

USO DOS ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE O¹⁸ E H² APLICADOS AO ESTUDO DE SALINIZAÇÃO DE AQUÍFEROS LIVRES

Lucas de Queiroz Salles¹; Thiago dos Santos Gonçalves²; Luiz Rogério Bastos Leal³; Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira⁴

Resumo – A salinização de aquíferos livres é um fenômeno crescente em todo mundo, em especial em zonas áridas e semiáridas, limitando o uso dos recursos hídricos subterrâneos. Esse trabalho discorre sobre a utilização dos isótopos estáveis de O¹⁸ e H² aplicados no entendimento dos processos de salinização, a partir de pesquisas bibliográficas e estudos de casos em todo o mundo. A salinização de aquíferos livres pode ser decorrente de processos naturais e antrópicos, dentre os quais destacam-se os seguintes: (a) intrusão de água salgada (antiga ou moderna); (b) dissolução da diápiros de sal; (c) dissolução salmoura em profundidade; e (d) a evaporação de água de irrigação, entre outros. Vale ressaltar que esses processos não são excludentes e a salinização de aquíferos pode ocorrer pela coalescência dos fatores supracitados. Os isótopos estáveis, juntamente com dados geoquímicos mostraram-se como importantes ferramentas no mapeamento da cunha salina e na identificação dos possíveis processos de salinização.

Palavras-Chave: Salinização de aquíferos; Isótopos estáveis, aquíferos livres.

Abstract - Salinization of unconfined aquifers is a growing phenomenon worldwide, especially in arid and semi-arid zones, limiting the use of groundwater resources. This paper discusses the use of stable isotope O¹⁸ and H² applied to the understanding of the processes of salinization, from literature searches and case studies around the world. The salinization of unconfined aquifers can occur from natural and anthropogenic processes: (a) saltwater intrusion (paleowater or modern); (B) dissolving the salt diapirs; (C) dissolution brine in depth; and (d) irrigation water evaporation, among others. It is noteworthy that these processes are not mutually exclusive and salinization of aquifers can occur by coalescence of the above factors. Stable isotopes, together with geochemical data showed to be important tools in the mapping of the salt wedge and identifying possible salinization processes.

¹ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geologia – Universidade Federal da Bahia, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – Nehma. Rua Barão de Geremoabo, s/n° Campus Universitário de Ondina, CEP: 40.170-020, fone: (71) 32838637. Lucassales2008@gmail.com.

² Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geologia – Universidade Federal da Bahia, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – Nehma. Rua Barão de Geremoabo, s/n° Campus Universitário de Ondina, CEP: 40.170-020, fone: (71) 32838637. T.gon@outlook.com.

³ Professor do Departamento de Geofísica. – Universidade Federal da Bahia, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – Nehma. Rua Barão de Geremoabo, s/n° Campus Universitário de Ondina, CEP: 40.170-020, fone: (71) 32838637. lrogerio@ufba.br.

⁴ Professor do Departamento de Oceanografia. – Universidade Federal da Bahia, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – Nehma. Rua Barão de Geremoabo, s/n° Campus Universitário de Ondina, CEP: 40.170-020, fone: (71) 32838637 & TERRAQUATRO Geologia e Meio Ambiente Ltda. ricardo@terraquatro.com.br.

1. INTRODUÇÃO

O processo de salinização é um fenômeno crescente em todo o mundo (Lannetta e Colonna, 2008), que pode acarretar na desertificação do ambiente e limitar o uso dos recursos hídricos. Uma caracterização qualitativa e quantitativa das águas subterrâneas é essencial para garantir o desenvolvimento sustentável e gestão deste recurso. Uma estimativa confiável da taxa de recarga e quantidade de sais dissolvidos pode ser obtida com base em abordagens clássicas, como o monitoramento do nível de água (Custódio e Llamas, 1983), contudo, a análise da composição isotópica permite uma diferenciação das possíveis fontes de salinização. A composição isotópica da água subterrânea (O^{18} E H^2) é definida pelas assinaturas isotópicas da recarga. Se a maior parte da recarga é derivada de infiltração direta por precipitação, o lençol freático irá refletir a composição isotópica da chuva (Craig, 1961; Dansgaard, 1964; Rozanski *et al.*, 1992; Gourcy *et al.*, 2005), permitindo uma diferenciação segura dos processos de salinização da água subterrânea.

A salinização da água subterrânea pode ser explicada por diversos processos naturais e antrópicos, tais como: (i) intrusão da cunha salina devido à intensa exploração do aquífero (Zhang *et al.*, 2015); (ii) interação com água antigas profundas (Pauwels *et al.*, 2013); (iii) por dissolução de evaporitos (Monjerezi *et al.*, 2011); (iv) evaporação de água doce principalmente em lagos (Carreira *et al.*, 2014); (v) por dissolução da rocha, normalmente associada a aquíferos fissurais e cársticos, devido a composição química dessas rochas e ao fluxo limitado a porosidade secundária e, por vezes, terciária (aquíferos cársticos evoluídos) (Moller *et al.*, 2008; Madioune *et al.*, 2014) ;e (vi) associada a extensa irrigação e uso de fertilizantes (Bauchaout *et al.*, 2008; Cattacceca *et al.*, 2009 ; Carreira *et al.*, 2014). Os processos que definem a origem da salinidade não são necessariamente exclusivos, assim, o estudo da salinização das águas subterrâneas torna-se bastante complexo (Kunar *et al.*, 2015).

Entre os diferentes tipos de abordagens, as técnicas isotópicas são particularmente eficazes na identificação das possíveis fontes de salinização e renovação das águas subterrâneas em todo mundo (Carreira *et al.*, 2014). Neste artigo serão apresentados estudos de casos, onde o principal objetivo foi identificar e compreender a origem dos processos de salinização das águas subterrâneas com o uso dos isótopos estáveis de O^{18} E H^2 .

As diferenças observadas, com relação a razão isotópica na composição das águas subterrâneas é devido a: (i) diferentes episódios de recarga; (ii) recarga a partir de diferentes fontes (por exemplo, águas de rios e de precipitação); e por fim (iii) mistura entre diferentes sistemas aquíferos, o que pode acarretar num desvio isotópico entre as águas subterrâneas e precipitação

local (Kin *et al.*, 2003; Carol *et al.*, 2009; Moussa *et al.* 2001; Vison *et al.*, 2011; Currel 2013; Rina *et al.*, 2013; Shiavo *et al.*, 2013; Stoukes *et al.*, 2013; Carreira *et al.*, 2014; Han *et al.* 2014; Aharez *et al.*, 2015).

