

# A PRESENÇA DE FERRO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DO ESTADO DA BAHIA

CARMO, J. C. C.

Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia - CERB  
Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, jccarmo@hotmail.com

OLIVEIRA, I. B.

Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, oliveira@ufba.br

OLIVEIRA, D. L.

Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, dan\_lima6@hotmail.com

**Resumo:** O objetivo deste artigo é apresentar um diagnóstico da distribuição dos teores de ferro na água subterrânea do Estado da Bahia, buscando estabelecer uma relação com a geologia, e, apresentar de forma sucinta os prejuízos sociais e financeiros originados pela presença deste elemento em concentrações elevadas. Teores elevados de ferro podem limitar o uso da água subterrânea para importantes fins, especialmente para o consumo humano. A avaliação e o gerenciamento desta característica hidroquímica requerem o entendimento de como esse elemento se distribui e, como ele pode estar associado na natureza. Para tal, foram selecionadas de 5.583 poços tubulares profundos construídos pela CERB, análises da água subterrânea, as quais foram submetidas a tratamento estatístico. Os resultados obtidos mostram que 978 amostras, ou 17,51% do universo pesquisado, apresentam teores elevados de ferro, distribuídos em todos os domínios geológicos do território Baiano.

**Abstract:** The objective of this paper is to present a diagnosis of the distribution of iron levels in the groundwater of the State of Bahia, seeking to establish relationship with the geology and succinctly presenting the social and financial losses originated by iron at high concentrations. High levels of iron may limit the use of groundwater for important purposes, especially for human consumption. The assessment and management of this hydrochemical characteristic requires an understanding of how this element is distributed and, how it can be associated in nature. To this purpose, from 5.583 deep wells constructed by CERB, was selected groundwater analysis, which was subjected to statistical treatment. The results show 978 samples, or 17.51% of the studied group, presenting high level of iron, distributed in all geological domain of state of Bahia territory.

**Palavras-chaves:** água subterrânea; ferro; Estado da Bahia.

**Keywords:** groundwater; iron; State of Bahia.

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e industrial vem impulsionando cada vez mais o consumo de água, recurso natural limitado e indispensável à continuidade da vida. O recurso hídrico subterrâneo aparece como reserva estratégica de abastecimento, devido ao seu enorme volume reservado.

As águas subterrâneas representam aproximadamente 95% daquela disponível para o consumo humano, sendo mais protegidas da contaminação do que as águas superficiais (PICANÇO, 2002). Apesar dessa maior proteção dos contaminantes externos, as águas subterrâneas podem apresentar problemas de qualidade, interferindo em seu uso. Dentre esses, um dos mais frequentes consiste na presença de ferro dissolvido em teores elevados, limitando, algumas vezes, a utilização da água (OLIVEIRA et. al., 2003).

No Brasil, as águas subterrâneas são utilizadas largamente no abastecimento de centros urbanos e comunidades rurais, na agricultura irrigada e indústria, na dessedentação animal, como água mineral ou potável de mesa, além de atividades aplicadas ao turismo. Dentre as várias vantagens da utilização das águas subterrâneas, pode-se ressaltar que sua captação apresenta baixos custos se comparados com os das águas superficiais por exigir menos construções, maior facilidade de exploração e menor impacto ambiental, desde que os poços sejam feitos seguindo as normas e a devida outorga do órgão ambiental (STEPHEN, 1988).

No território baiano a presença de teores elevados de ferro na água subterrânea ocorre com bastante frequência, tanto nos aquíferos porosos, como nos cársticos e fissurais. Com base nos dados da CERB – Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia, nos últimos dez anos foram analisados 5.583 amostras de águas subterrâneas, das quais, 978 apresentaram teores de ferro acima de 0,3 mg/l, significando que esses poços deixaram de ser instalados devido ao elevado teor de ferro presente na água, trazendo como consequências prejuízos financeiros para o Estado. Para as comunidades, ficou o terrível sentimento de frustração ao ver o poço perfurado, com água doce e, em seguida, impossibilitado de aproveitamento.

A questão norteadora desse trabalho consiste em obter uma visão geral da distribuição de ferro nas águas subterrâneas do Estado da Bahia, a partir do levantamento de dados das análises físico-químicas de todos os poços perfurados e testados pela CERB no período de 2003 a 2013, com vazão de teste  $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$ , tomando como referência o teor de 0,3mg/l, limite máximo recomendado para o consumo humano pelo Ministério da Saúde, Portaria 2914/2011.

Objetiva-se também promover a geração de informações consistentes que podem ser aproveitadas para uma melhor compreensão desse importante tema, e contribuir com os especialistas no planejamento e no estudo de viabilidade técnica.

## 2 METODOLOGIA

Foi utilizado o Banco de Dados Hidrogeológicos da CERB, com cerca de dezesseis mil poços tubulares perfurados no Estado da Bahia. Também foi utilizado um programa corporativo da empresa denominado COORPORE, como instrumento de pesquisa na geração das informações solicitadas.

Para este estudo preliminar, estabeleceu-se o período de 2003-2013, pelo número significativo de perfuração de poços tubulares realizados no Estado da Bahia, e pela confiabilidade de localização dos poços por estarem georeferenciados.

Foram selecionados todos os poços que apresentaram vazão de teste de bombeamento  $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$ , para melhor adequá-los às condições normalmente exigidas para a implantação de sistemas simplificados de abastecimento a partir de captação subterrânea. Nessa etapa foram selecionados 5.583 poços tubulares que se enquadraram neste requisito.

Os poços foram classificados por municípios/localidades e dados de vazão, e, posteriormente armazenados em planilha para serem confrontados com os resultados das análises físico-químicas da água. Os poços selecionados foram divididos em dois grupos: poços contendo água com teores de ferro  $\leq 0,3\text{ mg/l}$  e aqueles com valores de ferro acima desse parâmetro. Nessa etapa foram identificados 978 poços tubulares contendo amostras de água com teores de ferro  $> 0,3\text{ mg/l}$ , que são o objeto deste estudo. Os dados então foram submetidos a análises estatísticas que permitiram agrupar os diversos teores em classes e daí, poder construir histogramas para representá-los.

Foram utilizadas as seguintes definições:

---

|   |   |
|---|---|
| Número de classes: $K = c + 3,32\log n$ | Valores do Intervalo: $V_i = \frac{M - m}{K}$ |
|---|---|

---

|  |   |
|--|---|
| Coeficiente de variação: $C_v = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100$ | Médias: $\bar{X} = \sum_{i=1}^k X_i \cdot fr_i$ |
|--|---|

---

|  |
|--|
| Desvio padrão: $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k O_i \cdot X_i^2}{n} - \left(\frac{\sum_{i=1}^k O_i \cdot X_i}{n}\right)^2}$ |
|--|

---

As 978 amostras com alto teor de ferro, aqui denominadas de contaminadas, nos diferentes tipos de rochas no território Baiano, foram agrupadas nos cinco domínios da hidrogeologia do Estado da Bahia: sedimentar, metassedimentar, cristalino, calcário e misto. Como resultado desse cruzamento de dados pôde-se obter uma visão geral do comportamento do contaminante ferro na água subterrânea e sua associação com esses grupos de rochas.

