

Artigos

Concepção de um índice elétrico de carstificação

Conceiving an electrical karstification index

Edilton Carneiro Feitosa¹✉

¹ Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE

✉ ediltonf@yahoo.com.br

Palavras-chave:

Aquífero.
Calcário.
Eletroresistividade.
Carstificação.
Poços.

Keywords:

Aquifer.
Limestone.
Electroresistivity.
Karstification.
Wells.

Revisado por pares.
Recebido em: 19/08/2019.
Aprovado em: 24/11/2019.

Resumo

A pesquisa enfoca o comportamento elétrico dos aquíferos cársticos quando submetidos a uma corrente elétrica contínua. Na prática profissional, as dificuldades da aplicação do método elétrico de resistividade nesses aquíferos induziram a busca de uma abordagem de campo mais adequada e critérios mais eficientes de interpretação das medições elétricas para fins de locação de poços produtores. Entre 1999 e 2004, seis estudos geofísicos por eletroresistividade foram realizados no Aquífero Jandaíra desenvolvido em sedimentos carbonatados cretáceos da Bacia Potiguar/RN. Foi utilizada a técnica do caminhamento elétrico 1D. O dispositivo de medição adotado foi o quadripolo linear simétrico de Schlumberger com linha AB de emissão de corrente definida a partir de SEVs previamente obtidas. Verificou-se que as zonas mais intensamente carstificadas são eletricamente resistivas e exibem sempre uma pronunciada variabilidade elétrica. Esse comportamento, ratificado pelo confronto das medições elétricas com os resultados dos poços localizados, levou à concepção de um Índice Elétrico de Carstificação (IEC) que enfatiza e quantifica a variabilidade elétrica, permitindo eleger objetivamente locais mais favoráveis à captação de água subterrânea em calcários. O IEC de uma estação de medição i , em perfis lineares, é calculado como a média da soma das variações relativas às estações $(i+1)$ e $(i-1)$. São apresentadas e discutidas quatro variantes do IEC dependentes do comportamento geológico e hidroquímico da área investigada. Os resultados podem ser apresentados sob a forma de perfis lineares ou, se a densidade dos perfis permitir, sob a forma de zoneamentos. São discutidas aplicações da abordagem no Aquífero Jandaíra da Bacia Potiguar (RN e CE), no Aquífero Salitre da Bacia de Irecê (BA), e no Subgrupo Paraopeba Indiferenciado/MG. A aplicação do IEC mostrou-se útil em caracterizar, local e regionalmente, zonas potencialmente aquíferas.

Abstract

The research focuses on the electric behavior of karst aquifers when pervaded by a steady electric current. In professional practice, the difficulties of applying the electrical resistivity method in these aquifers have led to the search for a more appropriate field approach and efficient criteria for the interpretation of electrical measurements aiming at water well site locations. Between 1999 and 2004, six resistivity studies were performed in the Jandaíra Aquifer which develops itself in Cretaceous carbonate sediments of the Potiguar Basin (RN). Extensive 1D horizontal profiling was carried out by means of the linear symmetric Schlumberger array where the current electrode separation was chosen from previous vertical electrical soundings data. It was perceived that zones exhibiting noticeable karstification are electrically resistive showing a marked electrical variability. This behavior, ascertained by comparing electrical measurements to wells data, led to the conception of an Electrical Karstification Index (EKI) which emphasizes and quantifies the electrical variability, making it possible to select favorable areas to exploit groundwater in limestones. The EKI of a measurement station i , in an electrical profile, is calculated as the mean value of the summation of electrical variations with regard to $(i+1)$ and $(i-1)$ stations. Four ways for calculating the IEC may be adopted depending on the geologic and hydrochemical behavior of the area under study. Results may be presented as linear profiles or, depending on the distance among profiles, as contour maps. Examples of the approach under discussion are presented regarding the Jandaíra Aquifer in the Potiguar Basin (RN and CE), the Salitre Aquifer in the Irecê Basin (BA), and the Undifferentiated Paraopeba Subgroup/MG. The application of the EKI proved to be useful in characterizing locally and regionally potential aquifer zones.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i4.29596>

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas dos aquíferos carbonatados cársticos constituem hoje, em todo o mundo, uma importante fonte de suprimento para abastecimento humano, industrial e agricultura. A demanda por esse recurso hídrico tende a crescer exponencialmente, nas próximas décadas, acompanhando o crescimento demográfico do planeta (FORD & WILLIAMS, 2007).

Assim, a solicitação dos aquíferos cársticos deverá ocorrer –

como é o caso presentemente – de forma espontânea, instigada pelas necessidades da sociedade. Nessas condições, torna-se imperativa uma intensificação do estudo desses aquíferos, sobretudo em face da grande heterogeneidade e/ou anisotropia que os caracterizam, decorrente dos processos de carstificação que geram espaços vazios significativos, como canais de dissolução, sumidouros e cavernas. Nesses meios, portanto, a Lei de Darcy e, conseqüentemente, os conceitos de condutividade hidráulica e transmissividade perdem sua validade, de modo que a ocorrência de água subterrânea

e as feições reais do fluxo são imprevisíveis, dada a imprevisibilidade, em primeira aproximação, das estruturas cársticas (FEITOSA, et al., 2008). A grande variação da produção dos poços, em curtas distâncias, desde secos a grandes vazões (MISTRETTA, 1984), atesta vigorosamente a heterogeneidade e/ou anisotropia dessas rochas.

Nessas condições, a locação de poços produtores em terrenos calcários traz dificuldades maiores que aquelas normalmente encontradas em aquíferos intergranulares. Assim sendo, a utilização da geofísica, em todo o mundo, ocupa importante espaço no âmbito das abordagens utilizadas. O método mais utilizado é o método elétrico de resistividade em corrente contínua.

A mais antiga referência sobre tentativas de utilização de corrente elétrica para o estudo do subsolo remonta ao ano de 1720 (GRAY & WHEELER, 1720 apud ORELLANA, 1972). As bases práticas do método, entretanto, só foram estabelecidas muito mais tarde, simultaneamente, na França (SCHLUMBERGER, 1920b apud VAN NOSTRAND & COOK, 1966) e nos Estados Unidos (WENNER, 1915, apud VAN NOSTRAND & COOK, 1966).

Hoje, em todo o mundo, a prospecção elétrica atingiu um alto nível de sofisticação, graças, de um lado, ao avanço da tecnologia dos equipamentos de campo e, de outro lado, ao refinamento dos computadores e dos programas computacionais. Na detecção e mapeamento de estruturas cársticas, em particular, utilizam-se extensivamente o que se convencionou chamar de tomografia elétrica 2D (perfis 2D). Essa técnica provê simultaneamente explorações vertical e horizontal, sendo muito utilizada, por exemplo, na pesquisa de cavidades em rochas calcárias.

Malgrado sua eficiência, entretanto, verifica-se que essa técnica é geralmente aplicada em áreas muito restritas para detalhar estruturas muito localizadas, visando a diferentes fins, quais sejam, por exemplo, locação de poços produtores, geotécnica e espeleologia (ABU-SHARIAH, 2009; MORAIS & PEIREIRA, 2012).

Quando se tratam de varreduras mais amplas em áreas calcárias, visando ao mapeamento de zonas mais intensamente carstificadas, pode ser mais vantajosa a utilização de perfis 1D, dada a simplicidade das operações de campo e sua consequente rapidez. O que se perde aqui em informação 2D é compensado por vastas áreas de informação 1D. Nestas, por sua vez, podem ser escolhidos alvos específicos de interesse para posterior detalhamento 2D ou 3D.

O presente trabalho pretende apresentar uma nova abordagem para detecção e mapeamento de zonas carstificadas, calculada num indicador elétrico denominado de Índice Elétrico de Carstificação (IEC), que quantifica a variabilidade elétrica dos calcários e cujos valores são obtidos a partir de perfis 1D.

Os dados que subsidiam essa nova abordagem foram obtidos a partir de estudos realizados sobre as formações Jandaíra (Bacia Potiguar/RN), Salitre (Grupo Una/BA) e sobre o Subgrupo Paraopeba Indiferenciado/MG. As litologias predominantes são as seguintes:

- Formação Jandaíra: micritos a intraesparitos, com ocorrência tanto de biomicritos, bioesparitos como oomicritos e ooesparitos.
- Formação Salitre: predominância de calcarenitos oncolíticos.
- Subgrupo Paraopeba Indiferenciado: predominância de margas e calcilitos com finas intercalações de siltitos. O Subgrupo Paraopeba do Grupo Bambuí inclui as formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade. Atribui-se a designação de Subgrupo Paraopeba Indiviso, nos mapeamentos, quando a identificação da formação é duvidosa.