1.1 Salinidade

Salinidade, do latim, *salinus*, é o teor de sais dissolvidos em águas naturais, sejam oceanos, lagos, rios ou aquíferos. É descrita como a massa total de sólidos dissolvidos e a massa de água, que lhe serve de solvente (equação 1). Segundo a resolução CONAMA número 357, de 17 de março de 2005, as águas naturais podem ser divididas em três categorias quanto seu teor de sais em:

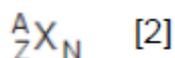
- i - Águas doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 ‰;
- ii - Águas salobras: águas com salinidade superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰;
- iii - Águas salinas: águas com salinidade igual ou superior a 30 ‰.

$$\frac{\text{Massa de sólidos dissolvidos}}{\text{Massa de água}} \% [1]$$

1.2 Isótopos

O estudo isotópico é uma das principais contribuições da ciência moderna para o estudo qualitativo das reservas hídricas. Estas técnicas, juntamente com dados convencionais, permitem obter informações que antes não eram acessíveis por outros métodos. Elas se aplicam aos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e às interações entre estes (Santiago *et al.* 2008).

Isótopos, do grego isos, igual e iopos, lugar, são átomos com mesmo número de prótons e diferentes números de massa. Os isótopos podem ser divididos em estáveis e instáveis, onde, X é o símbolo químico, Z é o número de prótons, N é o número de nêutrons, $A = Z + N$ é o número de massa (equação 2). Isótopos estáveis são aqueles que não se transformam em outro elemento ou por decaimento isotópico, mantendo sua abundância constante na natureza, por exemplo: O^{18} , H^2 , C^{13} , N^{15} , S^{34} . Já os isótopos instáveis ou radiogênicos emitem partículas alfa e beta, decaindo com o tempo e transformando-se em outro elemento químico, não mantendo estável sua abundância natural, são exemplos: H^3 (Tritium), C^{14} , K-Ar/Ar-Ar, Uth-Pb, Rb-Sr, Sm- Nd.



Na elaboração desse referencial teórico foram utilizados os Isótopos estáveis de O^{18} e H^2 (Deutério) como ferramenta para o estudo da salinização em aquíferos livres. Esses elementos correspondem aos isótopos mais pesados do oxigênio e do Hidrogênio (Figura 1). São bons traçadores, pois são Constituintes da própria água, tendo as mesmas propriedades Químicas (Santiago *et al.* 2008), caracterizada assim como um Método não evasivo.

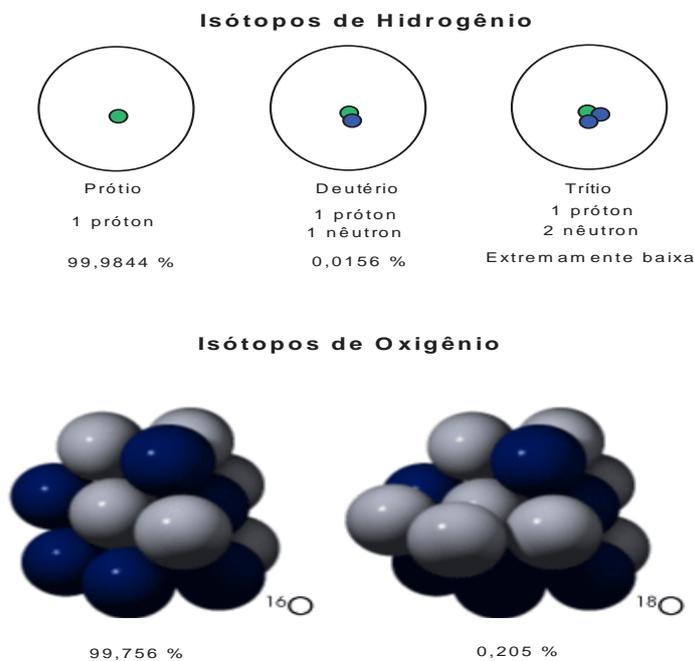


Figura 1: Abundância natural dos isótopos de hidrogênio e oxigênio e suas estruturas atômicas.

1.3 Razão Isotópica

É a variação da abundância dos isótopos estáveis decorrente de mudanças físicas, químicas e biológicas na água. A razão isotópica “R” é a relação entre o número de átomos do isótopo – A - em relação ao total do número de átomos - B (Equação 3).

$$R = \frac{A}{B} \quad [3]$$

1.4 Fracionamento Isotópico

O fracionamento isotópico é a variação dos isótopos estáveis, decorrente, segundo Clark e Fritz (1997), da mudança de fase ou estado, da diferença na taxa de reação química e da diferença na velocidade de difusão de um dado elemento químico. As mudanças na razão isotópica ocorrem, no meio natural, devido a evaporação, condensação e pela perda de isótopos pesados na precipitação. Por se tratar de isótopos estáveis, variações como tal não estão relacionadas ao tempo

ou ao enfraquecimento radioativo natural. A composição isotópica das águas da chuva (Figura 2) são dependentes, dentre outros fatores, da distância à costa, da altitude, da longitude geográfica (Santiago *et al.*, 2008).