### 3 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

A Tabela 1 apresenta os percentuais de poços perfurados de 2003-2013, nos diferentes tipos de rochas no território Baiano, bem como as 978 amostras com alto teor de ferro.

Tabela 1. Poços perfurados pela CERB por domínios geológicos, 2003-2013.

| DOMÍNIOS              | Nº DE POÇOS  | %             | ALTO TEOR DE FERRO | %             |
|-----------------------|--------------|---------------|--------------------|---------------|
| Calcário              | 941          | 16,85         | 93                 | 9,50          |
| Cristalino            | 3372         | 60,39         | 468                | 47,85         |
| Metassedimentar       | 675          | 12,09         | 227                | 23,21         |
| Sedimentar            | 514          | 9,20          | 152                | 15,54         |
| Sedimentar/Cristalino | 81           | 1,47          | 38                 | 3,90          |
| <b>TOTAL</b>          | <b>5.583</b> | <b>100,00</b> | <b>978</b>         | <b>100,00</b> |

Fonte: (CERB, 2014).

A análise dos dados revelou que as 5.583 amostras abrangem praticamente os 417 municípios Baiano. Desse contingente, 978 amostras de água apresentaram teores de ferro acima de 0,3mg/l, correspondendo a 17,51% do total de amostras contaminadas, agora distribuídas em 290 municípios.

A Tabela 2 apresenta a distribuição dos teores de ferro nas amostras da água subterrânea contaminadas, por intervalo de classes especificadas neste trabalho.

Tabela 2. Distribuição dos teores de ferro nas amostras contaminadas por intervalo de classes, 2003-2013

| CLASSES |   |       | $O_i$ | $X_i$  | $f_i$  | $f_iAC$ | $f_i * X_i$ | $X_i^2$ | $O_i * X_i$ | $O_i * X_i^2$ |
|---------|---|-------|-------|--------|--------|---------|-------------|---------|-------------|---------------|
| 0,31    | - | 1,88  | 698   | 1,095  | 0,7137 | 0,7137  | 0,782       | 1,199   | 764,310     | 836,919       |
| 1,89    | - | 3,45  | 137   | 2,668  | 0,1401 | 0,8538  | 0,374       | 7,116   | 365,457     | 974,883       |
| 3,46    | - | 5,01  | 55    | 4,233  | 0,0562 | 0,9100  | 0,238       | 17,916  | 232,799     | 985,371       |
| 5,02    | - | 6,58  | 27    | 5,798  | 0,0276 | 0,9376  | 0,160       | 33,615  | 156,542     | 907,607       |
| 6,59    | - | 8,14  | 18    | 7,363  | 0,0184 | 0,9560  | 0,136       | 54,214  | 132,534     | 975,846       |
| 8,15    | - | 9,71  | 9     | 8,928  | 0,0092 | 0,9652  | 0,082       | 79,712  | 80,353      | 717,404       |
| 9,72    | - | 11,27 | 9     | 10,493 | 0,0092 | 0,9744  | 0,097       | 110,109 | 94,439      | 990,979       |
| 11,28   | - | 12,84 | 7     | 12,058 | 0,0072 | 0,9816  | 0,086       | 145,405 | 84,409      | 1017,837      |
| 12,85   | - | 14,40 | 8     | 13,624 | 0,0082 | 0,9898  | 0,111       | 185,601 | 108,988     | 1484,810      |
| 14,41   | - | 15,97 | 2     | 15,189 | 0,0020 | 0,9918  | 0,031       | 230,696 | 30,377      | 461,393       |
| 15,98   | - | 17,53 | 3     | 16,754 | 0,0031 | 0,9949  | 0,051       | 280,691 | 50,262      | 842,073       |
| 17,54   | - | 19,10 | 0     | 18,319 | 0,0000 | 0,9949  | 0,000       | 335,585 | 0,000       | 0,000         |
| 19,11   | - | 20,66 | 0     | 19,884 | 0,0000 | 0,9949  | 0,000       | 395,378 | 0,000       | 0,000         |
| 20,67   | - | 22,23 | 1     | 21,449 | 0,0010 | 0,9959  | 0,022       | 460,071 | 21,449      | 460,071       |
| 22,24   | - | 23,79 | 0     | 23,014 | 0,0000 | 0,9959  | 0,000       | 529,662 | 0,000       | 0,000         |

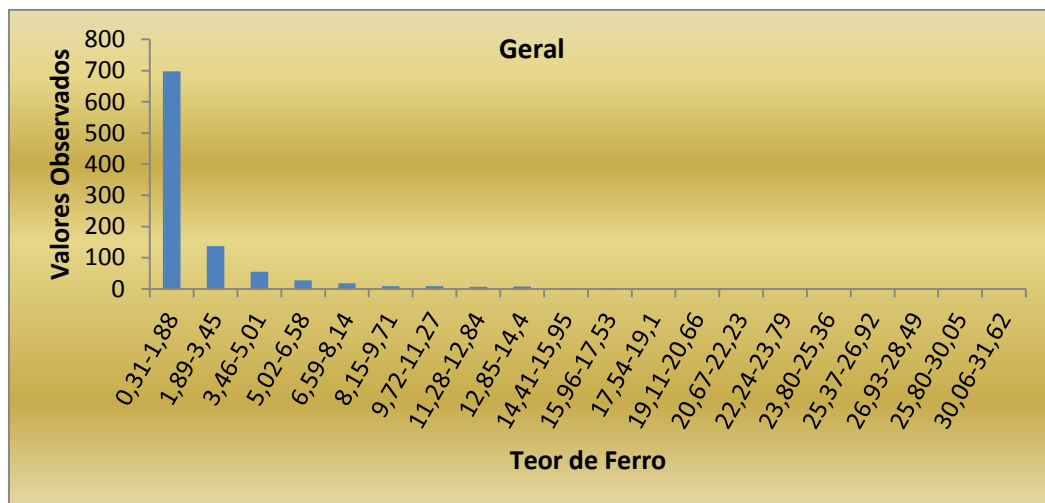
|                  |   |       |     |         |        |        |       |         |          |           |
|------------------|---|-------|-----|---------|--------|--------|-------|---------|----------|-----------|
| 23,80            | - | 25,36 | 1   | 24,580  | 0,0010 | 0,9969 | 0,025 | 604,154 | 24,580   | 604,154   |
| 25,37            | - | 26,92 | 1   | 26,145  | 0,0010 | 0,9980 | 0,027 | 683,544 | 26,145   | 683,544   |
| 26,93            | - | 28,49 | 0   | 27,710  | 0,0000 | 0,9980 | 0,000 | 767,834 | 0,000    | 0,000     |
| 28,50            | - | 30,05 | 1   | 29,275  | 0,0010 | 0,9990 | 0,030 | 857,023 | 29,275   | 857,023   |
| 30,06            | - | 31,62 | 1   | 30,840  | 0,0010 | 1,0000 | 0,032 | 951,112 | 30,840   | 951,112   |
| <b>SOMÁTARIO</b> |   |       | 978 | 319,418 | 1,0000 |        | 2,283 |         | 2232,759 | 13751,023 |

Fontes: (CERB, 2014; REGEO, 1995).