2. METODOLOGIA

2.1. Pesquisa Bibliográfica

Na pesquisa bibliográfica que foi possível realizar não foram encontrados estudos estrangeiros abordando a variabilidade elétrica de calcários com o enfoque aqui adotado. Binley et al. (2017), Valois et al. (2009), Cheng et al. (2019), Chen et al. (2018), entre outros, utilizam a expressão “electric variability” para se referirem à variação de resistividade elétrica de um local para outro, o que é normal e esperado em um meio geológico qualquer. No presente trabalho a expressão variabilidade elétrica tem outra conotação que será discutida no item 2.3.

No Brasil, Feitosa (2000, 2003, 2004a, 2004b) e Feitosa & Demétrio (1999a, 1999b), estudando regionalmente o calcário Jandaíra na porção oeste da Bacia Potiguar/RN, tiveram a atenção despertada pela grande variabilidade elétrica dessa rocha em trechos de perfis 1D regionais obtidos com o quadri-polo Schlumberger. Graças ao grande volume disponível de dados de poços e de geologia de campo, foi possível verificar que essa variabilidade elétrica estava associada à ocorrência de estruturas cársticas, ou seja, à heterogeneidade e/ou anisotropia do calcário. Verificou-se também que a variabilidade elétrica era tanto maior quanto mais heterogêneo e/ou anisotrópico fosse o calcário, ou seja, quanto mais carstificada fosse essa rocha. Com base nessa constatação, Feitosa (2004a) definiu um índice elétrico, aqui denominado de Índice Elétrico de Carstificação (IEC), destinado a quantificar a variabilidade elétrica dos calcários e, assim, obter informações sobre sua intensidade de carstificação, de modo a orientar a locação de poços produtores para captação de água subterrânea.

Posteriormente, o IEC foi aplicado com bons resultados num estudo pontual realizado para a Mineradora Mizu na Bacia Potiguar/RN (FEITOSA et al., 2015) e em estudos regionais realizados pela Agência Nacional de Águas na Bacia Potiguar/RN (ANA, 2010) e no Carste São Francisco (ANA, 2018).

2.2. Comportamento Elétrico dos Calcários

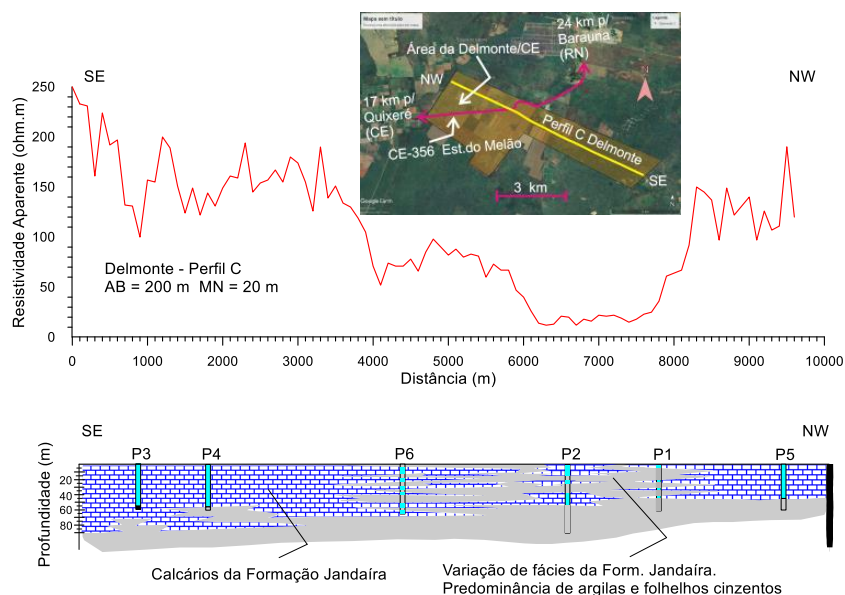
A experiência adquirida no Nordeste do Brasil (FEITOSA, 2000, 2003, 2004a); Feitosa & Demétrio (1999a, 1999b); Feitosa et al. (2015); ANA (2010); ANA (2018), permite discutir o comportamento elétrico dos calcários nas regiões estudadas e es-

tabelecer alguns padrões para este comportamento.

Sabe-se que calcários pouco ou não argilosos e ricos em carbonato de cálcio são mais propensos à dissolução e pouco se alteram, de modo que deixam poucos resíduos formadores de solo (JENNINGS, 1971; FORD & WILLIAMS, 2007). Esses são os calcários onde se desenvolvem preferencialmente as feições cársticas, sendo, assim, os calcários aquíferos por excelência. Eles são também, de acordo com a experiência, eletricamente mais resistivos, o que lhes é uma característica distintiva. Feitosa (1991), a propósito, já enfatizava as altas resistividades do calcário Jandaíra na porção oeste da Bacia Potiguar, em relação às demais regiões da bacia. Essas altas resistividades coincidem com o potencial hídrico subterrâneo dos calcários na região de Baraúnas (FEITOSA, 2004a), que sustenta a extensiva fruticultura irrigada dessa região.

Sempre foi mais ou menos intuitivo e tácito entre os resistivistas brasileiros, no passado recente, que passagens condutivas em calcários, nos perfis de resistividade, traduziam zonas carstificadas saturadas. A bibliografia analisada (FEITOSA, 2003, 2004a, 2004b) no âmbito do presente artigo e a prática profissional, entretanto, não ratificam essa concepção. Salvo talvez estruturas cársticas excepcionais como grandes cavernas saturadas, o meio cárstico, saturado ou seco, se manifesta eletricamente como zonas nitidamente resistivas. Os espaços vazios saturados, no seio dos calcários resistivos, geralmente não se individualizam eletricamente dadas suas pequenas dimensões quando confrontadas com os grandes volumes dos calcários resistivos envolvidos nas medições. As passagens condutivas em perfis de resistividade, assim, são mais compatíveis com intercalações de argilas ou folhelhos devendo, portanto, ser evitadas. Mostram-se como exemplos as Figuras 1 e 2, a seguir.

Figura 1 – Perfil regional na Delmonte Fresh do Brasil. Calcário Jandaíra, maio/1999.



Fonte: Feitosa & Demétrio (1999a).

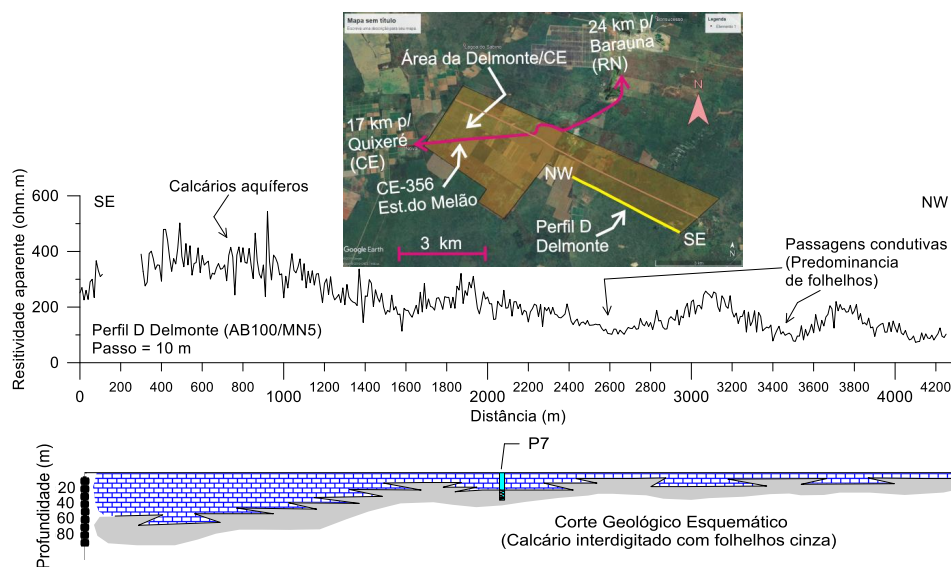
Na área da multinacional Delmonte Fresh do Brasil, na porção oeste da Bacia Potiguar, foram realizadas em 1999 medições elétricas (autor não identificado) que resultaram na perfuração dos poços P1 e P2 (Figura 1). As locações desses poços foram fundamentadas na falsa crença de que zonas eletricamente condutivas corresponderiam a calcários saturados. Ambos os poços foram improdutivos, revelando uma sequência litológica essencialmente composta por folhelhos acinzentados da Formação Quebradas (ANA, 2010). A real situação foi posteriormente esclarecida por Feitosa & Demétrio (1999a), conforme mostrado na Figura 1. Os poços produtores seguintes (P3 a P5), localizados nas zonas eletricamente resistivas, forneceram vazões variando entre 50,0 e 150,0 m³/h. O poço P6, muito pouco produtivo, foi localizado para se testar a zona de transição elétrica mostrada na Figura 1.