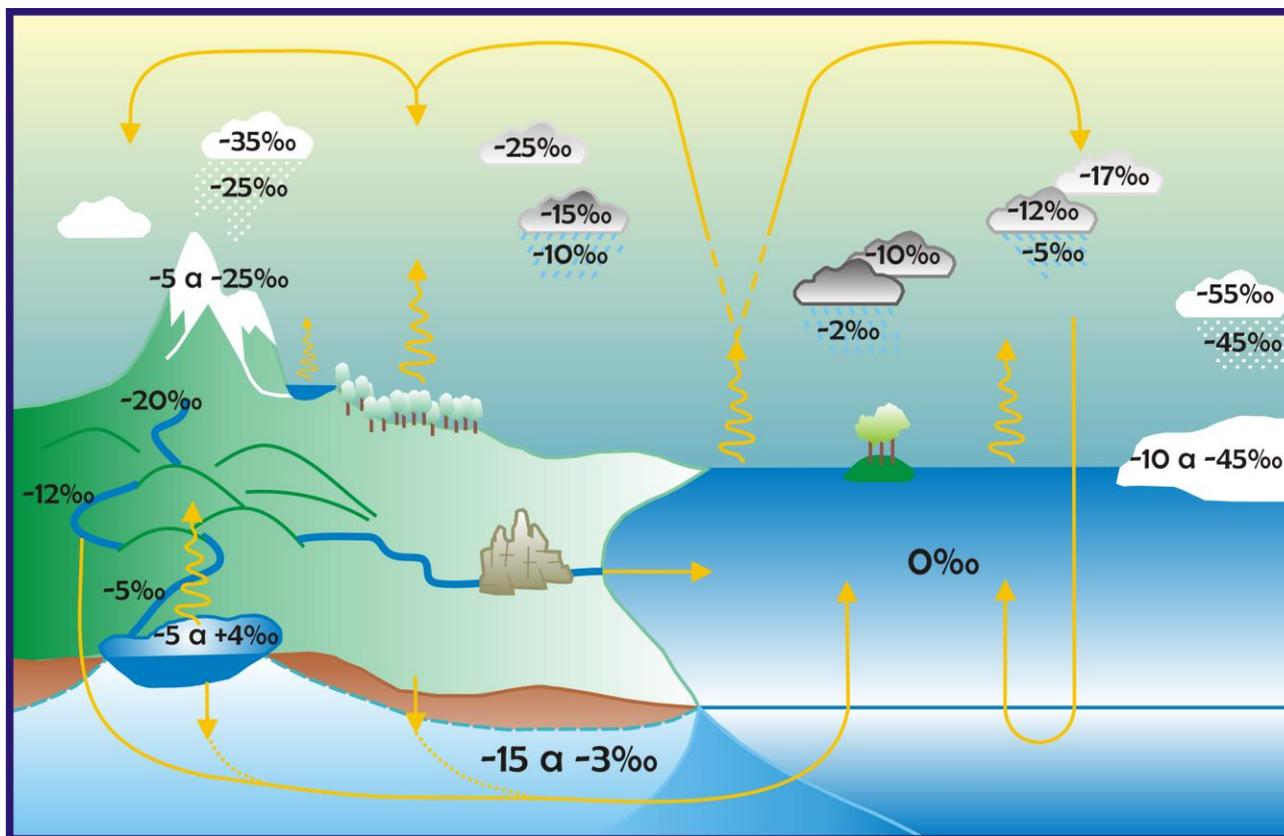


Figura 2: Fracionamento isotópico teórico no ciclo hidrológico. Fonte: Barbosa, 2009.

A separação isotópica é inversamente proporcional a temperatura, sendo mais forte em temperaturas baixas. Em elevadas temperaturas o estado de agitação das moléculas é alto e, conseqüentemente, sua taxa de difusão, o que impossibilitaria seu fracionamento. Na mudança de estado físico do gasoso para o líquido, o vapor remanescente fica progressivamente empobrecido em isótopos pesados. Assim a as primeiras chuvas tendem a ser mais enriquecidas em isótopos pesados que as chuvas finais.

1.5 Padrões

Uma mescla das águas dos oceanos foi o primeiro padrão a ser utilizado internacionalmente, denominado de SMOW (Standart Mean Ocean Water) por Craig (1961). Atualmente, está em uso o padrão V-SMOW, que consiste na mistura sintética da SMOW original, distribuído pela Agencia Internacional de Energia Atômica – IAEA. Outro padrão natural utilizado em medidas de O^{18} é o PDB (Belemnitella Americana de formação de Peedee do Cretácio).

1.6 Reta Meteórica Global

Em 1961 Craig propôs a primeira observação sistemática em escala global das concentrações de O^{18} e H^2 , analisando pouco mais de 400 amostras. Ele observou que esses isótopos apresentam uma relação linear simples (Equação 4), denominada de Reta Meteórica Global (GMWL – Global Meteoric Water Line).

$$\delta D = \delta O18 + 10 \quad [4]$$

Rozanski (1993) determinou uma Reta Meteórica Global (Equação 5) (Figura 3) mais precisa, a partir de uma coleta amostral mais abrangente.

$$\delta D = 8,17 (\mp 0,07) \delta O18 + 11,27 (\mp 0,65) \quad [5]$$

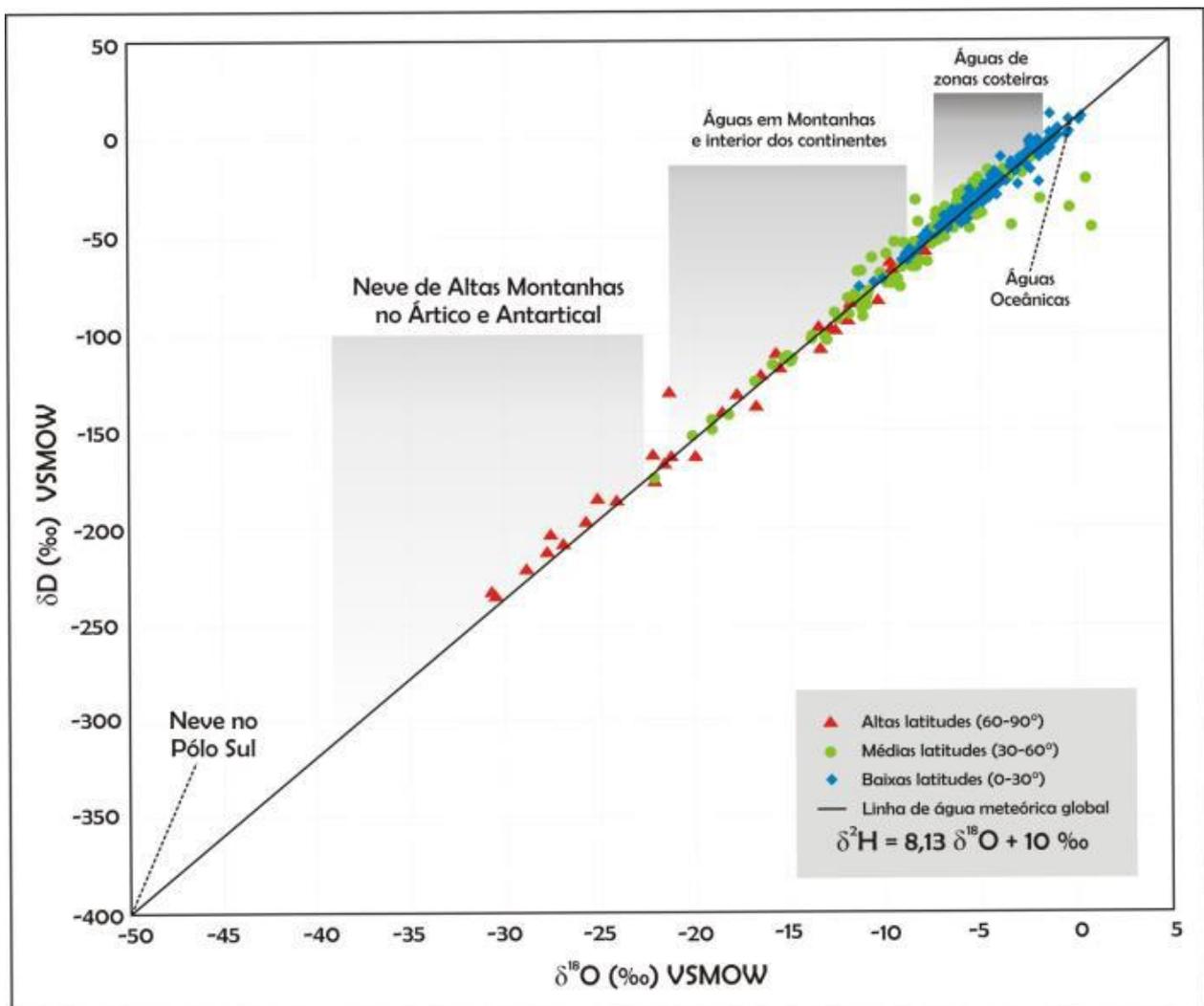


Figura 3: Reta Meteórica Global proposta por Rozanski, 1993. Fonte: Barbosa, 2009.

