 - Poços com vazões de licença de obra hídrica e vazões hipotéticas que foram adicionadas ao segundo cenário.

Relação Na/Cl

Segundo Shammas e Jacks (2007), a relação Na/Cl pode indicar intrusão salina e descarga de água doce, sendo que valores abaixo de 0,557 indicam a primeira e aqueles acima de 0,604, a segunda. Observando a Figura 6, que apresenta a relação entre Na/Cl e Cl, pode-se perceber que há uma distribuição de poços nas duas faixas de valores. No entanto, as análises realizadas no ano de 2015 apresentaram aproximadamente 91% dos poços na faixa abaixo de 0,557, sendo indicado com intrusão salina. Além disso, percebe-se que mesmo os poços que possuem valor inferior a 100 mg.L⁻¹ de Cl, valor considerado por Custódio e Llamas (1983) como padrão para águas subterrâneas doces, são classificados com intrusão salina por Shammas e Jacks (2007).

Relação Mg/Cl

Quando a relação Mg/Cl é próxima ou igual a 0,14, significa que há uma mistura de descarga de água doce e intrusão de água do mar (SHAMMAS & JACKS, 2007), e valores acima de 0,05 significam que há contaminação por água do mar (OLOFSSON, 1996). Esse parâmetro, ao contrário do Na/Cl, teve 33% dos dados de 2015 apresentando contaminação por água do mar, consequentemente, os 67% restantes estariam sofrendo descarga de água doce, o que reduz a possibilidade de mistura com água do mar (Figura 7).

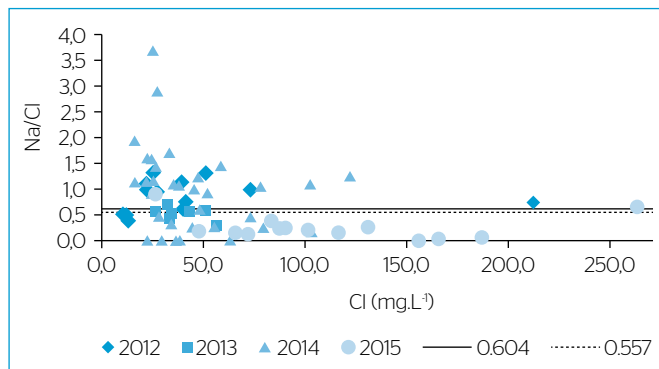


Figura 6 - Gráfico que relaciona o índice Na/Cl versus a concentração de Cl.

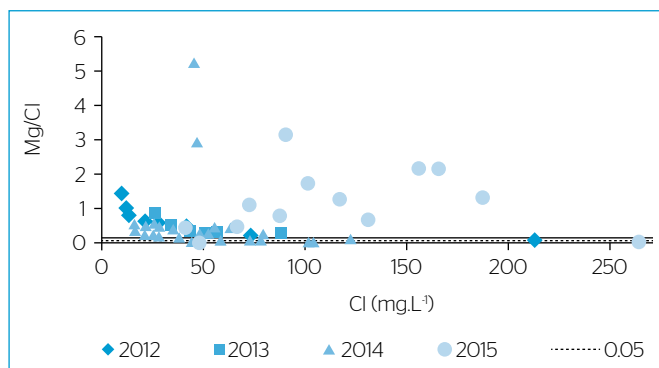


Figura 7 - Gráfico que relaciona o índice Mg/Cl versus a concentração de Cl.

Relação NO₃⁻ e Cl

A deficiência na rede pública coletora de esgoto proporcionou a utilização de técnicas de tratamento de efluentes *in situ* em Maceió, sendo largamente utilizada a fossa séptica/sumidouro e, em alguns casos mais precários, o lançamento direto de efluentes domésticos nas vias públicas e em cursos d'água. Este último é mais observado nas regiões altas do domínio, onde se localiza o tabuleiro costeiro. Em contraste, a área mais próxima ao mar, região baixa da área de estudo, é contemplada por rede pública de esgotamento sanitário, o que não significa ausência de lançamentos diretos. No entanto, em análise realizada por Oliveira *et al.* (2015), foi observado que há menores valores de nitrato em poços de região que conta com rede pública coletora de esgoto, quando relacionado a região que utiliza o sistema de fossa séptica/sumidouro.