Mostra-se, na Figura 2, um perfil de detalhe realizado também na área da Delmonte Fresh do Brasil. Com base nos ensina-

mentos obtidos com o perfil da Figura 1, as passagens condutivas mostradas no perfil da Figura 2 são atribuídas a folhelhos. Chama a atenção no perfil de resistividade dessa figura a grande homogeneidade elétrica dos condutivos, o que é perfeitamente compatível com o comportamento elétrico das argilas e folhelhos. Chama a atenção, por outro lado, a grande variabilidade elétrica da zona resistiva/aquífera, tanto no perfil da Figura 1 como no perfil da Figura 2.

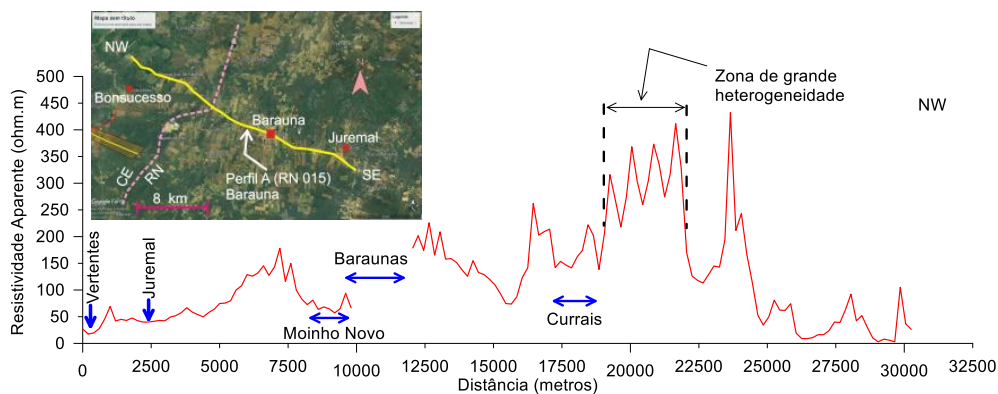
Esse comportamento dos sedimentos carbonatados Jandaíra, na porção oeste da Bacia Potiguar/RN, foi suficientemente confirmado pelo confronto do grande número de informações elétricas disponíveis com os resultados das perfurações. É possível, portanto, admitir que as zonas mais intensamente carstificadas correspondem, nos perfis de resistividade, a passagens eletricamente resistivas e nestas, em particular, às passagens de grande variabilidade elétrica. A Figura 3, a seguir, é mais um exemplo eloquente desse comportamento.

Figura 2 – Perfil de detalhe na Delmonte Fresh do Brasil, Calcário Jandaíra, maio/1999



Fonte: Feitosa & Demétrio (1999b).

Figura 3 – Perfil de resistividade ao longo da RN-015 (Estrada do Melão) no Rio Grande do Norte



Fonte: ANA (2010)

Na Figura 4, mostra-se um perfil realizado na área de Lapão/BA sobre calcários da Formação Salitre, do Grupo Una. O trecho mais resistivo desses calcários apresenta resistividade aparente, para a linha AB utilizada, no entorno de 500 ohm.m. Observa-se, nesse trecho, uma passagem de maior variabilidade elétrica (porção oeste) e uma passagem onde essa variabilidade é muito menor. Essa última, de acordo com a ideia aqui defendida, deve corresponder a calcários compactos pouco ou não carstificados.

A literatura clássica especializada informa, geralmente, de forma simplista, que a profundidade de investigação dos quadripolos Schlumberger é igual a $AB/4$ (DOBRIN, 1976; FRISCHKNECHT, & KELLER, 1970; VAN NOSTRAND & COOK, 1966; ORELLANA, 1972).

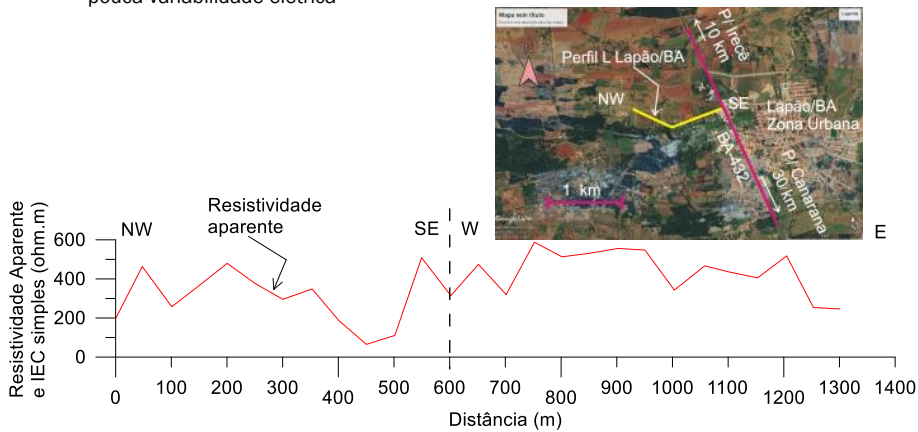
Praticantes do método, com base na experiência de campo e de interpretação informam mais realisticamente, entretanto,

que a profundidade de investigação pode variar entre $AB/4$ e $AB/8$ ou, mesmo, $AB/10$, na dependência dos contrastes de resistividades e de espessuras dos diferentes horizontes elétricos presentes. No caso de Lapão, aqui analisado, essa profundidade pode ser considerada como da ordem de $AB/6$, ou seja, algo em torno dos 33 m.

De acordo com as medições de nível d'água realizadas em março/2015, os níveis estáticos na área de Lapão ficavam no entorno dos 30 m na época das medições elétricas (ANA, 2018). Assim, não se pode afirmar até que ponto as resistividades aparentes medidas são influenciadas pelo freático.

A heterogeneidade e/ou anisotropia dos calcários e sua consequente heterogeneidade elétrica, entretanto, condicionada por uma intensiva e extensiva ocorrência de espaços vazios se mantém, estejam eles secos ou saturados.

Figura 4 – Perfil L Lapão/BA, AB 200/MN20, passo 50 m. Calcário resistivo da Formação Salitre em Lapão/BA, com muita e pouca variabilidade elétrica



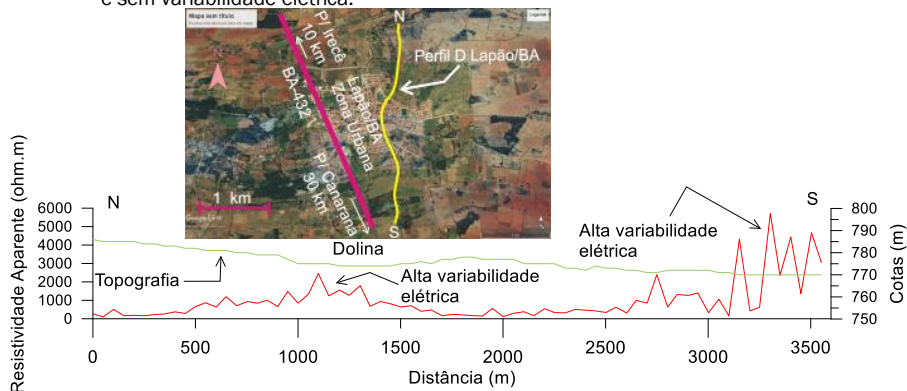
Fonte: ANA (2018)

Nas Figuras 5 e 6, mostram-se perfis de resistividade também realizados na área de Lapão/BA sobre calcários da Formação Salitre do Grupo Una. Esses perfis incluem a topografia obtida a partir de imagens SRTM. O erro das cotas utilizadas é inferior a 5 m, segundo estudo comparativo entre cotas de precisão e cotas SRTM (DEMÉTRIO *et al.*, 2006), o que lhes confere uma confiabilidade aceitável.

Observa-se, nessas figuras, que os trechos simultaneamente resistivos e de grande variabilidade elétrica correspondem, geralmente, a zonas topograficamente deprimidas e aparen-

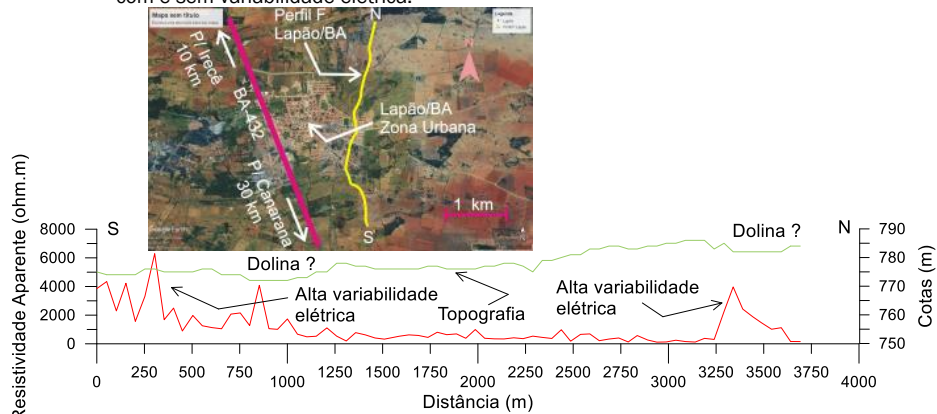
temente fechadas, configurando feições que podem ser consideradas como discretas dolinas ou feições pré-dolinas. Essas feições encontram-se provavelmente em lento processo de abatimento devido a discretos colapsos de estruturas cársticas. Admite-se que o eventual material preenchendo essas discretas dolinas (regolitos diversos), proveniente do recobrimento pretérito, possa estar de permeio com blocos de rocha sã, o que condiciona, juntamente com os espaços vazios da rocha sã, um meio suficientemente heterogêneo para provocar uma alta variabilidade elétrica.