Valores encontrados: Número de classes= 19,93; Valor do intervalo =1,57; Coeficiente de Variação= 129,90; Média=2,710; Desvio Padrão= 2,961.

A Tabela 2 mostra que os teores de ferro variaram de 0,31 mg/l, faixa imediatamente superior ao recomendado pela OMS, a valores extremamente elevados, a exemplo dos encontrados no município de Conceição do Coité, na localidade de Lagoa da Vaca (29,90 mg/l) e no município de Maracás, em Camulengo (31,50 mg/l), dentre outros. O Histograma 1 mostra a distribuição dos teores de ferro por intervalo de classe.

Histograma 1. **Distribuição dos teores de ferro nas amostras contaminadas por intervalo de classes, 2003-2013**



A primeira classe do histograma, que compreende a faixa dos teores de ferro de 0,31 mg/l a 1,88 mg/l apresentou 698 amostras, correspondendo a 71,37% do total de amostras de água subterrânea contaminada por ferro, distantemente seguida pela segunda classe que abrange o intervalo de 1,89 mg/l a 3,45 mg/l, com 137 amostras, representando 14,01% do total de amostras analisadas.

Embora o número de classes utilizadas para representar o universo de amostras contaminadas por ferro tenha sido vinte, existe uma forte concentração de amostras na primeira classe, restando apenas 28,63% de amostras para serem distribuídas nas demais classes, como é demonstrado na Tabela 2.

### *Domínio das rochas cristalinas*

Como indicado na Tabela 3, no universo de 978 amostras contaminadas, as rochas cristalinas apresentaram a maior incidência de ferro em relação aos demais domínios geológicos, estando esse elemento presente em 468 amostras, correspondendo a 47,85% do total de amostras comprometidas. Entretanto, quando esses números são comparados com a quantidade de poços perfurados neste domínio geológico (3.372 poços), representam 13,87% de perdas, se considerado o uso apenas para o consumo humano.

**Tabela 3. Distribuição dos teores de ferro no domínio das rochas cristalinas, 2003-2013**

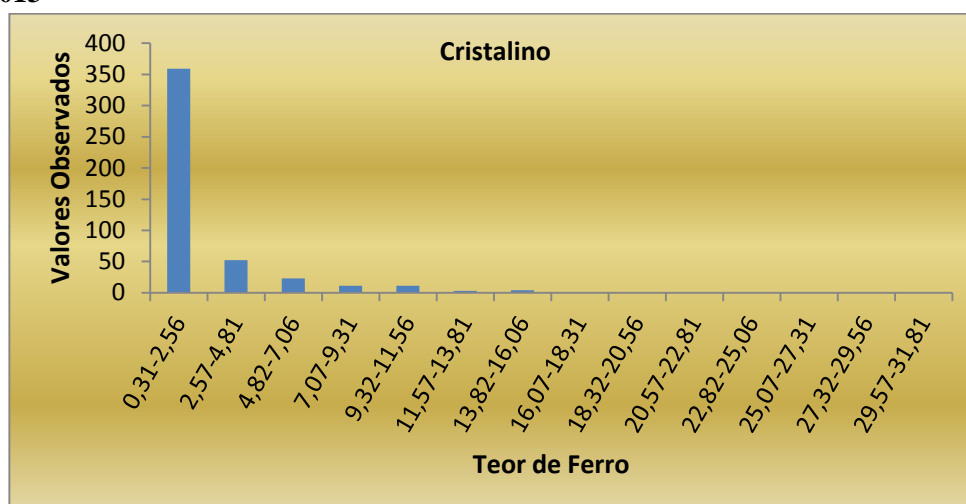
| CLASSES          |   |       | O <sub>i</sub> | X <sub>i</sub> | f <sub>i</sub> | f <sub>i</sub> AC | f <sub>i</sub> *X <sub>i</sub> | X <sup>2</sup> <sub>i</sub> | O <sub>i</sub> *X <sub>i</sub> | O <sub>i</sub> *X <sup>2</sup> <sub>i</sub> |
|------------------|---|-------|----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---|
| 0,31             | - | 2,56  | 359            | 1,435          | 0,7671         | 0,7671            | 1,101                          | 2,059                       | 515,165                        | 739,262                                     |
| 2,57             | - | 4,81  | 52             | 3,690          | 0,1111         | 0,8782            | 0,410                          | 13,616                      | 191,880                        | 708,037                                     |
| 4,82             | - | 7,06  | 23             | 5,940          | 0,0491         | 0,9274            | 0,292                          | 35,284                      | 136,620                        | 811,523                                     |
| 7,07             | - | 9,31  | 11             | 8,190          | 0,0235         | 0,9509            | 0,193                          | 67,076                      | 90,090                         | 737,837                                     |
| 9,32             | - | 11,56 | 11             | 10,440         | 0,0235         | 0,9744            | 0,245                          | 108,994                     | 114,840                        | 1198,930                                    |
| 11,57            | - | 13,81 | 3              | 12,690         | 0,0064         | 0,9808            | 0,081                          | 161,036                     | 38,070                         | 483,108                                     |
| 13,82            | - | 16,06 | 4              | 14,940         | 0,0085         | 0,9893            | 0,128                          | 223,204                     | 59,760                         | 892,814                                     |
| 16,07            | - | 18,31 | 1              | 17,190         | 0,0021         | 0,9915            | 0,037                          | 295,496                     | 17,190                         | 295,496                                     |
| 18,32            | - | 20,56 | 0              | 19,440         | 0,0000         | 0,9915            | 0,000                          | 377,914                     | 0,000                          | 0,000                                       |
| 20,57            | - | 22,81 | 1              | 21,690         | 0,0021         | 0,9936            | 0,046                          | 470,456                     | 21,690                         | 470,456                                     |
| 22,82            | - | 25,06 | 1              | 23,940         | 0,0021         | 0,9957            | 0,051                          | 573,124                     | 23,940                         | 573,124                                     |
| 25,07            | - | 27,31 | 0              | 26,190         | 0,0000         | 0,9957            | 0,000                          | 685,916                     | 0,000                          | 0,000                                       |
| 27,32            | - | 29,56 | 1              | 28,440         | 0,0021         | 0,9979            | 0,061                          | 808,834                     | 28,440                         | 808,834                                     |
| 29,57            | - | 31,81 | 1              | 30,690         | 0,0021         | 1,0000            | 0,066                          | 941,876                     | 30,690                         | 941,876                                     |
| <b>SOMÁTARIO</b> |   |       | 468            | 224,905        | 1,0000         |                   | 2,710                          |                             | 1268,375                       | 8661,297                                    |

Fontes: (CERB, 2014; REGEO 1995).