A Figura 8 mostra a relação NO₃⁻ e Cl; considerando que os poços do ano de 2015 apresentaram valores mais altos de concentração de cloretos e menor concentração de nitrato e que estão localizados na região que possui rede pública de coleta de esgoto, então se pode afirmar que há maior influência da água do mar do que de esgoto doméstico (SHAMMAS & JACKS, 2007). Os poços dos anos de 2012 a 2014 foram inventariados, estão localizados na região mais alta do domínio em relação ao nível do mar e possuem valores de concentração de nitrato que variam de 2,05 a 146,5 mg.L⁻¹ de NO₃⁻. Do total, 43% dos dados revelam-se superiores a 10 mg.L⁻¹ de NO₃⁻, valor máximo permitido de nitrato para abastecimento humano (Portaria MS nº 2.914/2011) (BRASIL, 2011). Os valores de cloretos variaram entre 10 e 212 mg.L⁻¹, para o mesmo período, todavia apenas 6,8% deles estão acima de 100 mg.L⁻¹. A motivação que pode explicar o alto índice de cloreto observado consiste na influência do esgoto doméstico, que ocorre em decorrência da baixa extensão da rede pública de coleta de esgoto na localidade. Existe ainda um ponto de atenção pelo altíssimo valor de nitrato, 145,5 mg.L⁻¹ de NO₃⁻ (enquanto de cloretos consta 102 mg.L⁻¹), deixando evidente, nessa região, uma grande contaminação por resíduos domésticos, já que esta se localiza no bairro do Jacintinho, em Maceió, onde há grande problemática com lançamento de efluentes domésticos em vias públicas e utilização de fossas sépticas.

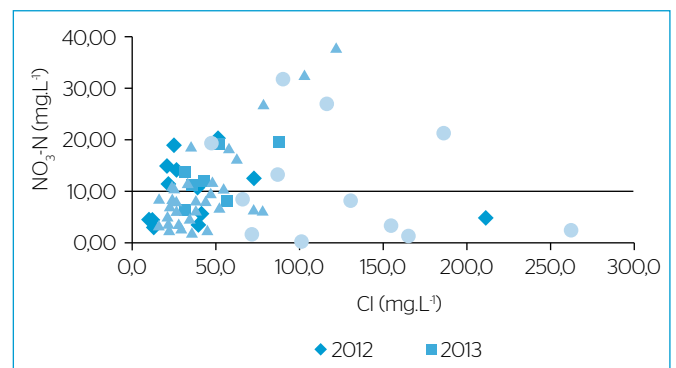


Figura 8 - Gráfico que relaciona o índice NO₃⁻ versus a concentração de Cl.

Modelo de fluxo subterrâneo e concentração salina

O resultado para o modelo de fluxo subterrâneo da área de interesse resultou em maiores cargas hidráulicas partindo da falha geológica à direita do rio Messias e decaindo em direção ao oceano Atlântico. Para calibrar o modelo de concentração salina para o ano de 2015, foram ativados 342 poços de bombeamento, utilizando a concentração inicial interpolada e dados de observação de concentração de STD, obtendo, dessa forma, um coeficiente de correlação de 0,682.

Utilizando o modelo calibrado para o fluxo subterrâneo e a concentração salina foi possível realizar projeções em dois cenários.

Cenário 1

Sem mais acréscimos de poços de bombeamento, utilizando apenas os 342 poços incluídos no modelo representando o bombeamento no aquífero até o ano de 2015 e aplicando um período de mais dez anos, foi possível gerar outra superfície de concentração de STD diferente, na qual ficaram evidentes três regiões com modificação na interface salina (Figura 9).