Figura 5 – Perfil DD' Lapão, AB200/MN20, passo 50 m. Calcário resistivo da Formação Salitre, com e sem variabilidade elétrica.



Fonte: ANA (2018)

Figura 6 – Perfil FF' Lapão, AB200/MN20, passo 50 m. Calcário resistivo da Formação Salitre em Lapão/BA, com e sem variabilidade elétrica.



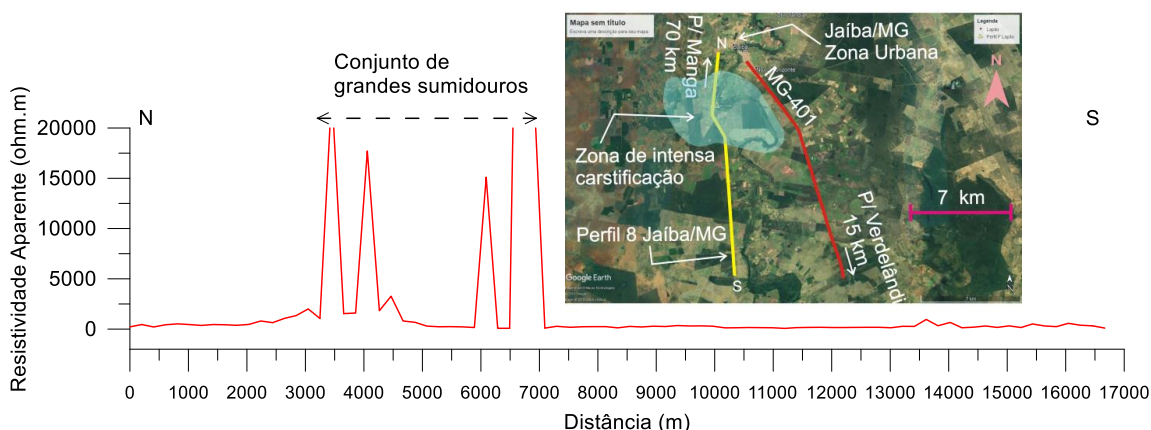
Fonte: ANA (2018)

Essa variabilidade elétrica, decorrente da heterogeneidade e/ou anisotropia do meio aquífero cárstico, pode assumir enorme magnitude como no caso do perfil mostrado na Figura 7, obtido nas imediações da cidade de Jaíba/MG (ANA, 2018). Ocorrem nesta área rochas carbonatadas do subgrupo Paraopeba indiferenciado, pertencente ao Grupo Bambuí. Essas rochas, pouco ou não carstificadas, se mantêm fiéis à gama de 100 a 400 ohm.m ao longo de significativas distâncias. No trecho do Perfil 8, compreendido entre 3000 e 7000 m, entretanto, ocorrem picos de resistividade aparente que ultrapassam os 15000 ohm.m. Essas altas resistividades aparentes não refletem necessariamente a resistividade real do meio,

mas traduzem, antes, as distorções localizadas do campo elétrico, associadas à extrema heterogeneidade e/ou anisotropia do meio investigado, bem como efeitos de eletrodos. Assim, os valores da resistividade aparente, em si, não são tão significativos quanto é a sua variabilidade.

Essa variabilidade extrema, na Figura 7, denuncia a ocorrência de um conjunto de grandes exocarstes na margem esquerda do rio Verde Grande, que funcionam ora como surgências, ora como sumidouros, na dependência das relações hidráulicas rio/freático.

Figura 7 – Perfil 8 Jaíba AB200/MN20, passo 200 m. Anomalias resistivas nos calcários do Subgrupo Paraopeba do Grupo Bambuí em Jaíba/MG.



Fonte: ANA (2018)

2.3. O Índice Elétrico de Carstificação – IEC

O panorama acima descortinado deixa claro que a mera inspeção visual de perfis de resistividade aparente em calcários, por olhos experimentados, permite discernir zonas resistivas e de grande variabilidade elétrica, tidas como mais carstificadas e, portanto, mais favoráveis à locação de poços produtores.

A concepção de um índice elétrico de carstificação (IEC), aqui defendida, visa à quantificação dessa variabilidade elétrica e à sua individualização mais explícita nos perfis, filtrando os calcários resistivos que são homogêneos.

Enquanto os autores de língua inglesa falam em “electric variability” para expressar a variação da resistividade elétrica de um ponto para outro em um meio heterogêneo e/ou anisotrópico, no presente artigo a expressão variabilidade elétrica tem uma conotação de derivada, aproximada pela razão ($\Delta\rho_a/x$). Como nos perfis lineares a distância x é uma constante, igual ao dobro do passo (ver equações a seguir), ela não é levada em conta, sendo a derivada aproximada apenas pela variação $\Delta\rho_a$ como indicado nas equações abaixo discutidas. O importante é entender que a chamada variabilidade elétrica, aqui, significa uma taxa de variação que informa, em cada estação de medição, sobre a heterogeneidade e/ou anisotropia do meio.

O IEC foi inicialmente definido (FEITOSA, 2004a) como uma

variabilidade elétrica média onde a resistividade aparente ρ_i da estação considerada é utilizada como peso. A utilidade desse peso, na época, residiu em amplificar o valor do IEC nas zonas resistivas e atenuá-lo nas zonas condutivas. É uma forma de minimizar eventuais variabilidades elétricas significativas em zonas de predominância de pelitos, por exemplo. O IEC, assim avaliado, foi designado de índice de carstificação clássico, cuja unidade é $\Omega^2.m^2$. A equação (1), válida para perfis lineares, expressa esse índice.

$$IEC_i = [(|\rho_i - \rho_{i-1}| + |\rho_i - \rho_{i+1}|) \cdot \rho_i] / 2 \quad (1)$$

em que:

IEC_i = Índice elétrico de carstificação na estação i ($\Omega^2.m^2$.)

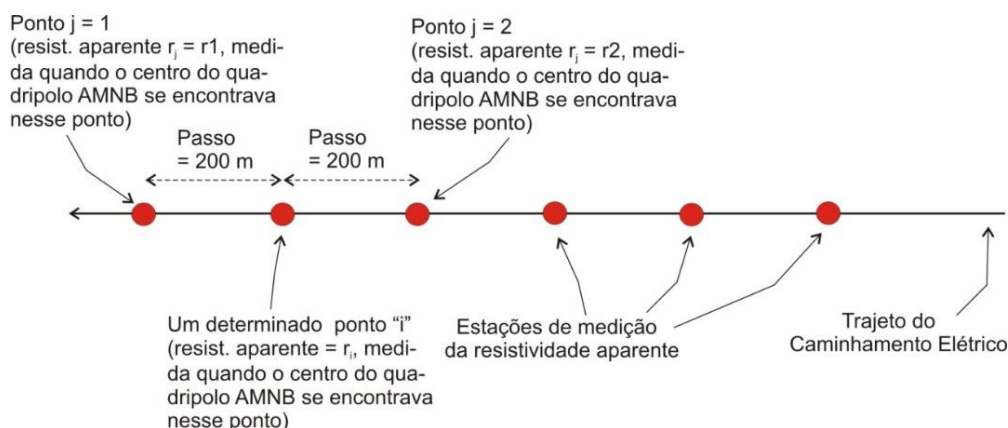
ρ_i = Resistividade aparente na estação de medição i

ρ_{i+1} = Resistividade aparente na estação de medição de vante

ρ_{i-1} = Resistividade aparente na estação de medição de ré

A Figura 8, a seguir, ilustra o esquema operacional dos perfis de resistividade Schlumberger destinados à avaliação do índice de carstificação.