As moléculas de H^1 e O^{16} são moléculas mais leves que seus respectivos isótopos (H^2 e O^{18}), e conseqüentemente, evaporam mais facilmente (Kehew, 2001). Por esse motivo as águas sujeitas a evaporação tendem a ser mais enriquecidas em moléculas pesadas (H^2 e O^{18}).

1.7 Aquíferos Livres

Um aquífero livre ou freático (Figura 4) é constituído por uma ou mais formações geológicas permeáveis, sejam elas porosas, fissurais ou cársticas. É totalmente aflorante, limitado, em sua seção basal, por uma camada impermeável, e parcialmente saturado em água (Figura 3). Esse tipo de aquífero se encontra em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente.

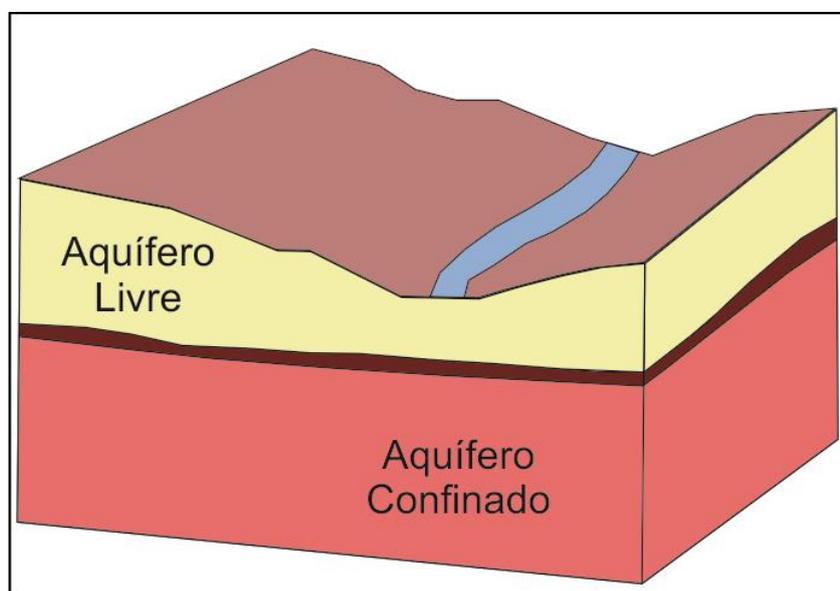


Figura 4: Seção esquemática de um aquífero livre ou freático.

2. Objetivos

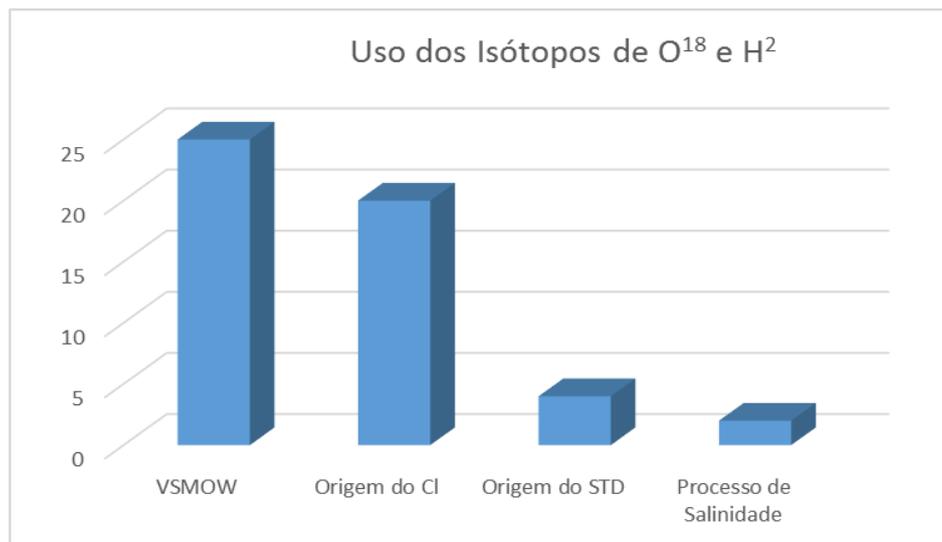
Este trabalho objetiva elaborar uma revisão bibliográfica a respeito do uso de isótopos estáveis de H^2 e O^{18} (deutério) na determinação da origem de sais em aquíferos livres, como subsidio para um plano de manejo integrado dos recursos hídricos subterrâneos.

3. Resultados

Os artigos consultados para elaboração deste trabalho, demonstraram que o principal uso dos isótopos estáveis de O^{18} e deutério foi para confecção de uma reta meteórica local (VSMOW), seguido, em ordem de abundância, na determinação da origem do cloreto, sólidos totais dissolvidos e origem da salinidade (Gráfico 1) (Kim *et al.*, 2003; Moller *et al.*, 2007; Montety *et al.*, 2008;

Bouchaou *et al.*, 2008; Carol *et al.*, 2009; Gattacceca *et al.*, 2009; Rosenthal *et al.*, 2009; Schiavo *et al.*, 2009; Hamouda *et al.*, 2011; Moussa *et al.*, 2011; Monjerezi *et al.*, 2011; Vinson *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012; Matthew Currell *et al.*, 2013; Pauwels *et al.*, 2013; Rina *et al.*, 2013; Stoecker *et al.*, 2013; Carreira *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2014; Madioune *et al.*, 2014; Villanueva *et al.*, 2014; Cary *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015).

Gráfico 1: Principais usos dos isótopos de O^{18} e H^2 no entendimento do processo de salinização em aquíferos livres.



