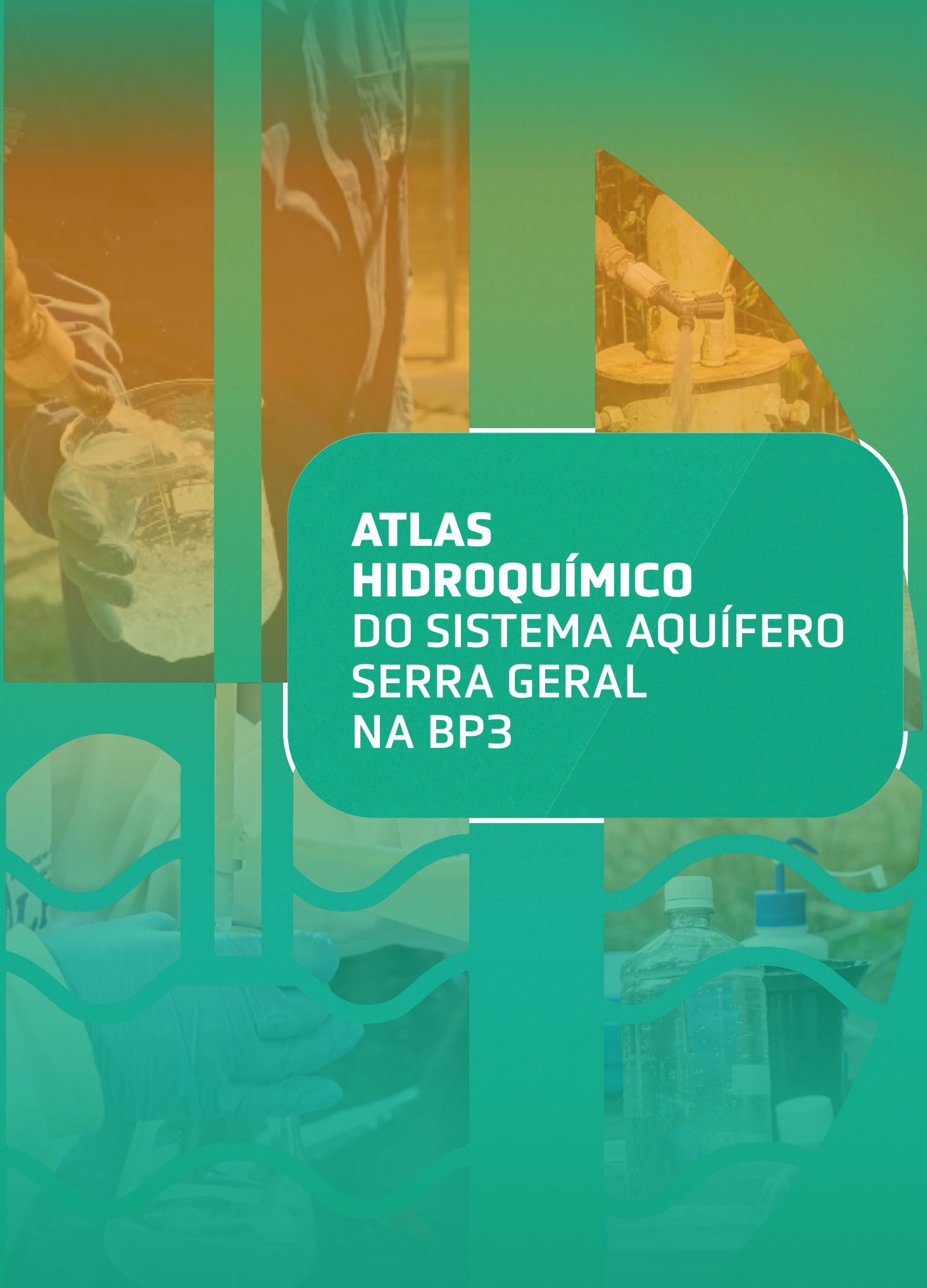


ATLAS HIDROQUÍMICO DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL NA BP3

Hidrosfera

Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas LPH

UFPR

Núcleo de Inteligência Territorial

itaipu parquetec

ITAIPU BINACIONAL MAIS QUE ENERGIA

GOVERNO FEDERAL BRASIL UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

Introdução:

O conhecimento da composição química das águas subterrâneas é fundamental para compreender suas aptidões, e assim realizar seu aproveitamento da forma mais sustentável.

A assinatura química de um aquífero representa a trajetória das águas subterrâneas desde sua recarga até seu armazenamento nas rochas, ou seja, fatores como o tipo de rocha, clima e uso do solo são importantes fontes de elementos químicos para as águas subterrâneas.