Figura 8 - Ilustração do esquema para obtenção do IEC



Na dependência do comportamento geológico e hidroquímico da área investigada, entretanto, algumas variantes do índice elétrico de carstificação podem ser aplicadas. Essas variantes são as seguintes:

- **IEC simples ($\Omega \cdot m$):** Esta variante prescinde de ponderações. Ela mede simplesmente a variabilidade elétrica de uma estação de medição em relação às estações de ré e de vante, ao longo de um perfil. Ela pode ser utilizada em áreas de calcário puro, onde a variabilidade elétrica traduza heterogeneidades e/ou anisotropia unicamente nesse tipo de rocha. A equação (2), válida para perfis lineares, expressa esse índice. Os elementos da equação são os mesmos indicados para a equação (1).

$$IEC_i = [(|\rho_i - \rho_{i-1}| + |\rho_i - \rho_{i+1}|)]/2 \quad (2)$$

- **IEC percentual (%):** Nesta variante a variabilidade elétrica é expressa como um percentual da variabilidade simples definida pela equação (2). Essa forma é útil quando se tem variações da qualidade química da água nos calcários. Nos carstes com água salinizada, com efeito, a grande condutibilidade eletrolítica tende a uniformizar os valores da resistividade aparente (PORTO LIRA, 2001), minimizando ou, em casos mais extremos, eliminando quase que completamente a variabilidade elétrica denunciadora da heterogeneidade e/ou anisotropia do meio. Com a utilização do IEC percentual, entretanto, as pequenas variabilidades em um calcário saturado com água muito salinizada são amplificadas, podendo assumir valores numéricos da mesma ordem de grandeza que as grandes variabilidades que ocorrem nos calcários eletricamente resistivos. A equação (3), válida

para perfis lineares, expressa esse índice. Os elementos da equação são os mesmos indicados para a equação (1).

$$IEC_i = \frac{[(|\rho_i - \rho_{i-1}| + |\rho_i - \rho_{i+1}|)]}{2\rho_i} \cdot 100 \quad (3)$$

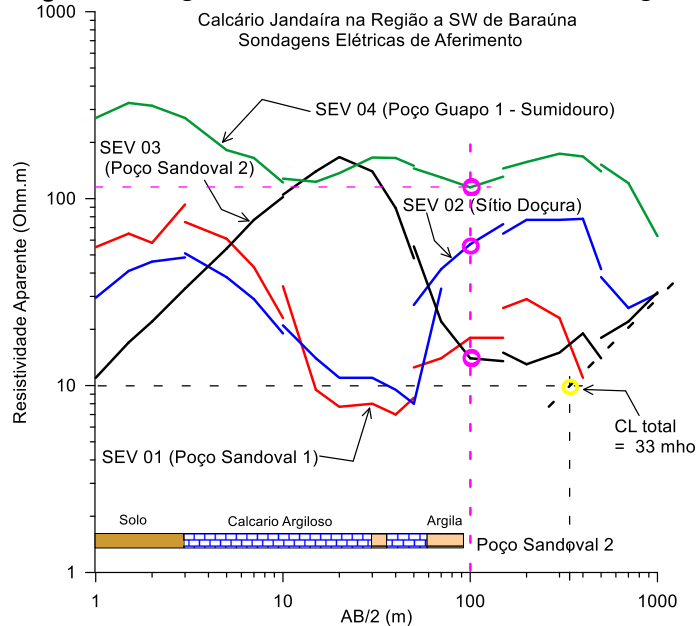
- **IEC polinomial:** Nesta variante, são ajustados polinômios de grau n aos perfis de IEC elaborados. Os polinômios suavizam os perfis, eliminando variações abruptas localizadas, e mostram as variações do IEC que são mais significativas regionalmente. Esta variante do índice elétrico de carstificação pode ser chamada de IEC polinomial. Os polinômios podem ser ajustados aos perfis de qualquer uma das variantes acima definidas, pelo que a unidade do IEC polinomial pode ser $\Omega^2 \cdot m^2$, $\Omega \cdot m$ ou %.

2.4. Linha AB Requerida

Toda campanha de perfis de resistividade deve ser precedida por algumas SEVs convenientemente posicionadas, com o objetivo de obter informações sobre a sequência vertical de resistividades. Esse conhecimento é que permite dimensionar uma linha AB de emissão de corrente adequada à obtenção da informação buscada.

Mostram-se aqui, como exemplo, algumas SEVs realizadas sobre os calcários Jandaíra na porção oeste da Bacia Potiguar/RN (Figura 9). A análise dessas SEVs permite verificar que as resistividades aparentes medidas com uma linha AB igual a 200 m ($AB/2 = 100$ m) informam satisfatoriamente sobre a natureza litológica dessas rochas. SEVs com esse fim foram também realizadas previamente à obtenção dos perfis na Formação Salitre (Lapão/BA) e no Subgrupo Paraopeba (Jandaíba/MG), mostrados nas Figuras 4 a 7.

Figura 9 – Sondagens elétricas sobre o Calcário Jandaíra, Bacia Potiguar



Fonte: Feitosa & Demetrio (1999a)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O IEC foi concebido visando essencialmente à locação de poços produtores em regiões calcárias. Ele quantifica a variabilidade elétrica, enfatizando-a e distinguindo mais prontamente, assim, as zonas potencialmente aquíferas daquelas que não o são.

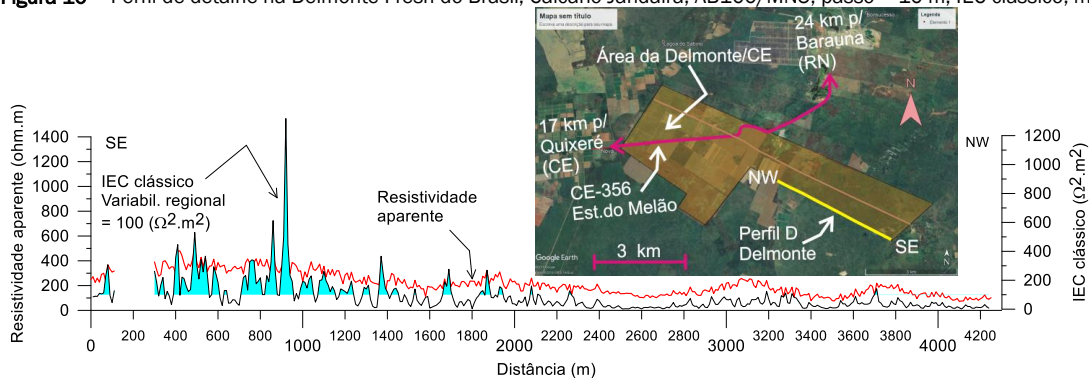
3.1 Perfis de IEC

Mostram-se a seguir alguns perfis de IEC juntamente com os

respectivos perfis de resistividade aparente. Nesses perfis de IEC é conveniente estabelecer um valor mínimo abaixo do qual a variabilidade elétrica, ou o IEC, é considerado normal e não denunciador de heterogeneidades e/ou anisotropia significativas. Pode-se chamar esse valor mínimo de variabilidade regional, estabelecida em função do comportamento elétrico regional.

Observa-se, na Figura 10, que o perfil do IEC explicita de forma muito eloquente as passagens de grande variabilidade elétrica e, conseqüentemente, mais carstificadas.

Figura 10 – Perfil de detalhe na Delmonte Fresh do Brasil, Calcário Jandaíra, AB100/MN5, passo = 10 m, IEC clássico, maio/1999

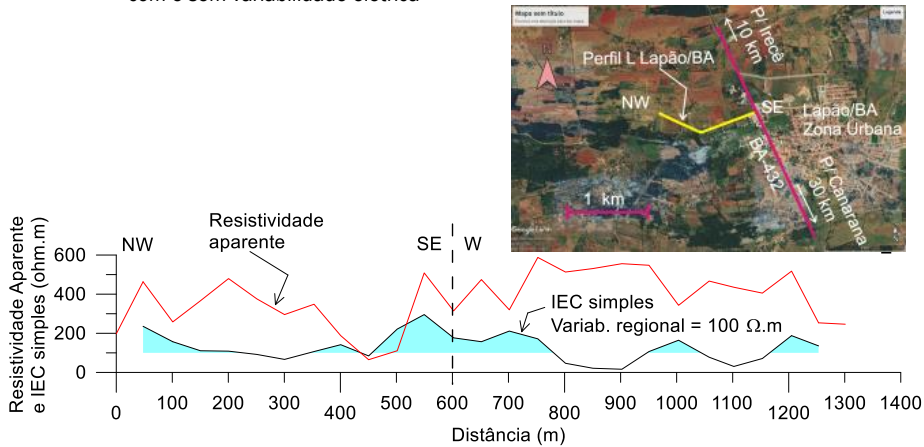


Fonte: Feitosa & Demetrio (1999)

Nas Figuras 11 e 12 o IEC permite descartar significativos trechos de calcário resistivo e enfatizar o trecho de maior variabilidade elétrica, mais favorável à captação de água subterrânea. Na Figura 12, em particular, a pronunciada variabilidade elétrica corresponde a um importante exocarste denominado de Furna Feia, ao norte da cidade de Baraúna/RN, numa área onde foram cadastradas 68 cavernas (CRUZ *et al.*, 2009).