De acordo com o resultado gerado pelo modelo, é possível observar um avanço da cunha salina principalmente em duas regiões, A e C. Percebe-se também uma mudança na interface entre a água doce e a do mar na região B.

As modificações na interface salina podem ser visualizadas melhor na Figura 10, a qual apresenta em detalhe o ocorrido nas regiões A, B e C. Estas representam as regiões mais críticas para perfuração de novos poços, pois se mostram mais susceptíveis a modificações da zona de mescla.

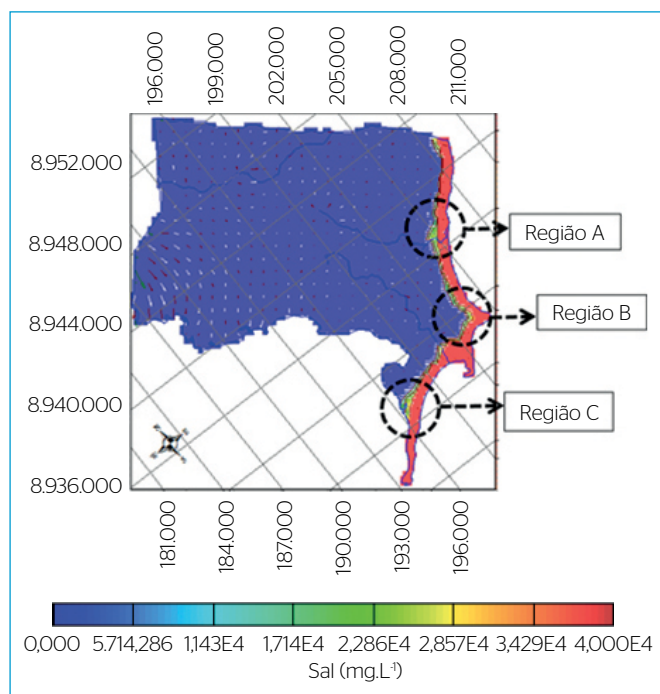


Figura 9 - Mapa de concentração salina para o cenário 1: em destaque as regiões que apresentaram modificações significativas na interface salina. A região A está no exutório do rio Jacarecica.

Confrontando os anos de 2015 e 2025 no mesmo perfil, é possível perceber a diferença existente na interface entre a água doce e a do mar (Figura 11). Observou-se, em um mesmo ponto no modelo, 2 valores de concentração de 444,611 e 3.011,87 mg.L⁻¹ STD para os anos de 2015 e 2025, respectivamente.

Nesse sentido, no ano de 2015 (Figura 11A), já se percebe, no modelo, a formação de cones salinos, o que é agravado na projeção para o ano 2025 (Figura 11B). O cone salino sofre um avanço em direção à costa em 175 m horizontais a uma profundidade de aproximadamente 46 m e verticalmente salta da profundidade de 50 para 41,9 m. Esses fatos corroboram os resultados obtidos por Rocha (2005), que constatou, através do método de Sondagens Elétricas Verticais, a ascensão vertical de cones salinos e o desequilíbrio da zona de mescla. Além disso, foi possível perceber que, a partir do quinto ano de bombeamento, o avanço da cunha salina apresentou comportamento constante, ou seja, estabilizou.

Cenário 2

Novos volumes de retirada de água subterrânea foram inseridos no modelo, tendo como referência as outorgas de obras hídricas e poços hipotéticos baseados na especulação imobiliária para o litoral que abrange toda a porção sudeste do modelo, totalizando 136 perfurações. Houve, dessa forma, uma exploração total de 60.401,07 m³.d⁻¹. No entanto, não foram observadas modificações na interface salina, possivelmente devido às configurações do sistema aquífero, sobretudo a sua profundidade. O sistema adquiriu certa estabilidade e o acréscimo de novos poços de bombeamento não promoveram o avanço da cunha salina além daquele demonstrado no cenário 1.