Valores encontrados: Número de classes= 13,87; valor do intervalo =2,25; Coeficiente de Variação= 123,27; média=2,710; Desvio Padrão= 3,341.

O Histograma 2 mostra a distribuição dos teores de ferro por intervalo de classe, no domínio das rochas cristalinas, onde pode ser observado que, com 359 amostras, segue-se à tendência geral de maior concentração de ferro nas amostras pertencentes à primeira classe (76,71%), que compreende a faixa dos teores de 0,31 mg/l a 2,56 mg/l.

Histograma 2. **Distribuição dos teores de ferro no domínio das rochas cristalinas, 2003-2013**



*Domínio das rochas metassedimentares*

Como indicado na Tabela 4, com a quantidade de 227 amostras, o domínio das rochas metassedimentares, aqui representadas por ardósias, filitos, metasiltitos, matarenitos e quartzitos, representam 23,21% de todas as amostras contaminadas. Quando essas amostras são relacionadas ao número de poços perfurados neste domínio geológico (675 poços), são consideradas impróprias para o consumo humano 33,62%.

Tabela 4. **Distribuição dos teores de ferro no domínio das rochas metassedimentares, 2003-2013**

| CLASSES          |       | O <sub>i</sub> | X <sub>i</sub> | f <sub>i</sub> | f <sub>i</sub> AC | f <sub>i</sub> *X <sub>i</sub> | X <sup>2</sup> <sub>i</sub> | O <sub>i</sub> *X <sub>i</sub> | O <sub>i</sub> *X <sup>2</sup> <sub>i</sub> |
|------------------|-------|----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---|
| 0,31             | 2,73  | 189            | 1,520          | 0,8326         | 0,8326            | 1,266                          | 2,310                       | 287,280                        | 436,666                                     |
| 2,74             | 5,15  | 19             | 3,945          | 0,0837         | 0,9163            | 0,330                          | 15,563                      | 74,955                         | 295,697                                     |
| 5,16             | 7,57  | 7              | 6,365          | 0,0308         | 0,9471            | 0,196                          | 40,513                      | 44,555                         | 283,593                                     |
| 7,58             | 9,99  | 2              | 8,785          | 0,0088         | 0,9559            | 0,077                          | 77,176                      | 17,570                         | 154,352                                     |
| 10,00            | 12,41 | 3              | 11,205         | 0,0132         | 0,9692            | 0,148                          | 125,552                     | 33,615                         | 376,656                                     |
| 12,42            | 14,83 | 3              | 13,625         | 0,0132         | 0,9824            | 0,180                          | 185,641                     | 40,875                         | 556,922                                     |
| 14,84            | 17,25 | 3              | 16,045         | 0,0132         | 0,9956            | 0,212                          | 257,442                     | 48,135                         | 772,326                                     |
| 17,26            | 19,67 | 0              | 18,465         | 0,0000         | 0,9956            | 0,000                          | 340,956                     | 0,000                          | 0,000                                       |
| 19,68            | 22,09 | 0              | 20,885         | 0,0000         | 0,9956            | 0,000                          | 436,183                     | 0,000                          | 0,000                                       |
| 22,10            | 24,51 | 0              | 23,305         | 0,0000         | 0,9956            | 0,000                          | 543,123                     | 0,000                          | 0,000                                       |
| 24,52            | 26,93 | 1              | 25,725         | 0,0044         | 1,0000            | 0,113                          | 661,776                     | 25,725                         | 661,776                                     |
| <b>SOMÁTARIO</b> |       | <b>227</b>     | <b>149,870</b> | <b>1,0000</b>  |                   | <b>2,523</b>                   |                             | <b>572,710</b>                 | <b>3537,988</b>                             |

Fontes: (CERB, 2014; REGEO, 1995)

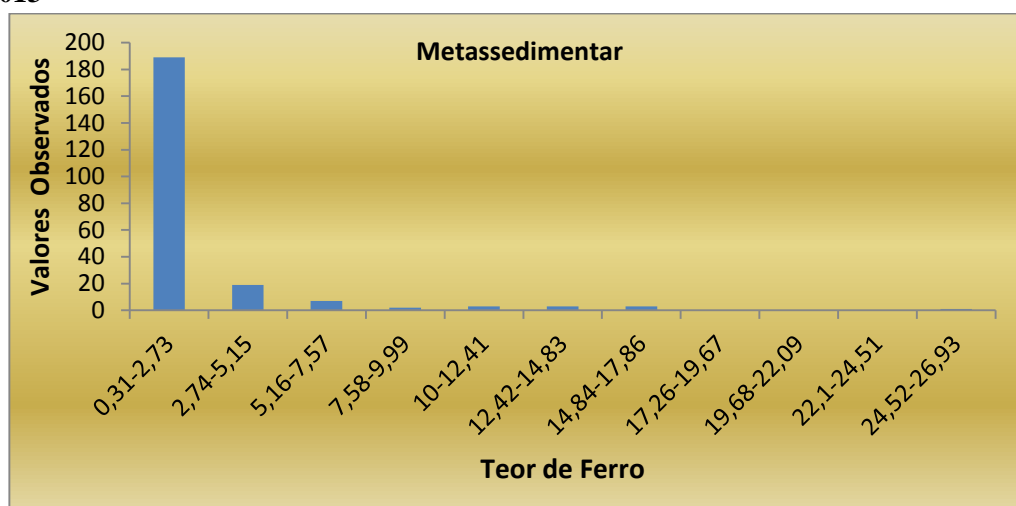
Valores encontrados:

Número de classes= 10,82; Valor do intervalo = 2,42; Coeficiente de Variação= 120,88; Média= 2,523; Desvio Padrão= 3,055.

O Histograma 3 mostra a distribuição dos teores de ferro por intervalo de classe, no domínio das rochas metassedimentares, onde pode ser observado que, com 189

amostras, o comportamento da distribuição dos teores de ferro por classe foi bastante similar ao do padrão geral, concentrando-se maciçamente as amostras na classe inicial, que compreende a faixa dos teores de ferro de 0,31 mg/l a 2,73 mg/l.

Histograma 3. **Distribuição dos teores de ferro no domínio das rochas metassedimentares, 2003-2013**



#### *Domínio das rochas sedimentares*

Como mostrado na Tabela 5, as rochas sedimentares apresentaram 152 amostras de água subterrânea enriquecida em ferro, correspondendo a 15,54% do total das amostras contaminadas. Quando comparadas à quantidade de poços perfurados neste domínio geológico (514 poços), o não aproveitamento dos poços para o consumo humano é de 29,57%.

Esse número é bastante expressivo, considerando que os poços tubulares construídos nessas rochas são caros do ponto de vista financeiro, exigem técnicas especiais de construção, e são responsáveis por grandes projetos de abastecimento de água através de sistema de adutoras que integram sedes municipais, e diversas localidades.