Existem poços na região com diferentes proporções de minerais dissolvidos, originados de diferentes tipos de rochas, com distintos graus de alteração e composições químicas. Identificar e compreender esta diversidade química nas águas subterrâneas e sua interação com processos do Sistema Terra: como ciclo da água (chuva, vazão de poços, profundidade da água), tempo geológico, geomorfologia, interferências antrópicas; são elementos fundamentais para o uso sustentável de Sistemas Aquíferos.

Sob a região da Bacia Paraná 3 (BP3) encontram-se rochas vulcânicas e vulcanoclásticas básicas, cujas estruturas e fraturas permitem a circulação de água em diversas profundidades, com diversas características hidroquímica e diferentes processos (naturais e antrópicos). Este complexo sistema de rochas é denominado de Sistema Aquífero Serra Geral.

Estas águas subterrâneas representam mais de 89% do volume utilizado no abastecimento público, e mais de 50% do volume destinado a agroindústria na BP3. A importância das águas subterrâneas para a BP3 levou o Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH) da UFPR, a Itaipu Binacional e o Itaipu Parquetec a idealizarem o Projeto Hidrosfera.

O Projeto Hidrosfera iniciou em 2018, e mantém de forma sistemática o monitoramento hidrodinâmico e hidrogeoquímico do Sistema aquífero Serra Geral (SASG) na BP3.

Amostras de água subterrânea são coletadas trimestralmente em poços tubulares utilizados no abastecimento público da BP3. Os resultados representam um histórico de monitoramento iniciado em 2019, mantendo e ampliando o número de poços pertencentes a rede a cada fase do projeto. A coleta trimestral (janeiro, abril, julho e outubro) tem o intuito de verificar as variações que ocorrem ao longo do ciclo hidrológico.

O "Atlas Hidroquímico do Sistema Aquífero Serra Geral na BP3" tem o intuito de divulgar os resultados do projeto Hidrosfera em prol da sociedade, visando subsidiar a gestão das águas subterrâneas. Os mapas hidroquímicos apresentados neste atlas foram elaborados a partir dos valores medianos das variáveis hidroquímicas.

Cabe destacar que devido a dimensão da BP3 (aproximadamente 8.000 km²), os dados aqui apresentados devem ser utilizados com ressalva pois trata-se de um sistema aquífero vulcânico heterogêneo. Estudos de detalhe devem ser realizados visando reduzir o risco exploratório.

O conhecimento pela sociedade da importância do Sistema Aquífero Serra Geral como imprescindível fonte de abastecimento na BP3, que proporciona desenvolvimento social sustentável, inclusive em períodos de variabilidade climática, impulsiona a divulgação destes resultados neste atlas.

Esperamos que este material seja utilizado visando o uso sustentável das águas subterrâneas na BP3. Desejamos também que fomente pesquisas científicas de maior detalhe, a partir de hipóteses levantadas ao analisar os resultados aqui apresentados.

Boa leitura.

Professora Camila de Vasconcelos Müller Athayde
Professor Gustavo Barbosa Athayde

Editor Responsável:

Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde (LPH – UFPR)

Autores:

Dra. Bianca do Amaral (ITAIPU PARQUETEC)

Prof.ª Dra Camila de Vasconcelos Müller Athayde (LPH – UFPR)

Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde (LPH – UFPR)

Eng. Lucas Henrique Garcia (ITAIPU BINACIONAL)

Eng.ª Milena Cornelio Olivi (ITAIPU PARQUETEC)

Dra Patricia de Andrade Nascimento (LPH – UFPR)

M.Sc. Rodrigo Aguilar Guimarães (LPH – UFPR)

Este atlas foi elaborado a partir dos resultados obtidos no Projeto Hidrosfera (Convênio LPH-UFPR, Itaipu Binacional e Itaipu Parquetec).