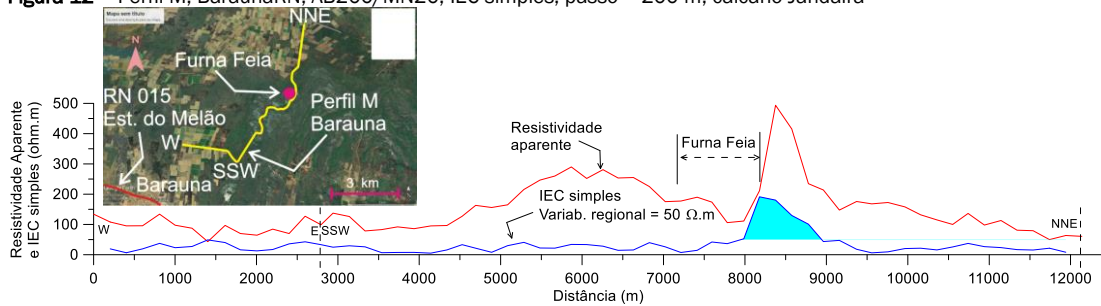
Nas Figuras 13 e 14 o Calcário Salitre é relativamente homogêneo e uniforme com resistividade aparente da ordem de 400 ohm.m para a linha AB utilizada. Altas resistividades aparentes, aqui, coincidem com valores do IEC elevados, ou seja, alto grau de carstificação.

Figura 11 – Perfil L, AB200/MN20, IEC simples, passo 50 m. Calcário resistivo da Formação Salitre em Lapão/BA, com e sem variabilidade elétrica



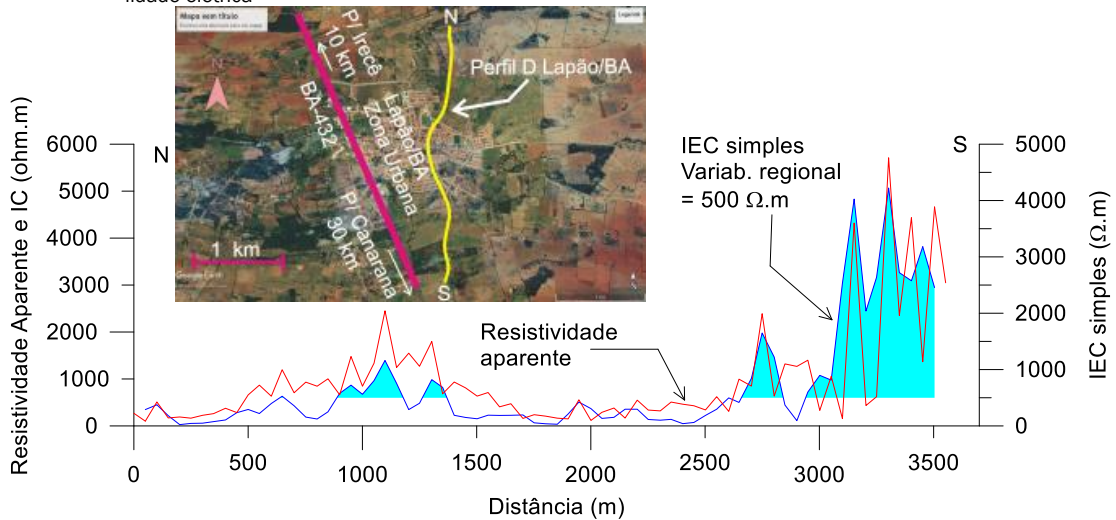
Fonte: ANA (2018)

Figura 12 – Perfil M, BaraúnaRN, AB200/MN20, IEC simples, passo = 200 m, calcário Jandaíra



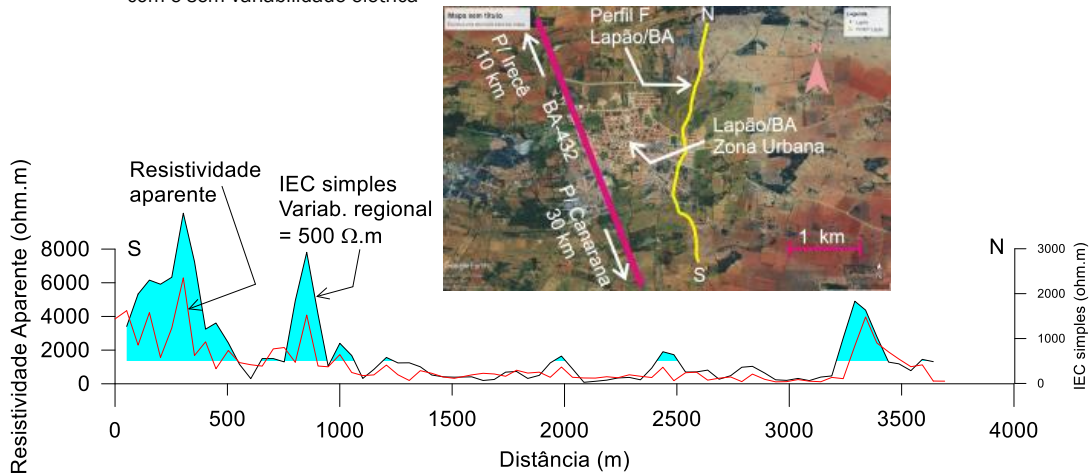
Fonte: Feitosa, (2004a)

Figura 13 – Perfil DD' Lapão, AB200/MN20, passo = 50 m. Calcário resistivo da Formação Salitre em Lapão/BA, com e sem variabilidade elétrica



Fonte: ANA (2018)

Figura 14 – Perfil FF' Lapão, AB200/MN20, passo 50 m. Calcário resistivo da Formação Salitre em Lapão/BA, com e sem variabilidade elétrica



Fonte: ANA (2018)

3.2. Mapas de IEC

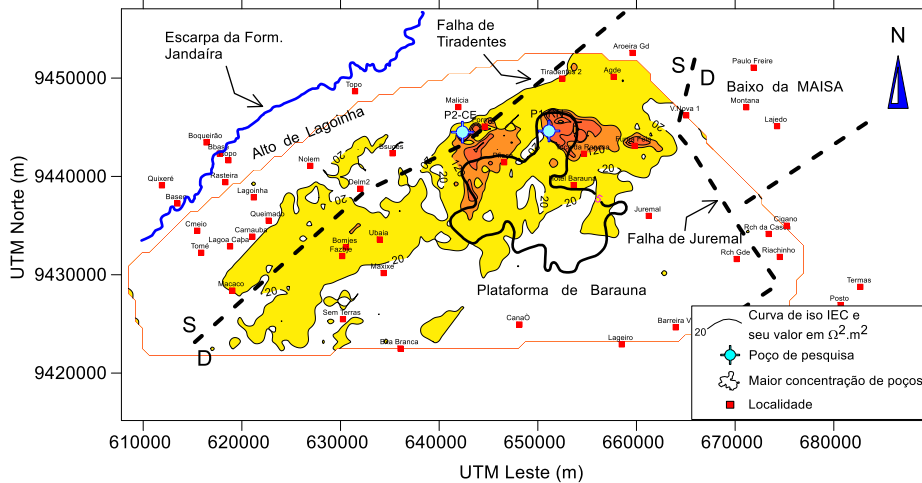
Quando a disposição dos perfis de IEC é suficientemente densa é possível apresentar um zoneamento desse índice, o que oferece uma visão espacial das zonas carstificadas.

3.2.1. Área de Barauna/RN

Mostra-se como exemplo, na Figura 15, o mapa do IEC clássico obtido na região de Barauna/RN, com base em 336 km de perfis de resistividade (FEITOSA, 2004a; ANA, 2010). Foi utilizado o quadripolo linear simétrico de Schlumberger com linha AB de emissão de corrente igual a 200 m, linha MN de recepção igual a 20 m e passo de 200 m. A posição dos perfis deixa de ser mostrada para não sobrecarregar o mapa.

Considera-se como zona mais carstificada, na Figura 15, a zona em amarelo onde o IEC clássico é maior que $20 \Omega^2.m^2$. Abaixo desse valor o calcário da Formação Jandaíra é mais homogêneo ou contém significativas intercalações de folhelhos escuros da Formação Quebradas que comprometem suas propriedades como reservatório aquífero. No âmbito dessa zona destacam-se duas áreas, mostradas na cor castanha, onde o IEC atinge valores superiores a $120 \Omega^2.m^2$. Essas áreas são extremamente carstificadas. Nelas foram perfurados os poços de pesquisa P1 e P2 (ANA, 2010). O poço P1, com profundidade de 131 m, no Sítio Furna de Pedra/RN, foi testado com uma vazão de $51,0 m^3/h$. O poço P2, no Sítio Formigueiro/CE, com profundidade de 18 m não pôde ser aprofundado porque encontrou uma caverna que provocou perda de circulação incontornável. A impossibilidade do seu aprofundamento atesta a intensidade da carstificação.