Esse grupo é composto pelas rochas das Bacias Sedimentares do Recôncavo e do Tucano, além dos sedimentos das Formações Urucuaia, Marizal e Barreiras. Portanto, dado a complexidade de análise, estudos futuros devem definir de forma mais detalhada a participação de cada uma dessas rochas no histórico da contaminação, por ferro, da água subterrânea do Estado da Bahia.



Tabela 5. **Distribuição dos teores de ferro no domínio das rochas sedimentares, 2003-2013**

| CLASSES          |       | O <sub>i</sub> | X <sub>i</sub> | f <sub>i</sub> | f <sub>i</sub> AC | f <sub>i</sub> *X <sub>i</sub> | X <sup>2</sup> <sub>i</sub> | O <sub>i</sub> *X <sub>i</sub> | O <sub>i</sub> *X <sup>2</sup> <sub>i</sub> |
|------------------|-------|----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---|
| 0,31             | 1,95  | 109            | 1,130          | 0,7171         | 0,7171            | 0,810                          | 1,277                       | 123,170                        | 139,182                                     |
| 1,96             | 3,59  | 26             | 2,775          | 0,1711         | 0,8882            | 0,475                          | 7,701                       | 72,150                         | 200,216                                     |
| 3,60             | 5,23  | 9              | 4,415          | 0,0592         | 0,9474            | 0,261                          | 19,492                      | 39,735                         | 175,430                                     |
| 5,24             | 6,87  | 2              | 6,055          | 0,0132         | 0,9605            | 0,080                          | 36,663                      | 12,110                         | 73,326                                      |
| 6,88             | 8,51  | 3              | 7,695          | 0,0197         | 0,9803            | 0,152                          | 59,213                      | 23,085                         | 177,639                                     |
| 8,52             | 10,15 | 2              | 9,335          | 0,0132         | 0,9934            | 0,123                          | 87,142                      | 18,670                         | 174,284                                     |
| 10,16            | 11,79 | 0              | 10,975         | 0,0000         | 0,9934            | 0,000                          | 120,451                     | 0,000                          | 0,000                                       |
| 11,80            | 13,43 | 0              | 12,615         | 0,0000         | 0,9934            | 0,000                          | 159,138                     | 0,000                          | 0,000                                       |
| 13,44            | 15,07 | 0              | 14,255         | 0,0000         | 0,9934            | 0,000                          | 203,205                     | 0,000                          | 0,000                                       |
| 15,08            | 16,71 | 1              | 15,895         | 0,0066         | 1,0000            | 0,105                          | 252,651                     | 15,895                         | 252,651                                     |
| <b>SOMÁTÓRIO</b> |       | <b>152</b>     | <b>85,145</b>  | <b>1,0000</b>  |                   | <b>2,005</b>                   |                             | <b>304,815</b>                 | <b>1192,729</b>                             |

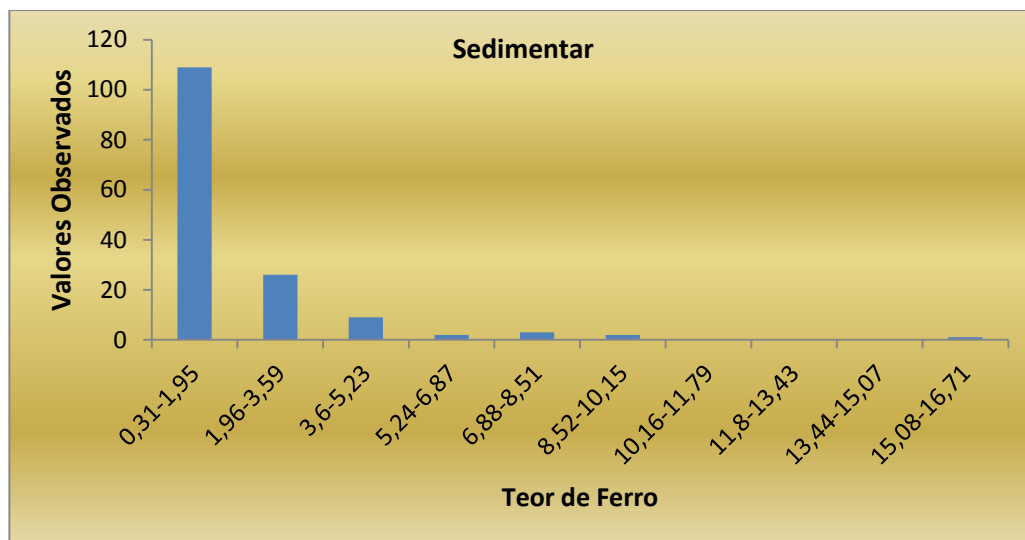
Fontes: (CERB, 2014; REGEO, 1995)

Valores encontrados:

Número de classes= 9,24; valor do intervalo = 1,64; Coeficiente de Variação= 97,53; média= 2,005; Desvio Padrão= 1,956.

O Histograma 4 mostra a distribuição dos teores de ferro por intervalo de classe, no domínio das rochas sedimentares, onde pode ser observado que, com 109 amostras, esse grupo também acompanha a tendência de grande concentração de amostras na primeira classe, que compreende a faixa dos teores de ferro de 0,31 mg/l a 1,95 mg/l.

Histograma 4. **Distribuição dos teores de ferro no domínio das rochas sedimentares, 2003-2013**



#### *Domínio das rochas calcárias*

Como apresentado na Tabela 6, os calcários contribuíram com 93 amostras contaminadas, com a participação de 9,50% sobre o total de amostras contendo elevados teores de ferro. Quando comparadas à quantidade de poços perfurados neste domínio geológico (941 poços), o não aproveitamento para o consumo humano é de 9,88%.

Tabela 6. Distribuição dos teores de ferro no domínio dos calcários, 2003-2013

| CLASSES          |      | O <sub>i</sub> | X <sub>i</sub> | f <sub>i</sub> | f <sub>i</sub> AC | f <sub>i</sub> *X <sub>i</sub> | X <sup>2</sup> <sub>i</sub> | O <sub>i</sub> *X <sub>i</sub> | O <sub>i</sub> *X <sup>2</sup> <sub>i</sub> |
|------------------|------|----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---|
| 0,32             | 1,38 | 64             | 0,850          | 0,6882         | 0,6882            | 0,585                          | 0,723                       | 54,400                         | 46,240                                      |
| 1,39             | 2,44 | 16             | 1,915          | 0,1720         | 0,8602            | 0,329                          | 3,667                       | 30,640                         | 58,676                                      |
| 2,45             | 3,50 | 7              | 2,975          | 0,0753         | 0,9355            | 0,224                          | 8,851                       | 20,825                         | 61,954                                      |
| 3,51             | 4,56 | 3              | 4,035          | 0,0323         | 0,9677            | 0,130                          | 16,281                      | 12,105                         | 48,844                                      |
| 4,57             | 5,62 | 1              | 5,095          | 0,0108         | 0,9785            | 0,055                          | 25,959                      | 5,095                          | 25,959                                      |
| 5,63             | 6,68 | 1              | 6,155          | 0,0108         | 0,9892            | 0,066                          | 37,884                      | 6,155                          | 37,884                                      |
| 6,69             | 7,74 | 0              | 7,215          | 0,0000         | 0,9892            | 0,000                          | 52,056                      | 0,000                          | 0,000                                       |
| 7,75             | 8,80 | 1              | 8,275          | 0,0108         | 1,0000            | 0,089                          | 68,476                      | 8,275                          | 68,476                                      |
| <b>SOMÁTARIO</b> |      | <b>93</b>      | <b>36,515</b>  | <b>1,0000</b>  |                   | <b>1,478</b>                   |                             | <b>137,495</b>                 | <b>348,032</b>                              |