Hidrosfera





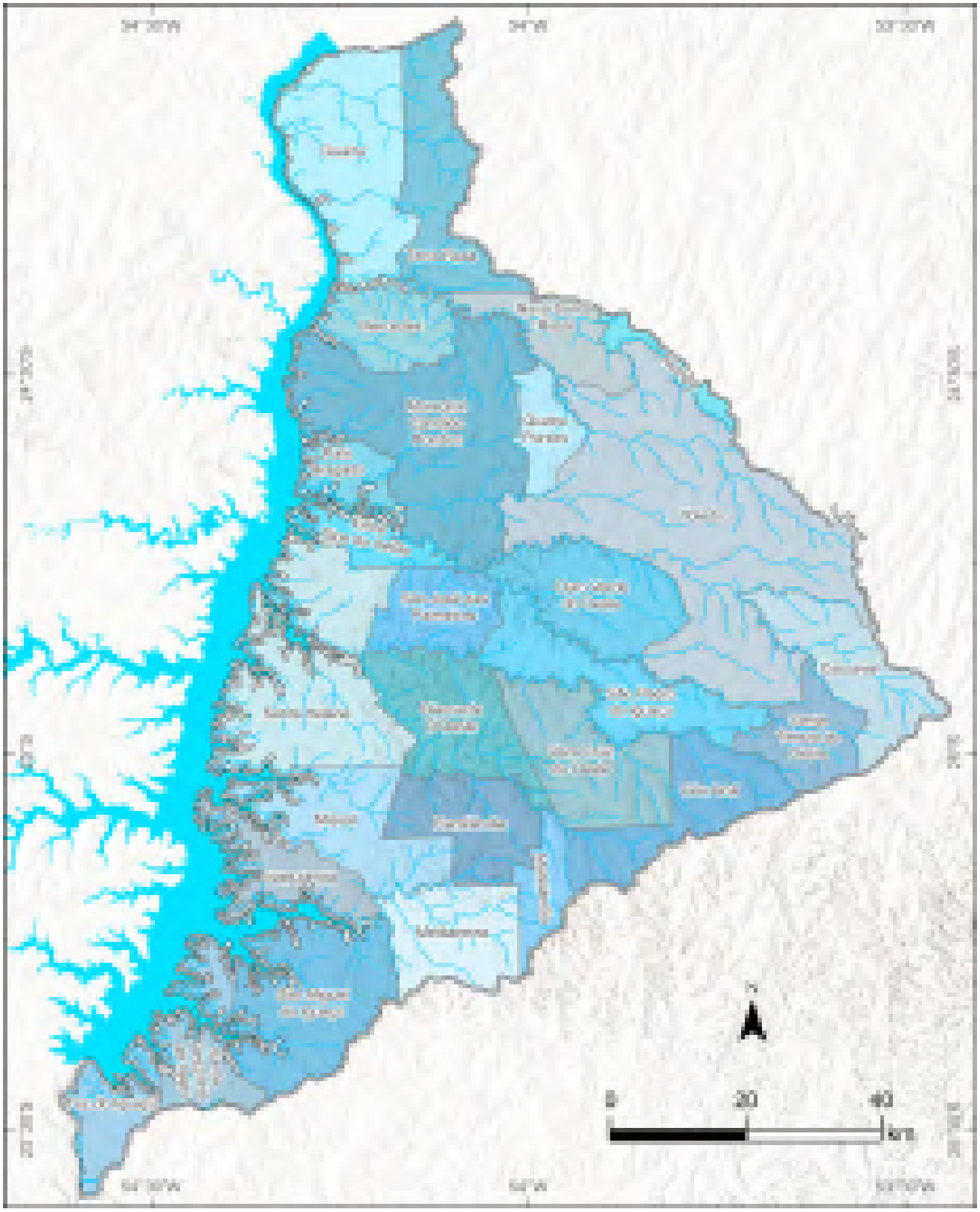
O TERRITÓRIO DA BACIA HIDROGRÁFICA PARANÁ 3 (BP3)

A BP3 está localizada no oeste do estado do Paraná, compreendendo os seguintes municípios: Cascavel, Céu Azul, Diamante D'Oeste, Entre Rios do Oeste, Foz do Iguaçu, Guaíra, Itaipulândia, Marechal Cândido Rondon, Maripá, Matelândia, Medianeira, Mercedes, Missal, Nova Santa Rosa, Ouro Verde do Oeste, Pato Bragado, Quatro Pontes, Ramilândia, Santa Helena, Santa Tereza do Oeste, Santa Terezinha de Itaipu, São José das Palmeiras, São Miguel do Iguaçu, São Pedro do Iguaçu, Terra Roxa, Toledo, Tupãssi e Vera Cruz do Oeste (IAT 2023).

Afloram na BP3 basaltos e outras rochas vulcânicas do Grupo Serra Seral, as quais hospedam o Sistema Aquífero Serra Geral. Mais de 2000 poços tubulares estão outorgados nesta bacia hidrográfica.

O mapa com a divisa municipal da BP3 e principais drenagens está apresentado na figura abaixo e está apresentado como mapa base para todos os mapas deste atlas. Ressalta-se que o reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu, no extremo oeste da área, marca o exutório destas drenagens, ou seja, os principais rios da região deságuam neste importante reservatório superficial.

Municípios da Bacia Hidrográfica Paraná 3



ROTINA DE COLETA E ANÁLISES EM CAMPO

As coletas do projeto Hidrosfera são realizadas em poços tubulares destinados a abastecimento. Para amostragem destes poços tubulares na BP3 são percorridos cerca de 1500 km, em cinco dias de coletas, a partir de Foz do Iguaçu – PR.