O uso dos isótopos estáveis de O^{18} e deutério mostrou-se uma ferramenta muito importante no entendimento dos processos de salinização, principalmente para aquíferos costeiros (Figura 5), auxiliando no entendimento dos possíveis processos de salinização

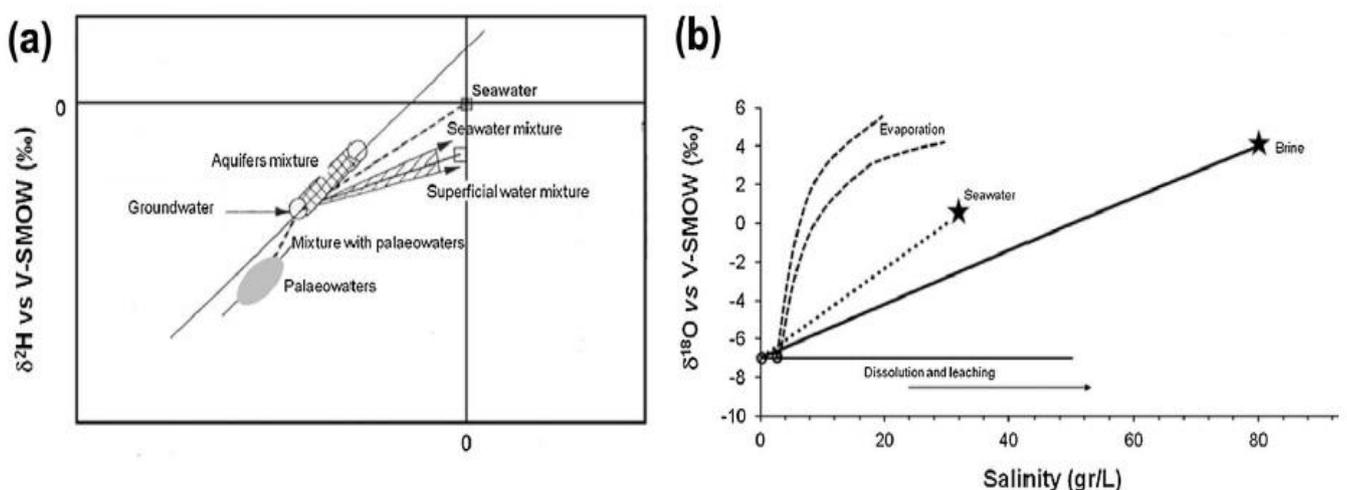


Figura 5: (a) Função entre a composição isotópica do O^{18} e H^2 associada a diferentes processos de salinização da água subterrânea. (b) $\delta^{18}O$ vs. salinidade: mudança na composição isotópica da água atribuída a diferentes processos de salinização. Fonte: Ca

A Figura 5a demonstra uma análise de componentes principais entre a razão isotópica de $\delta O18$ e $\delta H2$ como ferramenta na distinção dos possíveis processos de salinização das águas subterrâneas, sejam por misturas com águas antigas (*paleowater*), misturas entre aquíferos e interação com a água do mar. Já a figura 5b corresponde a uma correlação entre a salinidade e o $\delta O18$, permitindo diferenciar os processos de salinização por evaporação, interação com a água do mar, com salmouras e, por fim a interação água-rocha. Vale ressaltar que os gráficos apresentados na Figura 5 devem ser utilizados apenas no estudo dos processos de salinização em aquíferos costeiros.

A assinatura isotópica da água subterrânea é inerente a razão isotópica da recarga, seja ela por água da chuva ou interação com outro sistema aquífero, com isso é possível sugerir a origem de um dado elemento químico ou parâmetro físico. Se um elemento apresenta forte correlação linear o $\delta O18$ ou $\delta H2$ implica que sua concentração ocorre devido a evaporação da água na zona vadosa (não saturada) e consequente reconcentração, como exemplificado na figura 6.

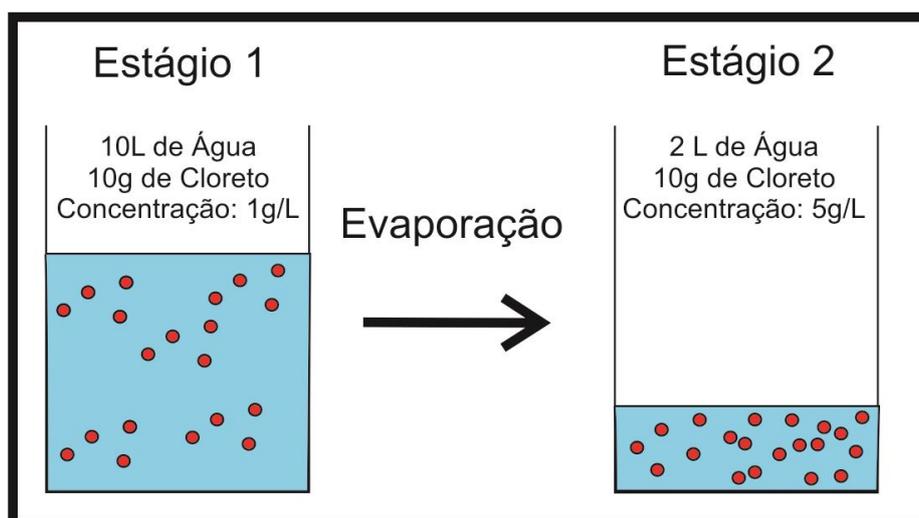


Figura 6: Exemplo do aumento na concentração de cloreto por evaporação.

3.1 Determinação da origem do Cloreto

Uma elevada correlação linear entre os teores de cloreto na água e sua assinatura isotópica ($\delta 18O$ e δD), inerente da água da chuva - quando não há interação com outro sistema aquífero - sugere que as concentrações desse elemento é consequente da evaporação (Figura 7). Já um baixo coeficiente de correlação sugere que a concentração desse elemento se dá pela interação água-rocha (Figura 8).