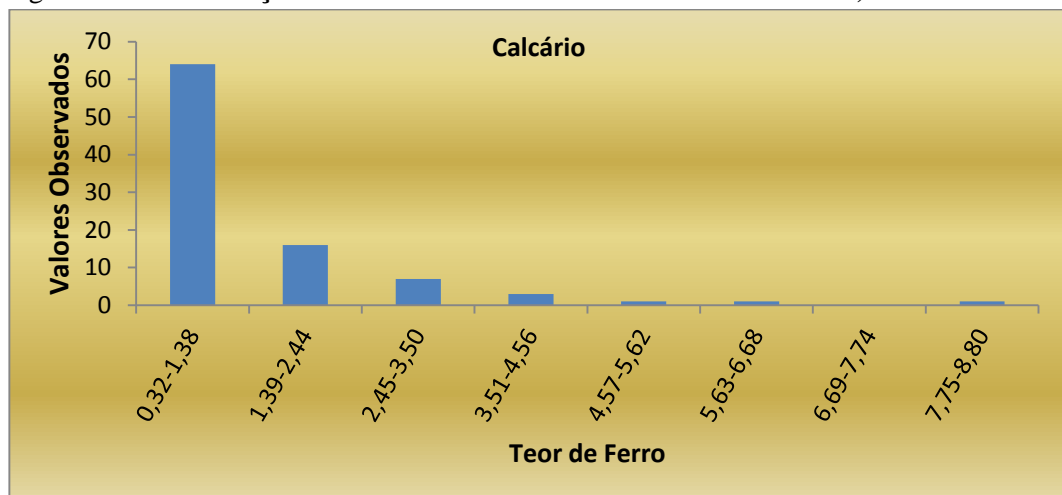
Fontes: (CERB, 2014; REGEO, 1995)

Valores encontrados:

Número de classes= 7,54; Valor do intervalo = 1,06; Coeficiente de Variação= 84,39; Média= 1,478; Desvio Padrão= 1,246.

O Histograma 5 mostra a distribuição dos teores de ferro por intervalo de classe, no domínio das rochas calcárias, onde pode ser observado que, de igual forma, a grande maioria, ou seja, 64 amostras ficaram aglomeradas na primeira classe, que representa a faixa dos teores de ferro de 0,31 mg/l a 1,38 mg/l, seguindo a tendência geral, também.

Histograma 5. Distribuição dos teores de ferro no domínio dos calcários, 2003-2013



#### Domínio das rochas mistas (sedimentar/cristalino)

Como mostrado na Tabela 7 o domínio de rocha mista contribuiu com 38 amostras contaminadas, ou 3,90% sobre o total de amostras contendo elevados teores de ferro. Estas amostras vieram de poços tubulares perfurados inicialmente sobre sedimentos inconsolidados ou sobre rochas sedimentares que, durante os trabalhos de perfuração, foi identificada a ocorrência de rocha cristalina contendo zonas de fraturamentos saturadas em água. Quando comparadas à quantidade de poços perfurados neste

domínio geológico (81 poços), chegam representar, surpreendentemente, uma perda de 46,91%, considerando o uso apenas para o consumo humano.

Nesses casos, como houve o aproveitamento do aquífero superior (poroso), os resultados das análises físico-químicas desses poços podem estar mostrando teores de ferro provenientes de um, ou dos dois aquíferos simultaneamente, já que ambos podem estar sendo explorados, e, portanto, contribuindo para esses valores.

Tabela 7. Distribuição dos teores de ferro no domínio das rochas mistas, 2003-2013

| CLASSES          |       | O <sub>i</sub> | X <sub>i</sub> | f <sub>i</sub> | f <sub>i</sub> AC | f <sub>i</sub> *X <sub>i</sub> | X <sup>2</sup> <sub>i</sub> | O <sub>i</sub> *X <sub>i</sub> | O <sub>i</sub> *X <sup>2</sup> <sub>i</sub> |
|------------------|-------|----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---|
| 0,33             | 2,20  | 28             | 1,265          | 0,7368         | 0,7368            | 0,932                          | 1,600                       | 35,420                         | 44,806                                      |
| 2,21             | 4,07  | 4              | 3,140          | 0,1053         | 0,8421            | 0,331                          | 9,860                       | 12,560                         | 39,438                                      |
| 4,08             | 5,94  | 5              | 5,010          | 0,1316         | 0,9737            | 0,659                          | 25,100                      | 25,050                         | 125,501                                     |
| 5,95             | 7,81  | 0              | 6,880          | 0,0000         | 0,9737            | 0,000                          | 47,334                      | 0,000                          | 0,000                                       |
| 7,82             | 9,68  | 0              | 8,750          | 0,0000         | 0,9737            | 0,000                          | 76,563                      | 0,000                          | 0,000                                       |
| 9,69             | 11,55 | 0              | 10,620         | 0,0000         | 0,9737            | 0,000                          | 112,784                     | 0,000                          | 0,000                                       |
| 11,56            | 13,42 | 1              | 12,490         | 0,0263         | 1,0000            | 0,329                          | 156,000                     | 12,490                         | 156,000                                     |
| <b>SOMÁTARIO</b> |       | <b>38</b>      | <b>48,155</b>  | <b>1,0000</b>  |                   | <b>2,251</b>                   |                             | <b>85,520</b>                  | <b>365,745</b>                              |