CONCLUSÕES

Dois métodos de análise foram utilizados neste trabalho com o objetivo de investigar o avanço da cunha salina em aquífero costeiro, através de indicadores hidrogeoquímicos de salinização com base em parâmetros hidrogeoquímicos e por aplicação de modelos computacionais.

Para o caso em estudo, foi possível concluir que os indicadores hidrogeoquímicos são de difícil avaliação quando analisados conjuntamente, por apresentarem resultados divergentes. Poços com concentrações de cloretos abaixo de 100 mg.L⁻¹ apresentaram indícios de contaminação por água do mar, através da análise de outros índices químicos. Notou-se também que as concentrações de cloretos são bastante sensíveis à variação temporal e que na região próxima à linha do oceano Atlântico a concentração de cloretos é pouco influenciada pela concentração de nitrato devido à maior contribuição da cunha salina. Porém, no geral, demonstraram que há contaminação por água do mar no aquífero estudado.

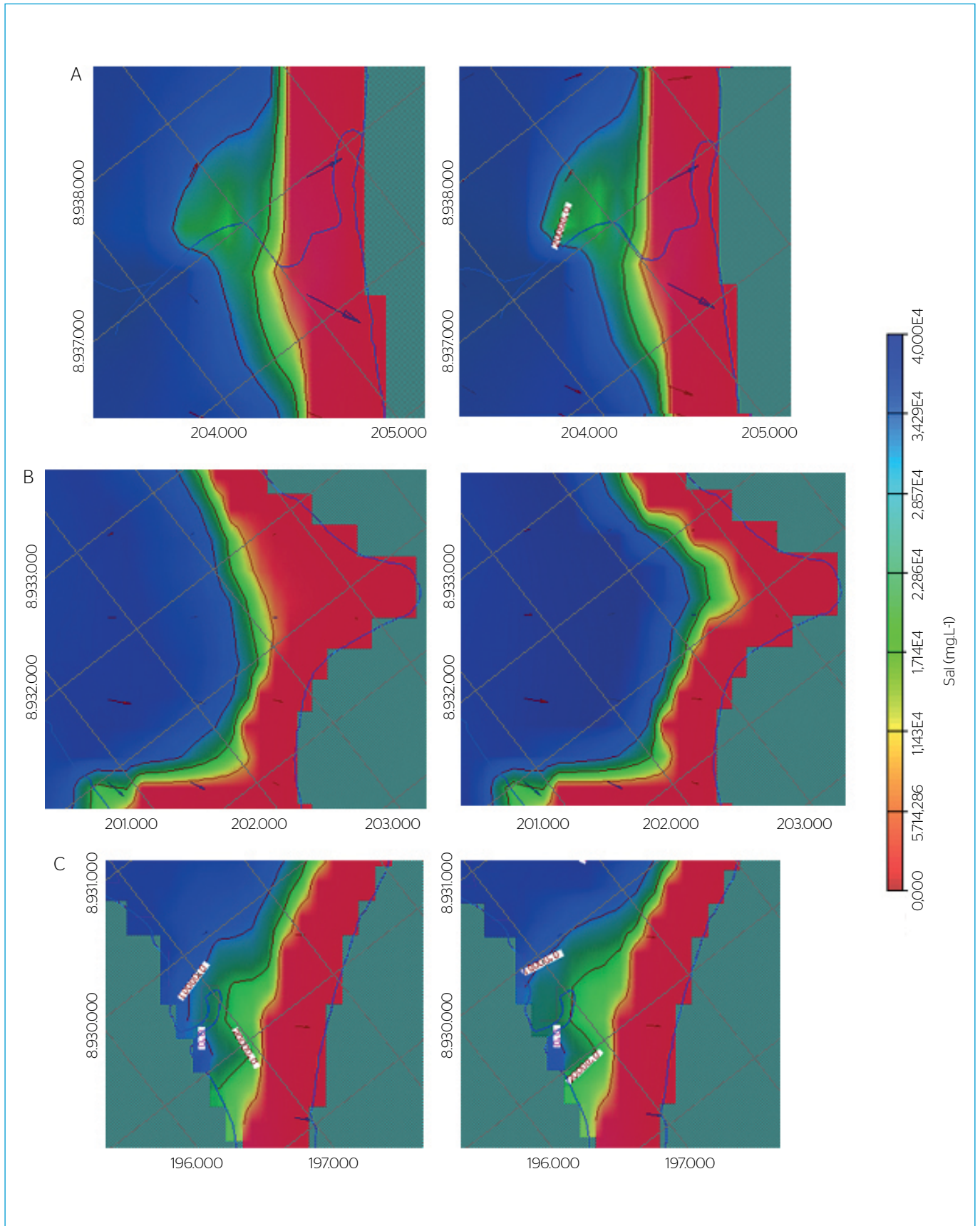


Figura 10 - Destaques das regiões que mais sofreram modificação na interface salina. Regiões A, B e C para o ano de 2015 e projeção para 10 anos depois (2025), respectivamente.