Figura 15 – Zoneamento do IEC clássico na região de Barauna/RN, calcário da Formação Jandaíra



Fonte: ANA (2010)

Feitosa (2004a), analisando a concentração de poços produtores na área de Barauna/RN, definiu um índice denominado de Índice de Concentração de Poços (ICP), passível de zoneamento. O ICP foi definido, para cada poço, como o número total de poços produtores existentes num raio menor que mil metros, incluindo ele próprio.

Dessa forma, não existindo para um dado poço nenhum outro poço situado num raio de mil metros, seu ICP será igual a 1. Na Figura 15 mostra-se a iso-curva que delimita uma área dentro da qual os valores do ICP são maiores que 5, podendo chegar a um valor máximo de 20. A este valor máximo correspondem cerca de 6 poços produtores por quilômetro quadrado.

Não é à toa que a área delimitada pela curva de ICP igual a 5 ocupe predominantemente a área de $20 < IEC < 120$ e apenas parcialmente as áreas de $IEC > 120$. As áreas irrigadas na região de Barauna/RN, com efeito, foram sendo implantadas onde se sabia da experiência prática, que havia água e solos. Ora, nos calcários impuros, moderadamente carstificados, havia água e solo agricultável proveniente da alteração da rocha ($20 < IEC < 120$). Por outro lado, nos calcários mais puros, cálcicos ($IEC > 120$), podem ser obtidas maiores vazões, mas não há solos agricultáveis. ANA (2010), a propósito, sugere a área de maior potencial hidrogeológico ao norte da cidade de Baraúna, indicada a partir do IEC, como alternativa para futuras captações, de modo a minimizar a tendência hoje existente de uma excessiva concentração de poços produtores na área a sudoeste da cidade de Barauna.

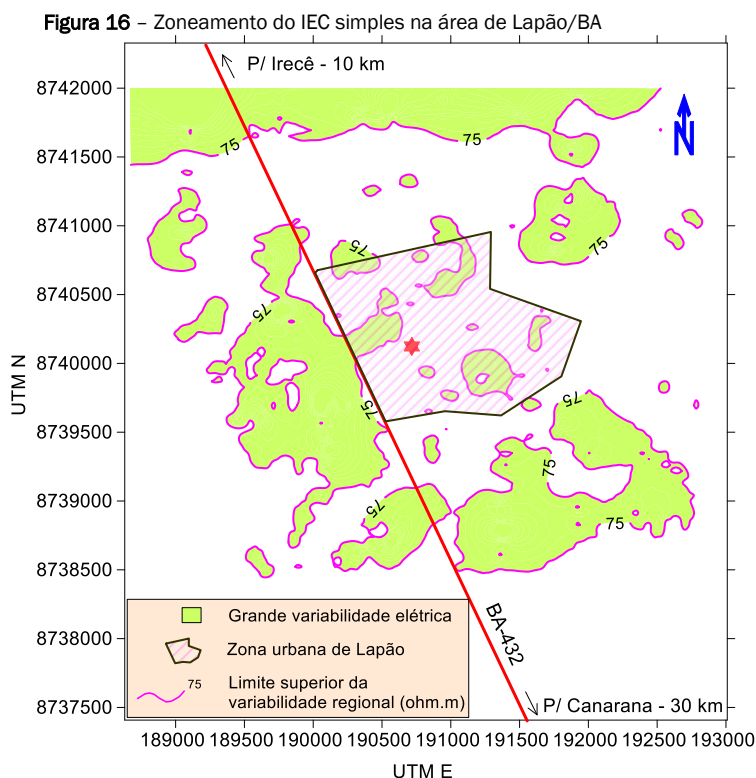
3.2.2. Área de Lapão/BA

Além de subsidiar locações de poços produtores, o índice elétrico de carstificação pode também contribuir a estudos geotécnicos. Na cidade de Lapão/BA e em suas cercanias ocorreram nítidos abatimentos de terreno a partir do início de outubro de 2008, ocasionados por discretos colapsos de estruturas cársticas em calcários da Formação Salitre, do Grupo Una. Visando a uma compreensão do problema, estudos foram realizados na época pelo IPT/SP, CBPM/BA, UFBA, CPRM e ANA. Dentre os estudos realizados destaca-se uma varredura detalhada, numa área de 22,0 km², utilizando-se perfis 1D Schlumberger (ANA, 2018). Foram realizados 42 km de perfis

de resistividade (864 estações de medição) com linha AB de emissão de corrente igual a 200 m e uma linha MN de recepção igual a 20 m, tendo sido adotado um passo de 50 m. A posição dos perfis deixa de ser mostrada para não sobrecarregar o mapa.

Mostra-se, na Figura 16, o zoneamento do IEC simples. A análise do conjunto das medições permitiu admitir o valor de 75 ohm.m como o limite da variabilidade regional. Abaixo desse valor os calcários são considerados como relativamente homogêneos, sem estruturas cársticas muito significativas. Nas zonas onde o IEC fica acima de 75 ohm.m, por outro lado, é esperada a ocorrência de estruturas cársticas importantes. Se de um lado podem ser esperadas boas vazões de poços nessas zonas, devem-se admitir aí, por outro lado, riscos não desprezíveis de abatimentos de terreno com todo o cortejo de efeitos indesejados, tais como, danos em imóveis, calçamentos, tubulações elétricas e hidráulicas, entre outros.

As 864 estações de medição foram niveladas a partir de uma imagem SRTM. As cotas SRTM apresentam erro inferior a 5 m, segundo Demétrio *et al.* (2006). Uma superfície foi ajustada estatisticamente a essas 864 cotas, constituindo uma representação suavizada da topografia. As diferenças entre as cotas medidas e as cotas previstas pela superfície ajustada são os resíduos, cujos valores negativos delineiam várias zonas fechadas, topograficamente rebaixadas, que podem ser interpretadas como dolinas, exibindo diâmetros que não excedem geralmente os 200 m.



Fonte: ANA (2018)

Foram delimitadas, assim, 66 dolinas, 77% das quais estão situadas em áreas de alto índice de carstificação ou em suas bordas. Este resultado representa, de um lado, um testemunho favorável à pesquisa de estruturas cársticas pelo índice de carstificação. Ele veio encorajar, por outro lado, a proposição de áreas consideradas de baixo risco, visando à expansão

urbana da cidade de Lapão. Na delimitação das áreas consideradas de baixo risco, o critério adotado foi a ausência de dolinas e de áreas de alta variabilidade elétrica. As áreas consideradas como de risco, por outro lado, são aquelas em que há predominância de alta variabilidade elétrica associada à presença de dolinas.

Dessa forma, o zoneamento do IEC simples, na zona urbana de Lapão e sua periferia, podem servir como orientação no planejamento da expansão urbana de Lapão, coadjuvado, naturalmente, por estudos paralelos que devem ser realizados. Dentre estes últimos citam-se, por exemplo, a perfuração de poços de monitoramento para pesquisa hidrogeológica e geotécnica, e a aplicação localizada de tomografias elétricas e GPR (Ground Penetrating Radar), se necessário.

4. CONCLUSÕES

A análise do grande volume de medições elétricas disponível em áreas calcárias levou à constatação de que as zonas carstificadas aquíferas se manifestam nos perfis de resistividade, como passagens eletricamente resistivas e nestas, em particular, como trechos de grande variabilidade elétrica.

Feitosa (2004a) definiu um indicador denominado de Índice Elétrico de Carstificação (IEC) cujo objetivo é quantificar a variabilidade elétrica e torná-la mais explícita em perfis e em mapas.

Em perfis de resistividade a questão pode ser assim colocada, ao nível atual de conhecimentos do problema:

- O índice de carstificação é obtido a partir de perfis Schlumberger 1D de resistividade, os quais são adequados a grandes varreduras regionais, graças à praticidade da sua operação em campo.
- Calcários carstificados correspondem, eletricamente, a passagens resistivas nos perfis de resistividade e, nestas, particularmente, a zonas de grande variabilidade elétrica.
- O índice de carstificação separa as zonas de grande variabilidade elétrica daquelas onde essa variabilidade é tida como normal.
- Altas variabilidades elétricas são atribuídas a uma grande heterogeneidade e/ou anisotropia do meio físico, onde a corrente elétrica circulou.
- Em meios calcários, a heterogeneidade e/ou anisotropia devem-se à presença de estruturas cársticas (canais de dissolução, sumidouros, cavernas, dolinas de abatimento etc.).
- Nesses meios a variabilidade elétrica é tanto maior quanto mais intensa for a heterogeneidade e/ou anisotropia do meio.
- A associação de variabilidade elétrica (IEC) com carstificação tem um caráter macro. É absolutamente impossível se dizer, pelo menos no presente estágio do conhecimento, se essa presumida carstificação constitui uma caverna ou um dolinamento assoreado ou um conjunto de condutos ou um sumidouro, ou tudo isso junto. O que se pode dizer é que nas zonas de maior variabilidade elétrica são grandes as possibilidades de existirem estruturas cársticas importantes.
- Vai caber a métodos capazes de um maior poder de

resolução, tais como tomografias elétricas 2D e 3D, o detalhamento de alvos localizados, selecionados a partir de perfis ou mapas do IEC.