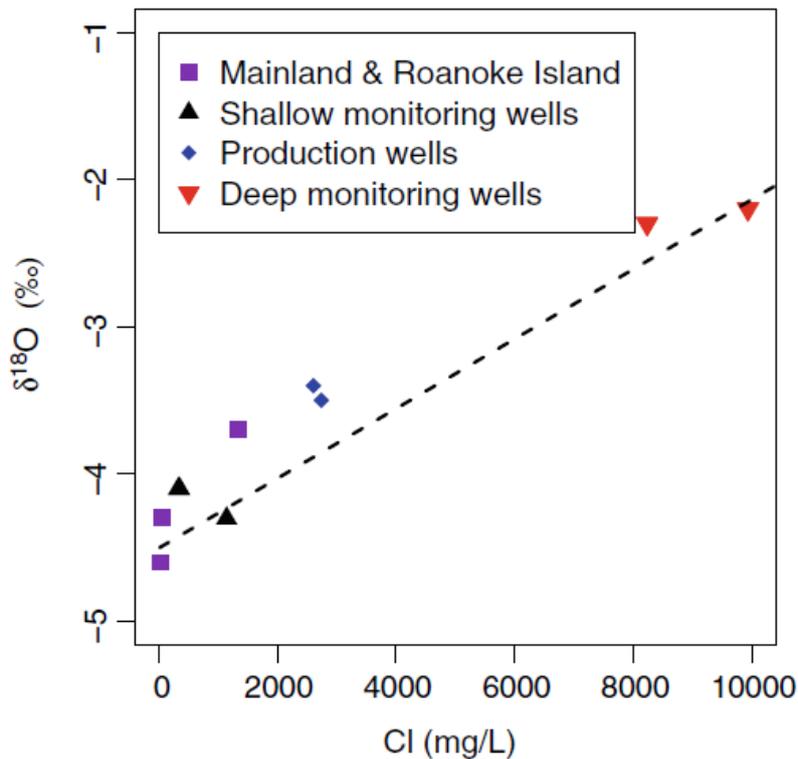


Figura 7 Correlação entre Cl- x $\delta^{18}\text{O}$ para um aquífero sedimentar siliciclástico do cretáceo, Mioceno e Quaternário, Sudeste dos Estados Unidos. Fonte: David et al. (2011).

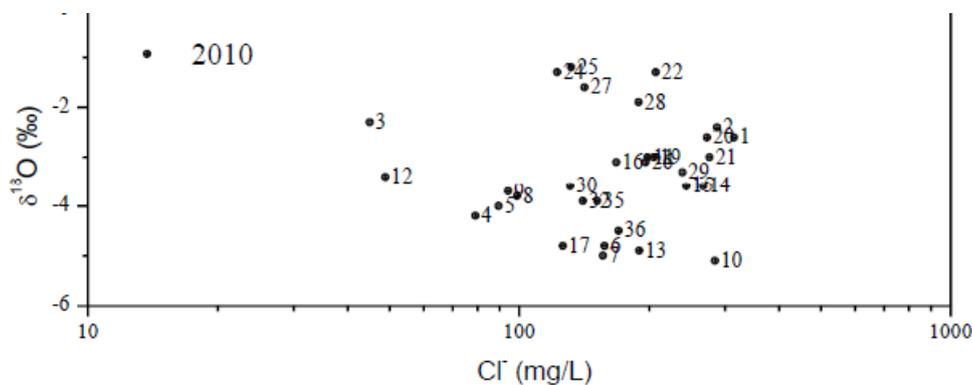


Figura 8: Representação gráfica das variações de Cl- x $\delta^{13}\text{C}$ para água do aquífero cárstico de Irecê - Bahia. Fonte: modificada de Villanueva et al. (2014).

3.2 Determinação da origem dos Sólidos Totais Dissolvidos – STD

Sólidos Totais Dissolvidos é o peso total dos constituintes minerais presentes na água, por unidade de volume. Representa a concentração de todo o material dissolvido na água, seja ou não volátil (Custodio, 1995; Szikszay, 1993; Mestrinho, 2008). Uma correlação entre o STD e a assinatura isotópica da água pode sugerir a origem desses constituintes, seja por evaporação da água na zona vadosa ou pela interação água-rocha (Figura 9).

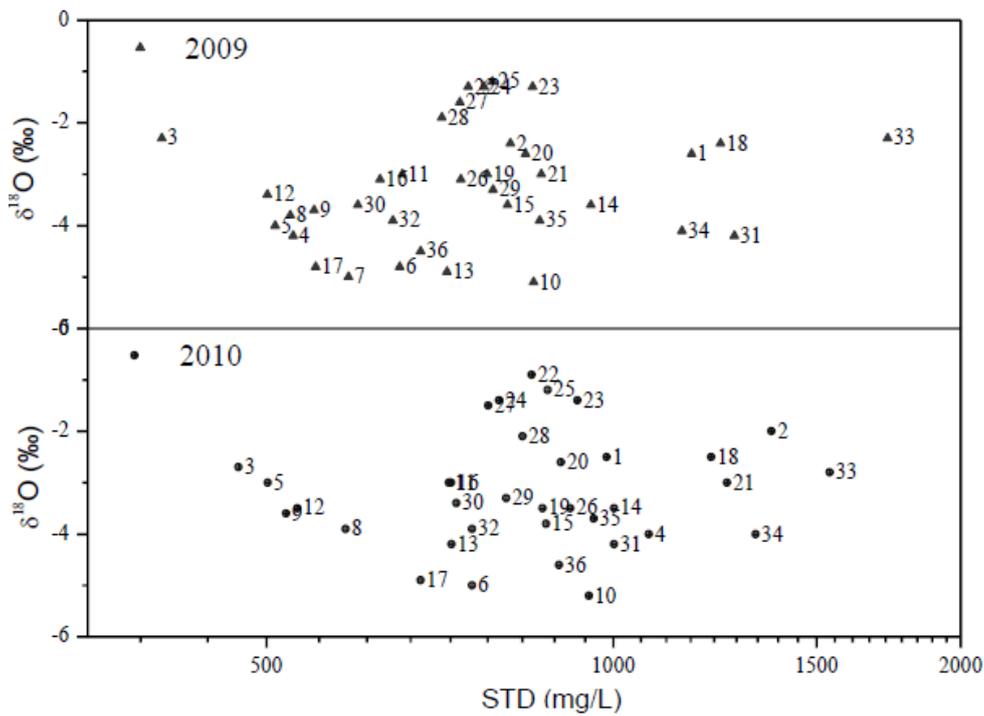


Figura 8: Representação gráfica das variações de (a) Cl⁻ x δ¹⁸O e (b) STD x δ¹⁸O referente às campanhas de 2009 e 2010, para o aquífero carbonático de Irecê. Fonte: Villanueva et al. (2014).

Quando as assinaturas isotópicas dos diferentes sistemas em estudo são bem conhecidas, essa correlação pode sugerir uma interação com a água do mar ou com outro Sistema aquífero (Figura 10).

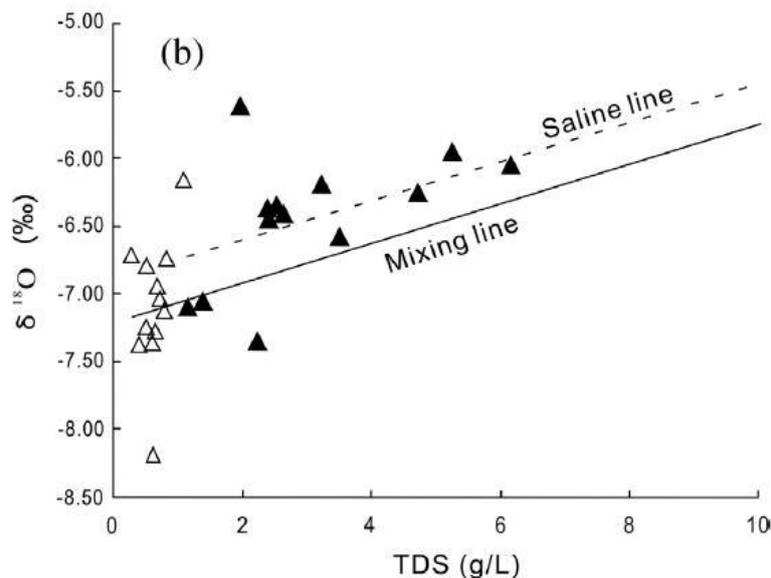


Figura 9: Representação gráfica das variações STD x δ¹⁸O. Fonte: Zhang et al. (2015).