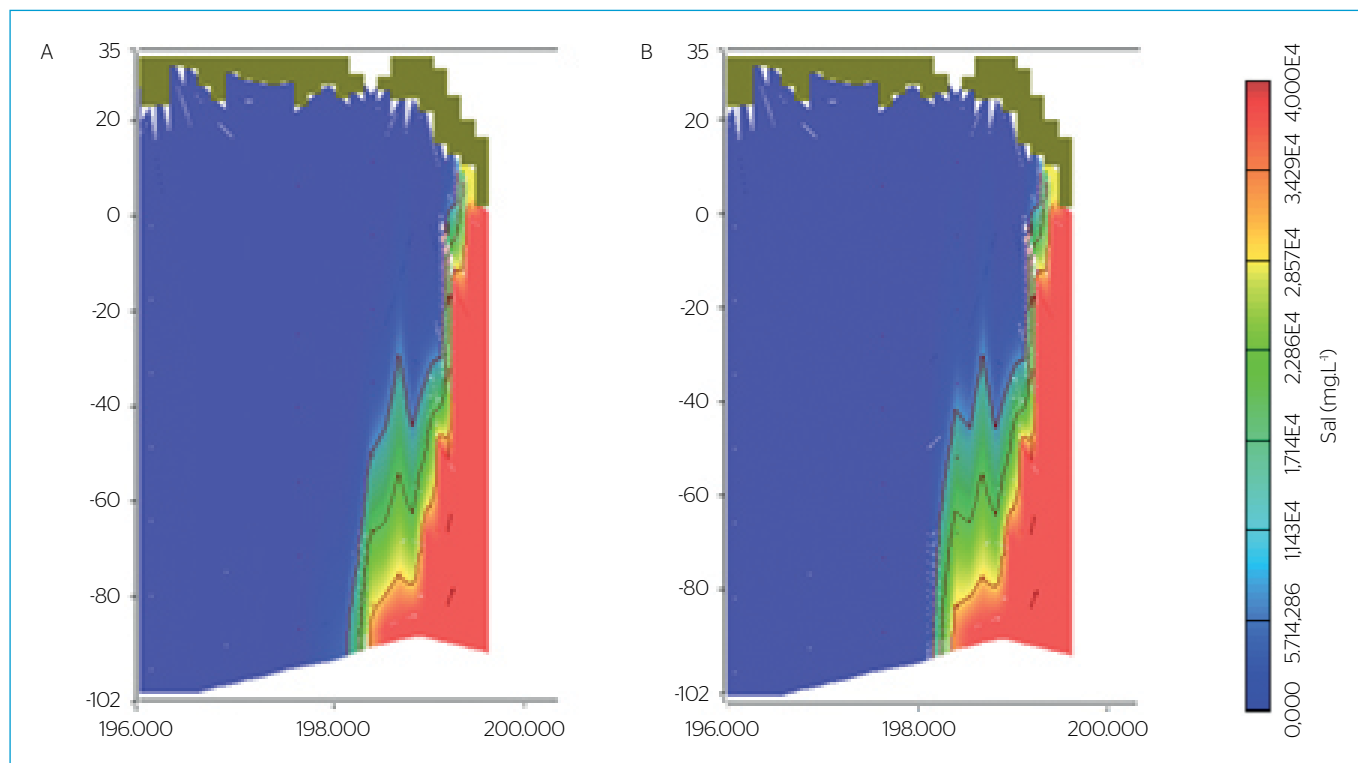


Figura 11 – Perfil de parte do domínio do modelo para o ano de 2015 (A), que já mostra alguns cones salinos de ascensão vertical, e para o ano de 2025 (B), que mostra um agravamento na ascensão vertical dos cones salinos apresentados no ano de 2015.

O modelo não foi direcionado para representar a variação temporal dos indicadores hidrogeológicos existentes no domínio. Todavia, percebeu-se a ascensão de cones verticais salinos na projeção futura simulada (ano de 2025) em relação às condições atuais de formação de cones verticais salinos (ano de 2015), tendo sido mantida a mesma exploração de água subterrânea. A inserção de

novos bombeamentos também foi avaliada em um segundo cenário de simulação com projeção para o ano de 2025. No entanto, não causou grandes modificações na superfície salina projetada, o que pode ser justificado pela magnitude do aquífero; além disso, observou-se que o litoral norte do domínio apresentou baixa interferência na interface salina.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). (2011a) Estudos Hidrogeológicos para Subsidiar a Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Região Metropolitana de Maceió. Brasília: ANA. v. 2.

_____. (2011b) Estudos Hidrogeológicos para Subsidiar a Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Região Metropolitana de Maceió. Relatório Final - Testes de Aquíferos, Potenciometria, Modelo Numérico, Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos e Riscos de Contaminação. Brasília: ANA. v. 3. 65 p.

BATAYNEH, A.T. (2006). Use of electrical resistivity methods for detecting subsurface fresh and saline water and delineating their interfacial configuration: a case study of the eastern Dead Sea

coastal aquifers. *Hydrogeology Journal*, v. 14, p. 1277-1283. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0034-3>

BOUBERBALA, A. (2015). Groundwater salinization in semi-arid zones: an example from Nador plain (Tipaza, Algeria). *Environmental Earth Science*, v. 73, n. 9, p. 5479-5496. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3801-9>

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. (2011) Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. *Diário Oficial da União*.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). (2011) Guia Nacional de coleta preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA.