- As principais aplicações de perfis ou mapas de IEC são locações de poços para captação de água subterrânea. Delimitação de áreas de alto risco geotécnico em zonas urbanas e periurbanas, entretanto, constitui uma aplicação não menos importante.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são devidos às empresas Del Monte Fresh Produce Brasil Ltda, MARE Cimento Ltda/Mineração Mizu, e às instituições Secretaria de Recursos Hídricos e do Meio Ambiente – SEMARH/RN e, especialmente, Agência Nacional de Águas – ANA, pela obtenção dos dados de campo que possibilitaram a elaboração do presente artigo.

Agradecimentos são também devidos aos hidrogeólogos Prof. José Geilson Alves Demétrio, Helena Magalhães Porto Lira e Fernando Antônio Carneiro Feitosa pela revisão do texto. Especiais agradecimentos vão para o operador sênior de resistividade Paulo de Melo da Cunha Pedrosa pela realização de todas as medições elétricas discutidas no presente artigo.

REFERÊNCIAS

- ABU-SHARIAH, M.I.I. Determination of cave geometry by using a geoelectrical resistivity inverse model. *Engineering Geology*, v. 105, n.3/4, p. 239-244, 2009.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. *Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Proposição de Modelo de Gestão Compartilhada para os Aquíferos da Chapada do Apodi, entre os Estados do Rio Grande do Norte e Ceará*. Relatório Final. Brasília/DF, relatório inédito, 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. *Avaliação Hidrogeológica dos Sistemas Aquíferos Cársticos e Fissuro-Cársticos na Região Hidrográfica do São Francisco com Vistas à Gestão Integrada e Compartilhada de Recursos Hídricos*. Relatório Final. Brasília/DF, relatório inédito, 2018.
- BINLEY, A.M.; CHENG, Q.; TAO, M.; CHEN, X. *Characterisation of the heterogeneity of karst using electrical geophysics - applications in SW China*. American Geophysical Union, Fall Meeting 2017, abstract #H53L-08, 2017.
- CHEN, X.; ZHANG, Z.; SOULSBY, C.; CHENG, Q.; BINLEY, A.; JIANG, R.; TAO, M. Characterizing the heterogeneity of karst critical zone and its hydrological function: *An integrated approach*. Special Issue: Water in the Critical Zone, 2018.
- CHENG, Q.; TAO, M.; BINLEY, A. Characterization of karst structures using quasi-3D electrical resistivity tomography. *Environ Earth Sci*, v. 78, p. 285, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8284-2>.
- CRUZ, J.B.; BENTO, D.M.; SANTOS, D.J.; FREITAS, J.I.M.; CAMPOS, U.P. Complexo Espeleológico da Furna Feia (RN): Uma proposta de unidade de conservação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30., 2009. [Anais...] SBE, Montes Claros/MG, 2009.

- DEMETRIO, J.G.A.; CORREIA, L.C.; SARAIVA, A.L. Utilização de Imagens SRTM na Confecção de Mapas Potenciométricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, Curitiba, 14., 2006. [Anais...]. Brasil, 2006.
- DOBRIN, M.B. *Introduction to Geophysical Prospecting*. 3ed, McGraw-Hill Book Company, USA, 1976.
- FEITOSA, E.C. & DEMETRIO J.G.A. *O Calcário Jandaíra na Área da Baixa do Felix – Região SW de Baraúna/RN: Parecer Hidrogeológico*. (Estudo geofísico por eletrorresistividade objetivando a detecção e mapeamento de estruturas cársticas para fins de locação de poços). LABHID-FADE-UFPE/Delmonte Fresh Produce Brasil Ltda. Recife, relatório inédito, 1999a.
- FEITOSA, E.C. & DEMETRIO, J.G.A. *O Calcário Jandaíra na Área da Baixa do Felix, Região SW de Baraúna/RN: Parecer Hidrogeológico Complementar* (Estudo geofísico por eletrorresistividade objetivando a detecção e mapeamento de estruturas cársticas para fins de locação de poços). LABHID-FADE-UFPE/Delmonte Fresh Produce Brasil Ltda. Recife, relatório inédito, 1999b.
- FEITOSA, E.C. *Aplicabilidade do Método Geofísico de Eletrorresistividade na Investigação Hidrogeológica de Bacias Costeiras Cretácicas*. Relatório técnico de pesquisa financiada pelo CNPq (Processo nº 40.2495/79), 1991.
- FEITOSA, E.C. *Captação de Juazeiro/CE: Estudo Geofísico por Eletrorresistividade - Relatório de Conclusão*. PLANAT/CAGECE, Fortaleza, relatório inédito, 1984.
- FEITOSA, E.C. *O Aquífero Jandaíra no Município de Baraúna/RN – Atualização dos Conhecimentos*. ANA/PróÁgua Semiárido/SERHID RN – FADE/LABHID/UFPE. Zoneamento dos calcários aquíferos e mapeamento das áreas de maior índice de carstificação através do método geofísico de eletrorresistividade). Recife, relatório inédito, 2004a.
- FEITOSA, E.C. *O Calcário Jandaíra em Área da Baixa do Felix/CE (Propriedade no Km 14 da CE-377): Parecer Hidrogeológico e Locação de Poços*, FADE/LABHID, Recife, relatório inédito, 33 páginas, 2003.
- FEITOSA, E.C. *O Calcário Jandaíra na Área da Baixa do Felix – Município de Quixeré – Ceará: Estudo por Eletrorresistividade da Área do Bessa*. LABHID-FADE-UFPE/Del Monte Fresh Produce Brasil Ltda. Recife, relatório inédito, 2004b.
- FEITOSA, E.C. *O Calcário Jandaíra na Área da Baixa do Felix – Região SW de Baraúna/RN: Parecer Hidrogeológico Complementar 2* (Varredura e Semi-detalhamento Geofísico por Eletrorresistividade da Porção NW da Propriedade da Delmonte). LABHID-FADE-UFPE/Delmonte Fresh Produce Brasil Ltda. Recife, relatório inédito, 2000.
- FEITOSA, E.C.; GONÇALVES, F.S.; GONÇALVES, R.S. *Mare Cimento Ltda - Mineração Mizu/RN: Estudo Geofísico por Eletrorresistividade*. Recife, Relatório Inédito, 2015.
- FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.). *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. 2. Ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2008.
- FORD, D. & WILLIAMS, P. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- FRISCHKNECHT, F.C. & KELLER, G.V. *Electrical Methods In Geophysical Prospecting*. Pergamon Press Ltd, Oxford, 1970.
- GALLO, J.R. & CATANI, R.A. Solubilidade de alguns tipos de calcários. *Boletim Técnico da Divisão de Experimentação e Pesquisa*, v. 13, n. 5, Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas/São Paulo, 1954.
- HEINZ, C.K. A Escala na Análise Geomorfológica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2001.
- HERRMANN, G.; KOHLER, H.C.; DUARTE, J.C.; CARVALHO, P.G.S. *Gestão ambiental: APA Carste de Lagoa Santa*. IBAMA, Belo Horizonte, 1998.
- JENNINGS, J.N. KARST. *An introduction to Systematic Geomorphology*, Vol 7, M.I.T. Press, Cambridge, 1971.
- MISTRETTA, G. *Monografia do Aquífero Jandaíra da Bacia Potiguar*. Dissertação (Mestrado) - USP, São Paulo, 1984.
- MORAIS, F. & PEREIRA, G.C. Geofísica e Espeleologia Aplicadas à Análise Geomorfológica: Um Estudo de Caso do Entorno da Lagoa da Confusão – TO. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9., 2012. [Anais...] Rio de Janeiro, 2012.
- OLIVEIRA, R.C. *Avaliação do Aquífero Cárstico Jandaíra na Região de Baraúna, RN*. Dissertação . (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN, 2016.
- ORELLANA, E. *Prospección Geoelectrica en Corriente Continua*. Madrid: Paranifo, 1972. 523p.
- PORTO LIRA, H.M. *O Efeito Elétrico das Argilas nos Arenitos - Contribuição ao estudo da correlação resistência transversal x transmissividade hidráulica*. Dissertação (Mestrado) - UFPE, 2001.
- VALOIS, R.; GUÉRIN, R.; PIGEAUD, R.; RODET, J. *Geophysical study to characterize input karst water circulation in the saulges cave* (Mayenne, France). 33 (suppl.) | 2009 Mémoire du sol, espace des hommes.
- VAN NOSTRAND, R.G. & COOK, K.L. *Interpretation of Resistivity Data*. Geological Survey Professional Paper 499, Washington, 1966.