As coletas são realizadas lavando-se três vezes os frascos que receberão as amostras com a própria água a ser amostrada, para posterior coleta e armazenamento.

Em campo, durante as coletas são realizadas as análises de cloro livre, temperatura, pH (potencial hidrogeniônico), turbidez, potencial de oxido-redução (ORP), condutividade elétrica, oxigênio dissolvido (OD) e sólidos totais dissolvidos. Para tais análises fotômetros e sondas multiparâmetros são utilizadas.

Assim que as amostras chegam ao laboratório de campo, são realizadas as análises de alcalinidade, e no dia posterior a coleta, são realizadas as análises de nitrogênio total, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, fosfato e acidez. Para tais análises foram utilizados espectrofotômetros e tituladores automáticos. Após essas análises as amostras são condicionadas em caixas térmicas até o fim da etapa de campo e transportadas para Curitiba e Foz do Iguaçu onde são analisadas em relação aos demais parâmetros.

As frações das amostras que serão posteriormente analisadas por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES) são acidificadas com HNO_3 Enquanto as amostras que serão posteriormente analisadas por cromatografia para quantificação de agrotóxicos, são filtradas.



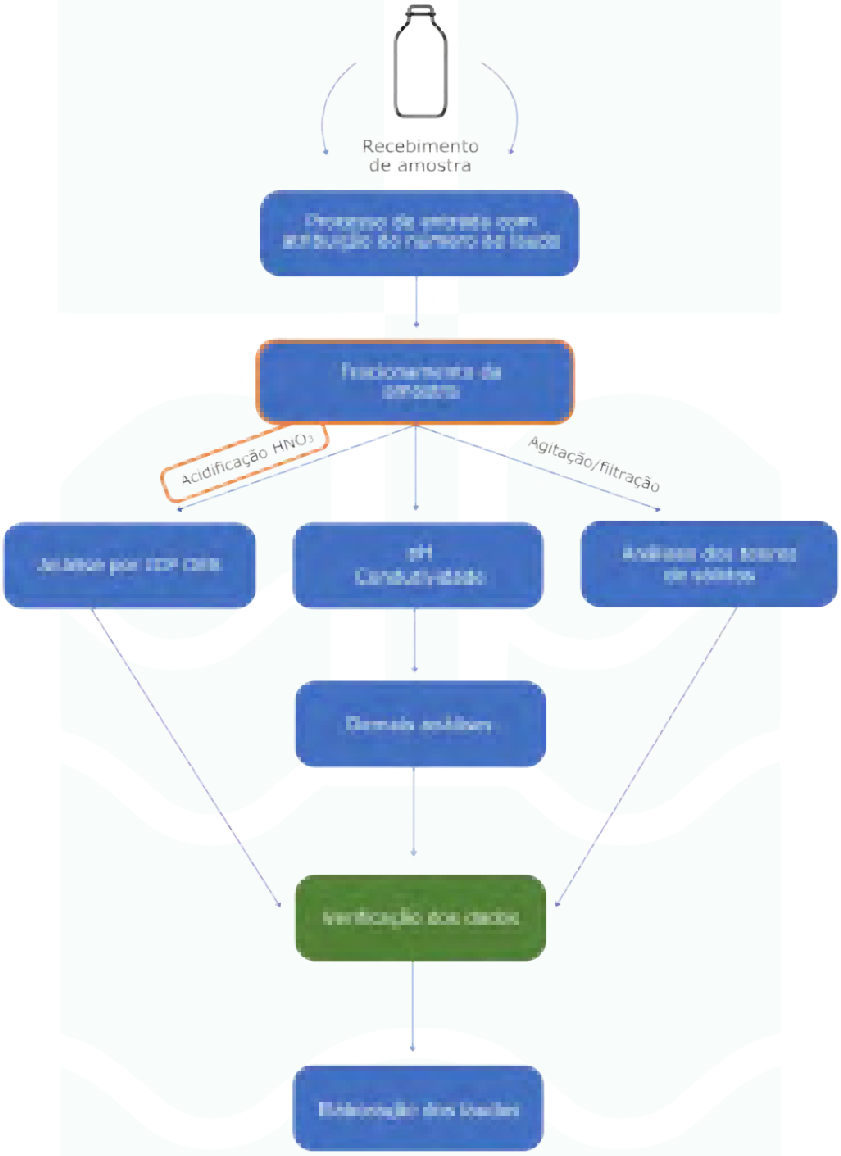
- Fotografia do laboratório de campo instalado no Hotel Hospedare em Marechal Cândido Rondon.