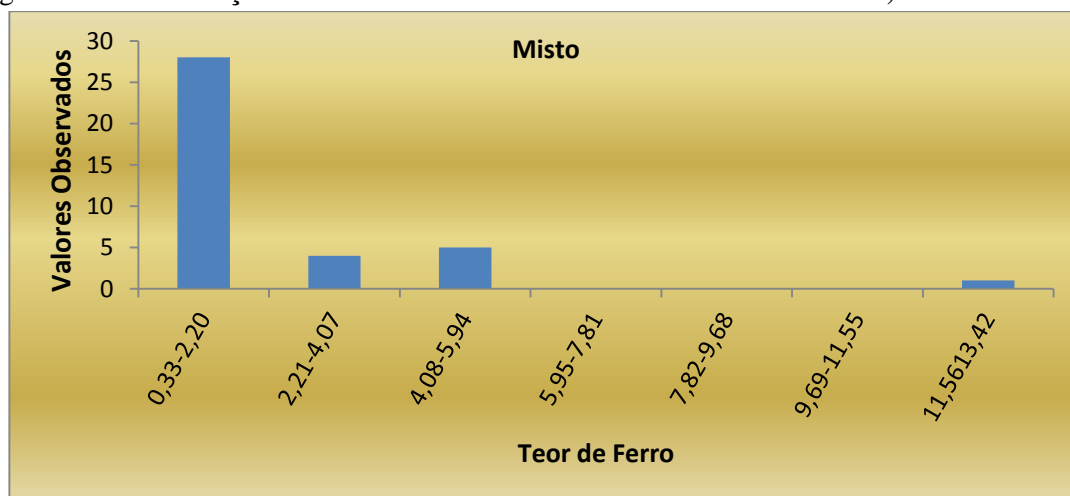
Fontes: (CERB, 2014; REGEO, 1995)

Valores encontrados:

Número de classes= 6,24; Valor do intervalo = 1,87; Coeficiente de Variação= 94,89; Média= 2,251; Desvio Padrão= 2,135.

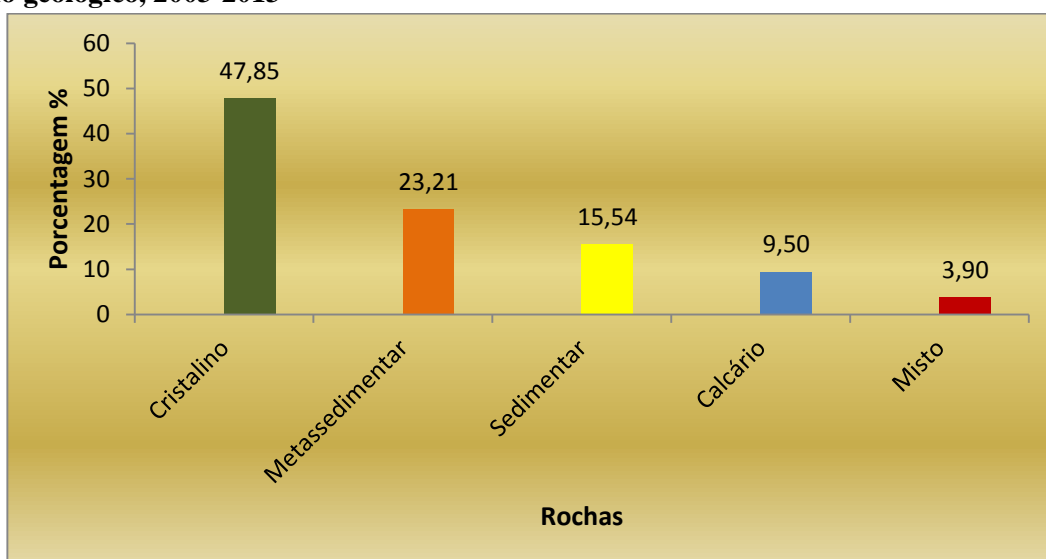
O Histograma 6 mostra a distribuição dos teores de ferro por intervalo de classe, no domínio das rochas mistas, onde pode ser observado que, assim como nos demais domínios geológicos anteriormente mencionados, com 28 amostras, confirma-se a tendência de maior concentração das amostras na primeira classe, que compreende o intervalo de teores de ferro de 0,33 mg/l a 2,20 mg/l.

Histograma 6. Distribuição dos teores de ferro no domínio das rochas mistas, 2003-2013

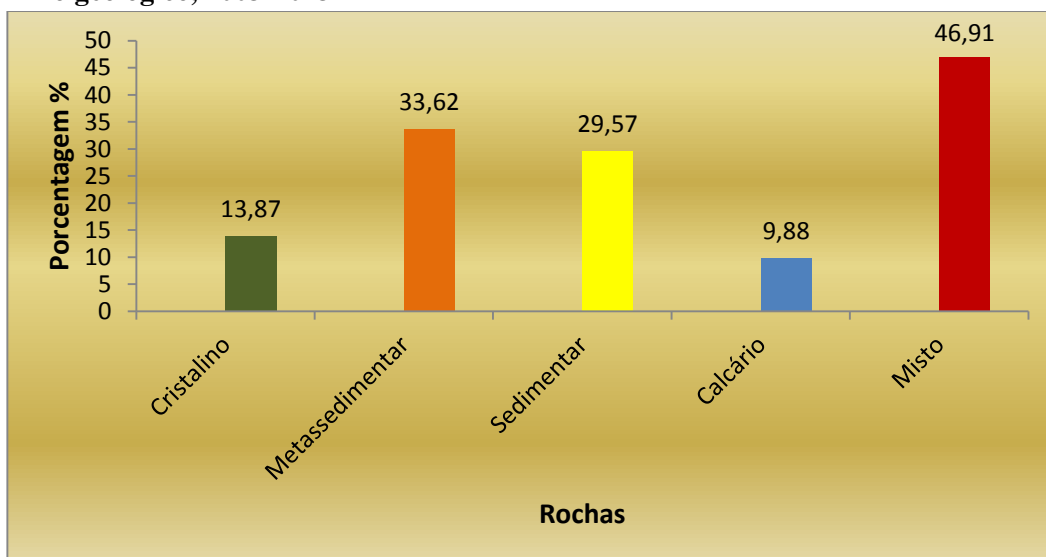


O Histograma 7 apresenta a distribuição percentual da contaminação de ferro por domínio geológico no universo de 978 amostras contaminadas; enquanto o Histograma 8 apresenta a distribuição percentual da contaminação de ferro para cada domínio geológico, levando em conta a quantidade de poços perfurados por domínio. Pode ser notado que os histogramas apresentam padrão bastante diferente entre si, mostrando que a maior perda de poços devido a contaminação por ferro acontece nos aquíferos misto e metassedimentar, seguindo-se do sedimentar, com as menores perdas vindo do domínio cristalino e calcário.

Histograma 7. **Distribuição de ferro no universo de 978 amostras contaminadas, por domínio geológico, 2003-2013**



Histograma 8. **Distribuição de ferro pela relação: poços contaminados - poços perfurados, por domínio geológico, 2003-2013**



## 4 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um diagnóstico da distribuição dos teores de ferro encontrados nas águas subterrâneas do Estado da Bahia, a partir de 5.583 poços perfurados pela CERB, no período de 2003 a 2013, cuja vazão de teste foi  $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$ . Considerou-se no diagnóstico o valor de  $0,3\text{mg/l}$ , como a concentração máxima de ferro recomendada para o consumo humano, como estabelecido pelo Ministério da Saúde, Portaria 2914/2011. Dos resultados obtidos, pôde-se ser observado que:

1. O universo pesquisado foi bastante representativo tanto do ponto de vista quantitativo como do qualitativo, tendo em vista que as amostras estão distribuídas em praticamente todo o Estado da Bahia.