3.3 $\delta O18$ Vs Condutividade elétrica

A condutividade elétrica – CE - é a medida da capacidade da água em conduzir corrente elétrica, essa propriedade está diretamente ligada com o teor de sais dissolvidos sob a forma de íons (Custodio, 1995; Szikszay, 1993; Mestrinho, 2008). A salinidade (S) pode ser calculada de forma Empírica a partir da condutividade elétrica (Equação 6) (Szikszay, 1993).

$$S = 0,0080 - 0,01692\sqrt[3]{k^{15}} + 25,3581k^{15} + 14,0941\sqrt[3]{k^{15}} - 7,0261\sqrt[3]{k^{15}} + 2,7081\sqrt[3]{k^{15}} \quad [2]$$

Com isso, Kumar (2015) propôs uma correlação entre o O18 e a CE afim de sugerir os possíveis processos de salinização. Em seu estudo foi possível caracterizar quando o processo de salinização é fruto da evaporação ou da interação água-rocha (dissolução da rocha).

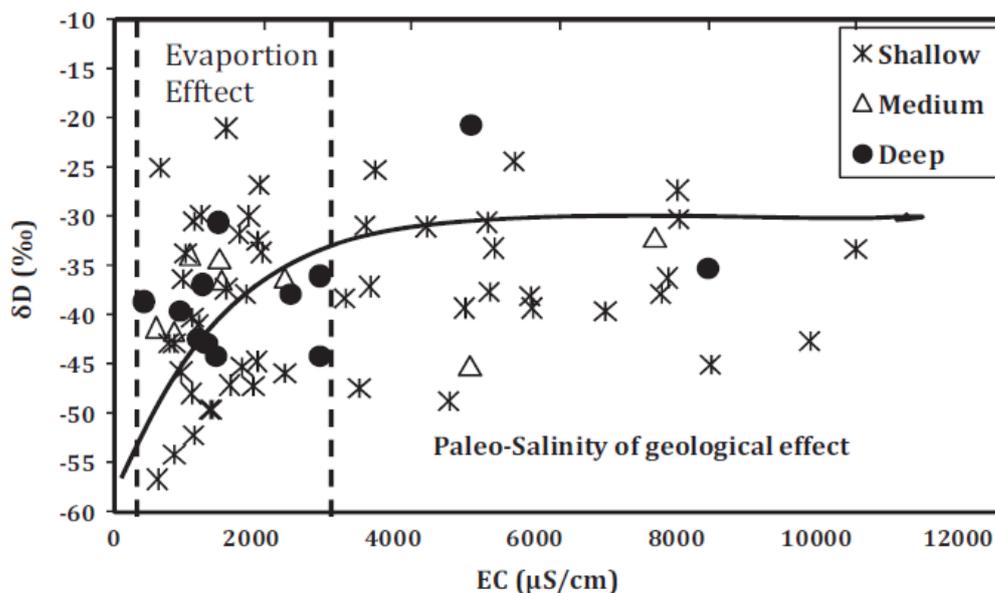


Figura 10: Correlação entre O18 Vs CE para determinar as origens da salinidade em aquíferos fissurais. Fonte: Kumar et al. (2015).

4. Conclusões

O uso integrado da geoquímica e de métodos isotópicos mostrou-se uma importante ferramenta para a modelagem e entendimento dos processos de salinização da água subterrânea, principalmente quando há deterioração da qualidade da água pela super exploração desses recursos em zonas costeiras.

Os isótopos estáveis são um importante método de rastreamento da cunha salina e na identificação dos processos que podem ser responsáveis pela salinização em aquíferos costeiros. O

uso conjunto entre os isótopos de O18 e H2, os parâmetros físicos (condutividade elétrica), e químicos (por exemplo, Cl), pode evidenciar claramente uma mistura entre a água do mar e águas continentais.

Por fim, esse método de pesquisa pode ainda sugerir a origem de diversos sais dissolvidos em água, principalmente o cloreto, mostrando-se de suma importância na elaboração de um plano de gestão para recursos hídricos subterrâneos.

Deste modo, a inclusão da análise de isótopos estáveis em campanhas de monitoramento das águas subterrâneas em regiões semiáridas pode constituir em uma ferramenta relevante de avaliação e gestão destes mananciais hídricos.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ M. P.; DAPENA C.; BOUZA P. J.; RIOS I.; HERNANDEZ M. A.; **Groundwater salinization in arid coastal wetlands: a study case from Playa Fracasso, Patagonia, Argentina.** Environ Earth Sci 73 págs 7983–7994. 2015.

BARBOSA N. S. **Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia na Região das Bacias Hidrográficas dos Rios Formoso e Arrojado, Oeste do Estado da Bahia.** Dissertação de mestrado. CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA. 2009.

BOUCHAOU L.; MICHELOT J.L., VENGOSH A.; HSISSOU Y.; QURTOBI M.; GAYE C.B.; BULLEN T.D.; ZUPPI G.M. **Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss–Massa aquifer, southwest of Morocco.** Journal of Hydrology 352, págs. 267– 287. 2008.

CAROL E., KRUSE E.; MAS-PLA J. **Hydrochemical and isotopic evidence of ground water salinization processes on the coastal plain of Samborombón Bay, Argentina.** Journal of Hydrology 365 págs. 335–345. 2009.

CARREIRA P. M.; MARQUES J. M., NUNES D. **Source of groundwater salinity in coastline aquifers based on environmental isotopes (Portugal): Natural vs. human interference. A review and reinterpretation.** Applied Geochemistry 41 163–175. 2014.

CARY L.; GIRAUD E. P.; BERTRAND G.; KLOPPMANN W.; AQUILINA L; MARTINS V.; HIRATA R.; MONTENEGRO S.; PAUWELS H.; CHATTON E.; FRANZEN M.; AUROUET A. **Origins and processes of groundwater salinization in the urban coastal aquifers of Recife (Pernambuco, Brazil): A multi-isotope approach.** Science of the Total Environment 530–531, págs. 411–429. 2015.