- CHANDRAJITH, R.; CHATURANGANI, D.; ABEYKOON, S.; BARTH, J.A.C.; GELDERN, R.V.; EDIRISINGHE, E.A.N.V.; DISSANAYAKE, C.B. (2014). Quantification of groundwater-sea water interaction in a coastal sand aquifer system: a study from Panama, Sri Lanka. *Environmental Earth Science*, v. 72, n. 3, p. 867-877. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-3010-y>
- CHOUDHURY, K.; SAHA, D.K.; CHAKRABORTY, P. (2001). Geophysical study for saline water intrusion in a coastal alluvial terrain. *Journal of Applied Geophysics*, v. 46, p. 189-200. [http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851\(01\)00038-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00038-6)
- COBANER, M.; YURTAL, R.; DOGAN, A.; MOTZ, L.H. (2012). Three dimensional simulation of seawater intrusion in coastal aquifers: A case study in the Goksu Deltaic Plain. *Journal of Hydrology*, v. 464-465, p. 262-280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.022>
- CUSTÓDIO, E. (1987). Methods to control and combat saltwater intrusion. In: CUSTÓDIO, E.; BRUGGEMAN, G.A. (Orgs.), *Studies and Reports in Hydrology: Groundwater Problems in Coastal Areas*. Paris: UNESCO. p. 396-433.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. (1983). *Hidrología subterránea*. 2. ed. Barcelona: Omega. 2 v.
- FETTER, C.W. (1988) *Applied Hydrogeology*. 2. ed. Nova York: MacMillan.
- GATTACCECA, J.C.; VALLET-COULOMB, C.; MAYER, A.; CLAUDE, C.; RADAKOVITCH, O.; CONCHETTO, E.; HAMELIN, B. (2009) Isotopic and geochemical characterization of salinization in the shallow aquifers of a reclaimed subsiding zone: the southern Venice Lagoon coastland. *Journal of Hydrology*, v. 378, n. 1-2, p. 46-61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.005>
- GHABAYEN, S.M.S.; MCKEE, M.; KEMBLowski, M. (2006) Ionic and isotopic ratios for identification of salinity sources and missing data in the Gaza aquifer. *Journal of Hydrology*, v. 318, p. 360-373. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.041>
- GUO, W.; BENNETT, G.D. (1998) SEAWAT version 1.1: A computer program for simulations of groundwater flow of variable density. Fort Myers: Missimer International, Inc.
- GUO, W.; LANGEVIN, C. (2002) User's guide to SEAWAT, a computer program for simulation of three-dimensional variable density groundwater flow: techniques of water-resources investigations book 6. In: TIACO3 INTERNATIONAL CONFERENCE. Anais... Palestina/Alicante: U.S. Geological Survey *Intrusion of the Gaza Strip Aquifer*. v. 1. p. 245-254.
- HARBAUGH, A.W.; BANTA, E.R.; HILL, M.C.; MCDONALD, M.G. (2000). MODFLOW-2000, The US Geological Survey modular ground-water model—User Guide to modularization concepts and the ground-water flow process. Reston, VA: U.S. Geological Survey. 121 p.
- HEM, J.D. (1985) *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. Supply Paper 2.254. 3. ed. Estados Unidos: U.S. Geological Survey Water.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Dados históricos. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 10 mar. 2016.