ROTINA ANALÍTICA LABORATORIAL
(LPH E ITAIPU PARQUETEC)

Ao chegar no laboratório de pesquisas hidrogeológicas (LPH) as amostras recebem um número de entrada e novamente tem seu pH e condutividade elétrica analisados visando as demais análises que serão realizadas. No LPH também são realizadas as análises de cor, dureza, sólidos totais dissolvidos e sólidos totais a 103ºC, cálcio, magnésio, sódio, potássio, cloreto, fluoreto, sulfato, sílica, ferro, manganês e mais elementos da tabela periódica por ICP OES, conforme demonstrado no fluxograma abaixo. Além da repetição da alcalinidade por outra técnica analítica (titulação).

As amostras recebidas no Itaipu Parquetec são codificadas e filtradas para análise de íons dissolvidos como fluoreto, cloreto, nitrato, nitrito, sulfato, fosfato, lítio, sódio, amônio, potássio, cálcio e magnésio por cromatografia de íons.

Para a verificação dos resultados obtidos, teste de precisão e exatidão são realizados levando-se em consideração as análises realizadas em triplicatas, como nas técnicas de titulação, ICP OES, fotometria e, gravimetria e cromatografia de íons. Paras as demais análises, os resultados obtidos por diferentes técnicas são comparados entre si. Além do mais, uma vez por mês ensaios de reprodutibilidade são realizados.



Etapas para análises das amostras após entrega no laboratório de pesquisas hidrogeológicas (LPH). Observação: etapas com contorno laranja são previamente realizadas durante a fase de campo.

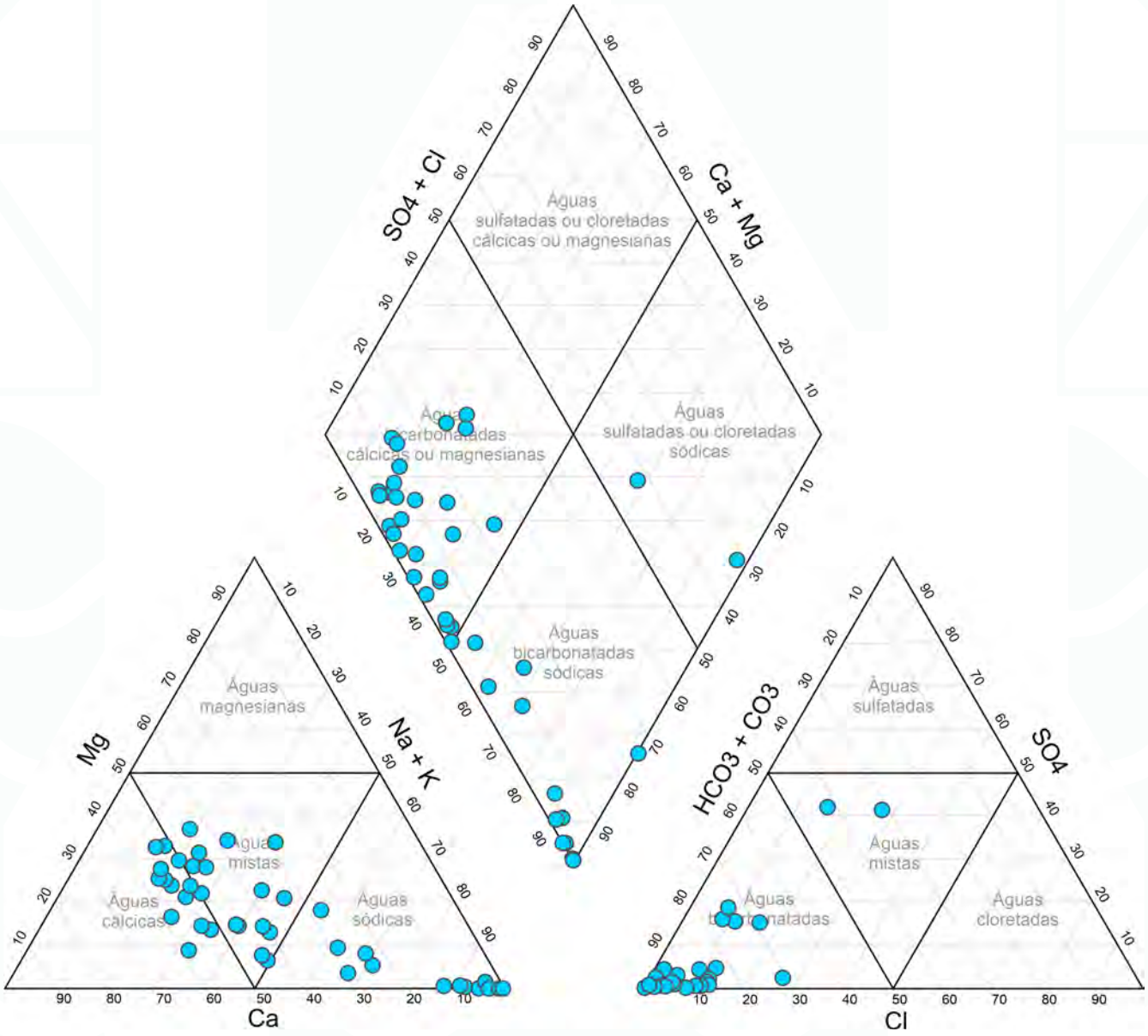
CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS NA BP3