CLARK, I. D., AND P. FRITZ. **Environmental isotopes in hydrogeology.** CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 1997.

CRAIG, H. **Isotopic variations in meteoric waters.** Science 133 (3465), 1702– 1703. 1961.

CURRELL M.; CENDÓN D. I.; CHENG X. **Analysis of environmental isotopes in groundwater to understand the response of a vulnerable coastal aquifer to pumping: Western Port Basin, south-eastern Australia.** Hydrogeology Journal 21, págs1413–1427. 2013.

CUSTODIO, E. Notas sobre hidroquímica. Barcelona: Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas. 1965.

CUSTÓDIO, E., LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterránea**, second ed., Barcelona, 1157p. .1983.

DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. Tellus XVI 4, 436–468. 1964.

GATTACCECA J. C.; COULOMB C. V.; MAYER A.; CLAUDE C., RADAKOVITCH O.; CONCHETTO E.; HAMELIN E. **Isotopic and geochemical characterization of salinization in the shallow aquifers of a reclaimed subsiding zone: The southern Venice Lagoon coastland.** Journal of Hydrology 378, págs 46–61. 2009.

GOURCY, L.L., GROENING, M., AGGARWAL, P.K. **Stable oxygen and hydrogen isotopes in precipitation.** In: Aggarwal, P.K., Gat, J.R., Froehlich, K.F.O. (Eds.), Isotopes in the Water Cycle. Past Present and Future of a Developing Science. Springer, The Netherlands, pp. 39–51. 2005.

HAMOUDA M. F. B; TARHOUNI J.; LEDUC C. • ZOUARI K. **Understanding the origin of salinization of the Plio-quaternary eastern coastal aquifer of Cap Bon (Tunisia) using geochemical and isotope investigations.** Environ Earth Sci 63:889–901. 2011.

HAN D.M.; SONG X.F.; CURRELL M. J.; YANG J.L.; XIAO G.Q. **Chemical and isotopic constraints on evolution of groundwater salinization in the coastal plain aquifer of Laizhou Bay, China.** Journal of Hydrology 508, págs 12–27. 2014.

KIMA Y.; LEEB K. L.; KOHA D. C., LEEA D.; LEEA S, PARKC W., KOHD G., WOOE N. **Hydrogeochemical and isotopic evidence of groundwater salinization in a coastal aquifer: a case study in Jeju volcanic island, Korea.** Journal of Hydrology 270, págs 282–294. 2003.

KUMAR M.; SOMESHWAR R. M.; DEKA J. P.; RAMANATHAN AL.; KUMAR B. **Integrated hydrogeochemical, isotopic and geomorphological depiction of the groundwater salinization in the aquifer system of Delhi, India.** Journal of Asian Earth Sciences 111, págs. 936–947. 2015.

LANNETTA, M.; COLONNA, N. **Project Lucinda – Land Care in desertification Affected Areas From Science Towards Application.** 2008.

MADIOUNE D. H.; FAYE S.; ORBAN F.; BROUYÈRE S.; DASSARGUES A; MUDRY J.; STUMPP S.; MALOSZEWSKI P. **Application of isotopic tracers as a tool for understanding hydrodynamic behavior of the highly exploited Diass aquifer system (Senegal).** Journal of Hydrology 511, págs 443–459. 2014.

MESTRINHO; S. S. P. **Geoquímica de Águas Subterrâneas.** Livro Hidrogeologia Conceitos e Aplicações 3º edição – Revisada e Ampliada. Capítulo 5.2, págs. 359-372. 2008.

MOLLER P.; WEISE Æ S. M.; TESMER Æ M.; DULSKI Æ P.; PEKDEGER Æ A. ; BAYER Æ U; MAGRI, Æ F. **Salinization of groundwater in the North German Basin: results from conjoint investigation of major, trace element and multi-isotope distribution.** Int J Earth Sci (Geol Rundsch), 97:1057–1073. 2008.

MONJEREZI A,C, M.; VOGT R. D.; AAGAARD P.; GEBRU A. G.; SAKA J. D.K. **Using $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\text{d}18\text{O}$ and $\text{d}2\text{H}$ isotopes along with major chemical composition to assess groundwater salinization in lower Shire valley, Malawi.** Applied Geochemistry 26, págs 2201–2214. 2011.

MONTETY V.; RADA KOVITCH O.; COULOMB C. V.; BLAVOUX B.; HERMITTE D.; VALLES V. **Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in a confined coastal aquifer: Case of the Rhône delta (Southern France)**. Applied Geochemistry 23, págs 2337–2349. 2008.

MOUSSA A. B.; ZOUARI K.; MARC V. **Hydrochemical and isotope evidence of groundwater salinization processes on the coastal plain of Hammamet–Nabeul, north-eastern Tunisia Amor Ben**. Physics and Chemistry of the Earth 36 págs. 167–178. 2011.

PAUWELSA H.; AQUILINAB L.; NEGRELA P.; BOURB O.; PERRINA J.; AHMEDC S. **Groundwater salinization in hard-rock aquifers: impact of pumping and vertical transfers**. Earth and Planetary Science 7 págs 660 – 664. 2013.

RINA1 K.; DATTA P. S.; SINGH C. K.; MUKHERJEE1 S. **Isotopes and ion chemistry to identify salinization of coastal aquifers of Sabarmati River Basin**. CURRENT SCIENCE, VOL. 104, NO. 3. 2013.

ROSENTHALA E.; GUTTMANB J.; SABELC R.; LLERD P. **Limiting hydrochemical factors for sustainability of water resources: The Cisjordanian experience**. Chemie der Erde 69, págs. 191–222. 2009.

ROZANSKI, K., ARAGUÁS-ARAGUÁS, L., GONFIANTINI, R. **Relation between long-term of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate**. Science 258, 981–985. 1992.

SANTIAGO M. F. FRISCHKORN H. SILVA C. M. S. V. **HIDROGEOLOGIA CONCEITOS E APLICAÇÕES** 3ª Edição - Revisada e Ampliada. Capítulo 4.3, págs 255 a 270. 2008.

SCHIAVO M.A.; HAUSER S.; POVINEC P.P. **Stable isotopes of water as a tool to study groundwater–seawater interactions in coastal south-eastern Sicily**. Journal of Hydrology 364, 40– 49. 2009.

STOECKER F.; BABEL M. S.; GUPTA A. D.; RIVAS A. A.; EVERS M.; KAZAMA F. NAKAMURA T. **Hydrogeochemical and isotopic characterization of groundwater salinization in the Bangkok aquifer system, Thailand**. Environ Earth Sci 68, págs.749–763. 2013.

SZIKSZAY, M. **Geoquímica das Águas**. Boletim IGUSP. Série Didática. São Paulo, v. 5, p. 1-166. 1993.