- KERROU, L.; RENARD, P.; TARHOUNI, J. (2010) Status of the Korba groundwater resource (Tunisia): observations and three-dimensional modeling of seawater intrusion. *Hydrology Journal*, v. 18, p. 1173-1190. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-010-0573-5>
- KHASKA, M.; SALLE, C.L.G.L.; LANCELOT, J.; MOHAMAD, A.; VERDOUX, P.; NORET, A.; SIMLER, R. (2013) Origin of groundwater salinity (current seawater vs. saline deep water) in a coastal karst aquifer based on Sr and Cl isotopes. Case study of the La Clape massif (southern France). *Applied Geochemistry*, v. 37, p. 212-227. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.07.006>
- LEE, J.Y.; SONG, S.H. (2007) Evaluation of groundwater quality in coastal areas: implications for sustainable agriculture. *Environmental Geology*, v. 52, n. 7, p. 1231-1242. <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-006-0560-2>
- MARQUES, J.A.F. (2004) *Estudos de Estacas Escavadas de Pequeno Diâmetro, com Bulbos, Instrumentadas em Profundidade, em Terrenos Sedimentares*. 319f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MARQUES, J.A.F.; MARQUES, A.G. (2005) *Prática de Fundações no Estado de Alagoas*. In: ABMS – NÚCLEO NORDESTE (Org.). *Geotecnia no Nordeste*. Recife: Universidade da UFPE. p. 247-264.
- MCDONALD, M.G.; HARBAUGH, A.W. (1988) A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Estados Unidos: U.S. Geological Survey *Techniques of Water-Resources Investigations*. 586 p. <https://doi.org/10.3133/twri06A1>
- MENEZES JR, J.C.M. (2011) *Calibração de um modelo de fluxo subterráneo para a região metropolitana de Maceió*. Monografia (graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió.
- NOBRE, M.M.M.; NOBRE, R.C.M. (2001) *Caracterização hidrogeológica para o Uso Racional e Proteção dos Mananciais Subterrâneos em Maceió-AL*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n. 1, p. 7-20. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrhv6n1p7-20>
- NOBRE, R.C.M. (2006) *Avaliação de risco para uso e proteção de aquíferos*. Estudo de caso: Região Metropolitana de Maceió – AL. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- OLIVEIRA, A.M.; TOLEDO, P.H.O.; SILVA, T.J.M.; FREIRE, C.C. (2015) O efeito do saneamento nas concentrações de nitrato nas águas subterrâneas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO, 4., 2015. Anais... ABAS.
- OLOFSSON, B.O. (1996) Salt groundwater in Sweden-occurrence and origin. In: *SALT-WATER INTRUSION MEETING*, 14., 1996, Malmo. Anais... Malmo. p. 91-100.
- PULIDO-LEBOEUF, P. (2004) Seawater intrusion and associated processes in a small coastal complex aquifer (Castell de Ferro, Spain). *Applied Geochemistry*, v. 19, p. 1517-1527. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.02.004>