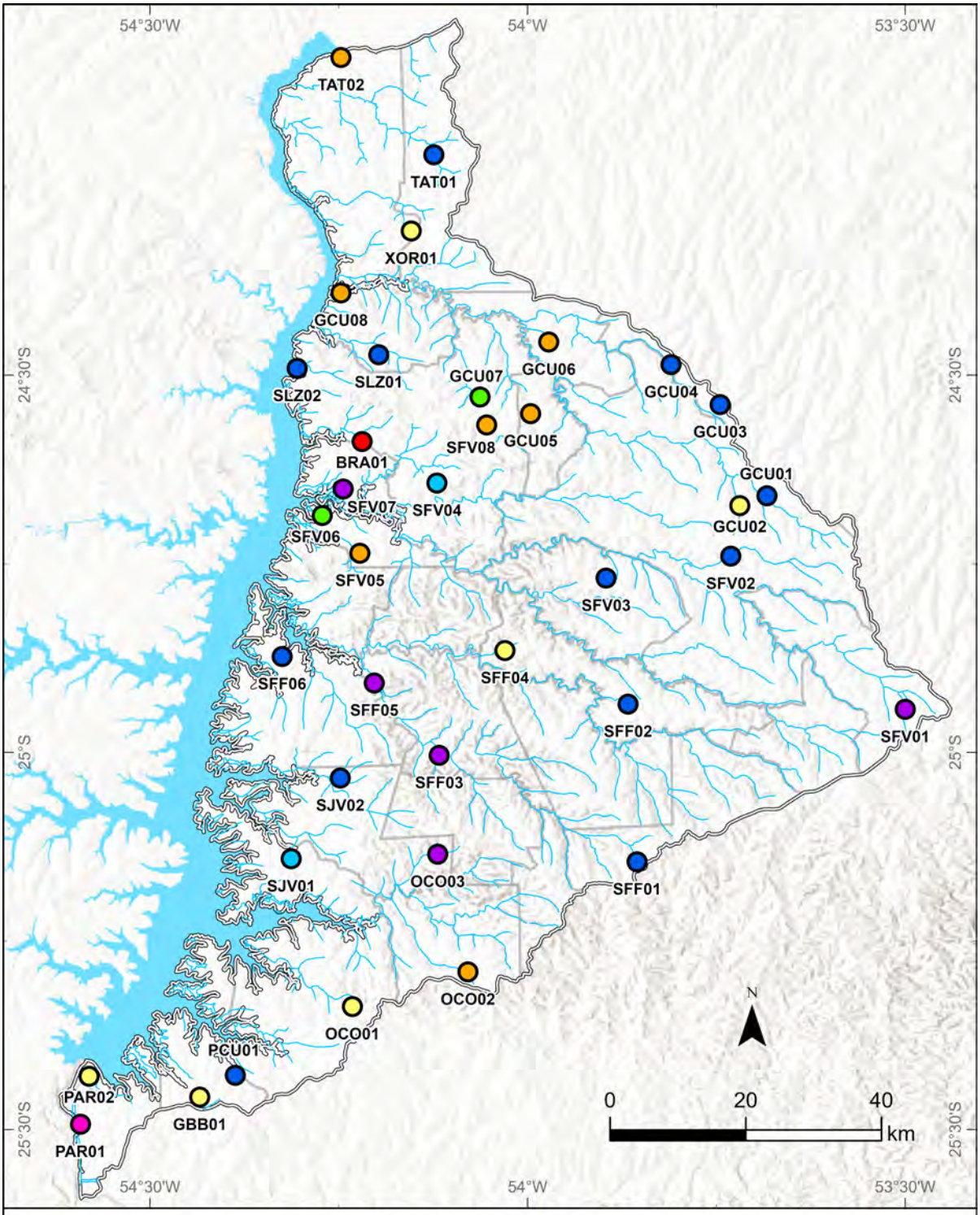
Os aquíferos são importantes reservatórios de água, sendo assim devemos aprimorar nosso conhecimento científico para garantir água com quantidade e qualidade para as gerações atuais e futuras.