2. Em todos os domínios geológicos da Bahia, mais de 70% das amostras com elevados teores de ferro encontram-se aglomeradas no intervalo de classe inferior, cujo valor margeia o valor aceitável ( $0,3\text{mg/l}$ ).

3. Os valores encontrados para o Coeficiente de Variação (CV) indicam que as distribuições dos teores de ferro podem ser classificadas como muito heterogêneas e heterogêneas.

4. O ferro encontra-se associado a todos os domínios geológicos definidos neste artigo e no domínio das rochas mistas está fortemente presente, ocasionando a perda de 46,91% dos poços construídos para o abastecimento humano. Por outro lado, no domínio das rochas cristalinas, onde 60,39% dos poços foram perfurados, a contaminação por ferro contribuiu com apenas 13,87%, felizmente.

5. A distribuição dos teores de ferro por domínio geológico, quando a análise dos dados é feita no universo das 978 amostras contaminadas, apresenta o seguinte padrão de poços contaminados por domínio: Cristalino > Metassedimentar > Sedimentar > Calcário > Misto. Entretanto, quando a distribuição percentual é calculada no domínio geológico, através da razão entre os poços contaminados e os perfurados, o padrão se inverte: Misto > Metassedimentar > Sedimentar > Cristalino > Calcário. Logo, esses resultados, se analisados isoladamente, podem levar a conclusões equivocadas sobre a distribuição do alto teor de ferro na água subterrânea do Estado da Bahia.

6. Quanto às rochas cristalinas, a explicação adequada é que a quantidade de poços perfurados neste domínio foi superior ao somatório dos poços perfurados nas demais rochas, e assim, quando analisado no universo das 978 amostras contaminadas, este grupo de rochas apresentou a maior incidência de amostras de águas indesejáveis (47,85%). Entretanto, ao ser confrontado pelo quantitativo de poços perfurados (3.372 poços), constatou-se que nele ocorre, proporcionalmente, a menor quantidade de amostras contaminadas (13,87%).

7. Quanto ao domínio das rochas mistas, que apresentou 3,9% de participação no universo de amostras contaminadas, por ter um menor quantitativo de poços perfurados neste domínio (81 poços), apresentou 46,91% de poços comprometidos. Esse fato pode

ser atribuído às localizações dos poços que em grande parte encontra-se em aluviões, coluviões, cordões costeiros e planícies costeiras, que se constituem normalmente, em ambientes enriquecidos em ferro, além do provável incremento provocado pela contribuição dos dois grupos de rochas.

7. Os 978 poços tubulares que apresentaram má qualidade de água e foram rejeitados para o consumo humano, gerou um enorme prejuízo financeiro para o Estado, superior a R\$ 30 milhões, em preços médios atualizados, além de deixar desabastecida milhares de famílias do meio rural com água de qualidade para o consumo humano. É opinião dos autores deste trabalho que tais prejuízos podem ser minimizados se os poços forem destinados para a dessedentação animal e para pequenas agriculturas irrigadas.

## **AGRADECIMENTO**

Os autores agradecem à CERB pela cessão dos dados de hidroquímica da água subterrânea constante em seu Banco de Dados Hidrogeológicos; e pelo uso de seu software corporativo COORPORE.

## **REFERÊNCIAS**

ABAS. **Caderno técnico**. Ministério da Ciência e Tecnologia. São Paulo. 1991. p. 1-65.

BARBOSA F. J. Representatividade da amostragem nos estudos de impactos ambientais. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS –REGEO'95, 3, 1995, Ouro Preto. **Anais**. Ouro Preto, Ed.UFOP, ABGE, ABMS, CBGB, v. 2, p. 665-679.

BRANCO, S. M. Água e o homem. In: **Hidrologia ambiental**. São Paulo: EdUSP, 1991. v. 3.

BRASIL. PORTARIA Nº 2.914, DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011. Dispõe sobre o controle da qualidade da água para consumo humano.

COMPANHIA DE ENGENHARIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS DA BAHIA. **Dados hidrogeológicos de poços**. Salvador: Divisão de Cadastro Hidrogeológico, 2014.

CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. Barcelona: Ediciones Omega, 1983.

DELVIN, T. M. et. al. **Manual de bioquímica com correlações clínicas**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1998.

DRISCOLL, G. **Groundwater and wells**. 2º ed. St. Paul: Johnson Division, 1987.

FEITOSA, F. A.; FILHO, J. M. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, 1997.

HACKETT, G; LEHR, J. H. Ferro-bactérias em poços artesianos: ocorrência, problemas e métodos de controle. **Caderno Técnico ABAS**, São Paulo, set. 1971, p. 1-65.

LEAL, Onofre. **Vulnerabilidade das águas subterrâneas da região metropolitana do Recife**. Recife: CPRM, 1994. v. 2. (Série Recursos Hídricos).

MACÊDO, J. A. **Águas e águas**. São Paulo: Varela, 2001.

MADEIRA, V. S. **Desenvolvimento de um carvão adsorvente para remoção de íons ferro em águas**. Santa Catarina: UFGS, 2003. (Dissertação de Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química.

MAHAN, B. M. **Química: curso universitário**. 4º ed. São Paulo: Ed. Blücher, 2000.

MENESES, M. A. **Ferro-bactérias em Água Subterrânea: estudo de caso no Ceará**. São Paulo: USP, 1992. (Dissertação de Mestrado).

OLIVEIRA, D. A.; SCHMIDT, G.; FREITAS, D. M. **Avaliação do teor de ferro em águas subterrâneas de alguns poços tubulares no Plano Diretor de Palmas**. Palmas: UFT, 2003.

PICANÇO, F. E. L.; LOPES, E. C. S; SOUZA, E. L. de. **Fatores responsáveis pela ocorrência de ferro em águas subterrâneas da região metropolitana de Belém/PA**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12, 2002, São Paulo. **Resumos**. São Paulo: ABAS, 2002.

PLANETA Terra: Ciências da Terra para a Sociedade, 2007-2009. Disponível em: <[www.yearofplanetearth.org](http://www.yearofplanetearth.org)>. Acesso em: 25 mar. 2014.

PORPINO, K. K. P. **Biossorção de ferro (II) por casca de caranguejo**. João Pessoa: UFP, 2009. (Dissertação de Mestrado).

RICHTER, C.A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água, tecnologia atualizada**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher. 1991.

STEPEHN, S. D. F.; HIRATA, R. C.; ROCHA, G. A. **Riscos de poluição de águas subterrâneas: uma proposta de avaliação regional**. São Paulo: ABAS, 1988.

YAMAN, M.; KAYA, G. Speciation of iron (II) and (III) by using solvent extraction and flame atomic absorption spectrometry. **Analytica Chimica Acta**, v. 540, n. 1, p. 77-81, maio 2005.