- REILLY, T.E.; GOODMAN, A.S. (1985) Quantitative analysis of saltwater-freshwater relationships in groundwater systems - a historical perspective. *Journal of Hydrology*, v. 80, p. 125-160. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(85\)90078-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(85)90078-2)
- ROCHA, W.J.S. (2005) Estudo da Salinização das Águas Subterrâneas na Região de Maceió a partir da Integração de Dados Hidrogeológicos, Hidrogeoquímicos e Geométricos. 193f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- SALDANHA, L.A.R.; CAVALCANTE, A.T.; WANDERLEY, P.R.M.; ROCHA, F.C. (1980). Contribuição da Geologia na Qualificação de Áreas para fins Hidrogeológicos em Alagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1., 1980, Recife. Anais... p. 223-231.
- SEFELNASR, A.; SHERIF, M. (2014) Impacts of seawater rise on seawater intrusion in the Nile Delta Aquifer, Egypt. *Ground Water*, v. 52, n. 2, p. 264-276. <https://doi.org/10.1111/gwat.12058>
- SHAMMAS, M.I.; JACKS, G. (2007) Seawater intrusion in the Salalah Plain Aquifer, Oman. *Environmental Geology*, v. 53, p. 575-587. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0673-2>
- SHERIF, M., EL MAHMOUDI, A.; GARAMOON, H.; KACIMOV, A.; AKRAM, S.; EBRAHEEM, A.; SHETTY, A. (2006) Geoelectrical and hydrogeochemical studies for delineating seawater intrusion in the Outlet of Wadi Ham, UAE. *Environmental Geology*, v.49, p. 536-551. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0081-4>
- SILVA, A. C. (2005) Caracterização do Processo de Salinização do Aquífero Marituba no Bairro do Mutange, Lagoa Mundaú - Maceió - Alagoas. Dissertação (Mestrado) - Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- SILVA, W.F. (2013) Análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na região metropolitana de Maceió. Dissertação (Mestrado) - Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió.
- SINGARAJA, C.; CHIDAMBARAM, S.; ANANDHAM, P.; PRASANNA, M.V.; THIVYA, C.; THILAGAVATHI, R. (2014) A study on the status of saltwater intrusion in the coastal hard rock aquifer of South India. *Environment, Development and Sustainability*, v. 17, p. 443-475. <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-014-9554-5>
- TOLEDO, P.H.O. (2016) Modelagem da pluma de contaminação do nitrato em aquífero urbano considerando os efeitos da sazonalidade do clima em parte da Região Metropolitana de Maceió - AL. Dissertação (Mestrado) - Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió.
- VENGOSH, A.; SPIVACK, A.; ARTZI, Y.; AYALON, A. (1999) Geochemical and boron, strontium, and oxygen isotopic constraints on the origin of the salinity in groundwater from the Mediterranean coast of Israel. *Water Resources Research*, v. 35, n. 6, p. 1877-1894. <https://doi.org/10.1029/1999WR900024>
- ZHENG, C.; WANG, P.P. (1999) MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems. Documentation and User's Guide. Contract Report SERDP-99-1. Estados Unidos: U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center.