Neste sentido, para diferenciar processos naturais e facilitar a interpretação da composição química das águas subterrâneas, pode ser atribuída uma classificação de tipos de água em função dos principais íons dissolvidos em cada amostra. A quantidade de cátions (íon de carga positiva) e ânions (íons de carga negativa) em uma amostra tende a ser a mesma, ou seja, a água tende a um equilíbrio químico. Por exemplo, se uma amostra apresenta mais de 50% dos seus ânions (carga negativa), sendo compostos por bicarbonato (HCO_3^-), ela será do tipo bicarbonatada. Se além disso, ela possuir mais de 50% dos cátions (carga positiva), compostos por magnésio (Mg^{2+}), será do tipo magnesiana. Neste exemplo a água do poço será classificada como bicarbonatada magnesiana.

O Diagrama de Piper é frequentemente utilizado para classificação e comparação de distintos grupos de águas quanto aos íons dominantes e mostra a classificação das amostras segundo este critério. A representação gráfica pode evidenciar possíveis relações entre íons de uma mesma amostra, ou ressaltar variações temporais ou espaciais existentes. O diagrama de Piper com a mediana das concentrações provenientes das campanhas de amostragens é amostrado a seguir.

Na BP3 foram classificados nove tipos de água (veja mapa com a classificação das águas). Predominam águas bicarbonatadas cálcicas (14 poços), seguida por águas tipo bicarbonatada sódica (7 poços), bicarbonatada sódica-cálcica (6 poços), bicarbonatada cálcica-magnesiana (4 poços), carbonatada sódica (4 poços),bicarbonatada cácica-sódica (2 poços), bicarbonatada magnesiana – sódica (1 poço), bicarbonatada-sulfatada sódica (1 poço) e sulfatada carbonatada-sódica (1 poço).





Classificação da água

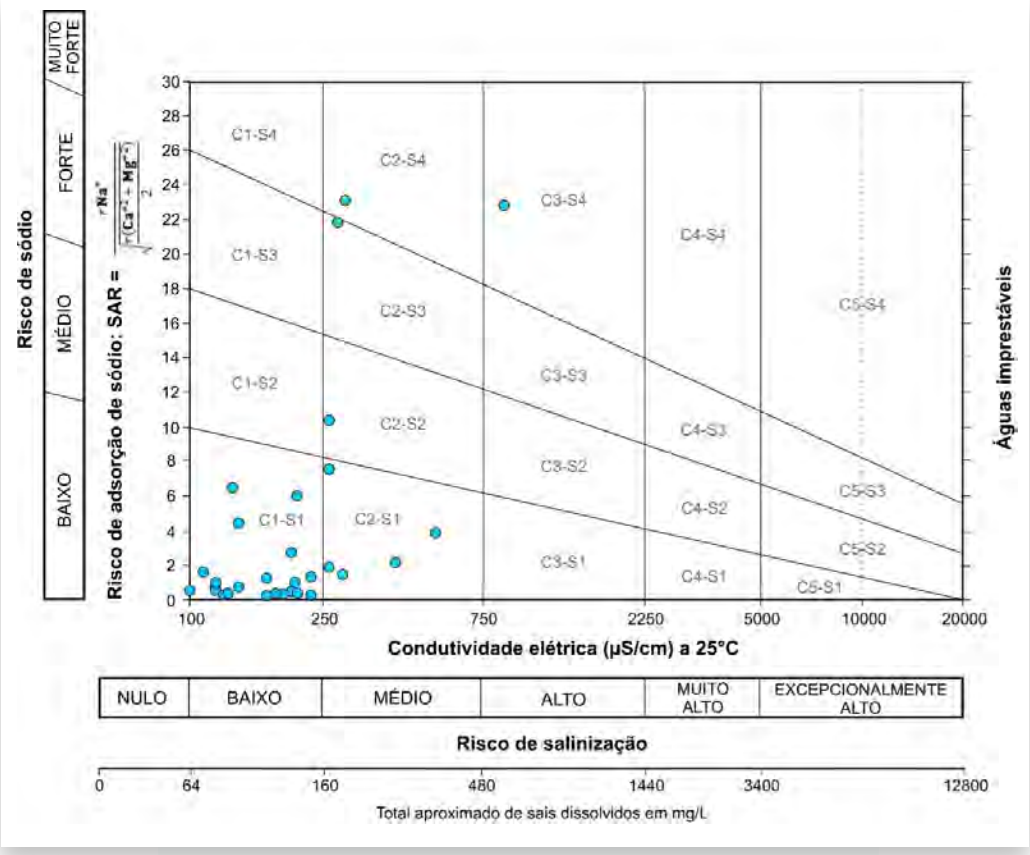
- Bicarbonatada cálcica
- Bicarbonatada cálcica-magnesiana
- Bicarbonatada cálcica-sódica
- Bicarbonatada sódica-cálcica
- Bicarbonatada sódica
- Bicarbonatada-sulfatada sódica
- Carbonatada sódica
- Sulfatada-carbonatada sódica

APTIDÃO PARA IRRIGAÇÃO
(SAR-USGS)

A aptidão das águas para irrigação é determinada pela concentração de alguns íons, tais como o sódio, o potássio, o cloreto e o sulfato, e por parâmetros como os sais dissolvidos, a condutividade elétrica e a concentração total de cátions, que influenciam de maneira diferenciada no crescimento de cada espécie vegetal.

Dentre os critérios de classificação da água para fins de irrigação, um dos mais aceitos atualmente é a classificação proposta pelo United States Salinity Laboratory (USSL). Esta classificação baseia-se na razão de adsorção de sódio (SAR) e na condutividade elétrica (C.E.) da água.

A grande maioria das águas pode ser utilizada para irrigação (veja abaixo o gráfico SAR-USGS), demonstrando o potencial de abastecimento deste aquífero em diferentes usos. Casos específicos de restrição por sódio podem ser resolvidos com diluição utilizando fonte alternativa de abastecimento.



MAPAS HIDROQUÍMICOS MULTIELEMENTARES

Conhecer a distribuição espacial dos elementos químicos permite identificar associações que indiquem assinaturas naturais nas águas (fonte geológica dos elementos químicos) e locais onde o uso do solo contribui como fonte dos elementos, caracterizando uma assinatura antrópica.

O projeto Hidrosfera coleta de forma sistemática, trimestralmente, águas nos poços tubulares da BP3. Aqui neste atlas estão representadas as concentrações medianas de cada elemento químico e parâmetro apresentado, em um universo amostral de 12 campanhas trimestrais entre os anos de 2019 e 2024.

Apresentar em mapa as concentrações de elementos químicos que possuem ordens de grandeza variadas necessita de um tratamento estatístico prévio para apresentação das legendas.

A legenda de cores e respectivos intervalos de classes utilizados nos mapas hidroquímicos foram baseadas nos seguintes percentis: 5, 15, 25, 40, 50, 65, 75, 85, 90, 91, 93, 95, 97, 98, 99 e 100.

Os valores abaixo do percentil 25 (primeiro quartil) são apresentados como pontos pretos nos mapas. Valores acima do percentil 25 e abaixo do percentil 75 (terceiro quartil) estão dentro da faixa de "normalidade" e encontram-se representado por pontos azuis no mapa. Valores acima do percentil 75 e abaixo do percentil 93 estão "acima do normal" e são representados por pontos verdes. Já valores acima do percentil 93 a abaixo do percentil 98 são considerados "altos" e estão representados pelas cores amarelo e laranja. Por fim, valores acima do percentil 98 até o valor máximo são considerados "muito altos" e estão representados pela dor vermelha nos mapas hidroquímicos.

Mapas hidroquímicos multielementares permitirão aos leitores conhecer padrões hidroquímicos do aquífero, em uma escala regional.

Devido a heterogeneidade do SASG, a aplicação do conhecimento gerado por este atlas deve ser complementada por estudos de detalhe, visando reduzir as incertezas inerentes deste tipo de aquífero, quando da execução de obras e projetos em escala diferente deste trabalho. Use com cautela a informação aqui apresentada, devido a escala regional deste trabalho.

Alcalinidade / Bicarbonato / Carbonato

A alcalinidade da água é definida pela sua capacidade de neutralizar ácidos e está comumente associada aos teores de bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) e hidróxido (OH-) presente em seu meio. Entretanto, os valores medidos podem levar em consideração teores de outros compostos como: fosfatos, silicatos, ácido húmico, ácido acético e outras bases que se encontram em baixas concentrações (APHA, 2017).

De modo geral a alcalinidade não é utilizada para padrão de potabilidade, sendo o valor pH o parâmetro comumente empregado. No entanto o estudo da alcalinidade é imprescindível nas etapas de tratamento de água e efluentes, sendo em função do seu teor que se estabelece a quantidade de produtos químicos a ser utilizada nas diferentes etapas do tratamento (MPAA, 2004).

Uma vez que os teores dos demais compostos (fosfatos, silicatos, entre outros) que constituem a alcalinidade tendem a ser baixos em águas subterrâneas, o seu teor é frequentemente expresso em termos de carbonato de Cálcio ($CaCO_3$).

A predominância de íons carbonatos ou bicarbonatos dependem da variação de pH. Em efeito, em pH acima de 8,2 ≈ 8,3 ocorre a predominância de íons carbonatos, enquanto em pH menores os íons bicarbonato predominam (MPAA, 2004; Rosa Filho et al., 2010).

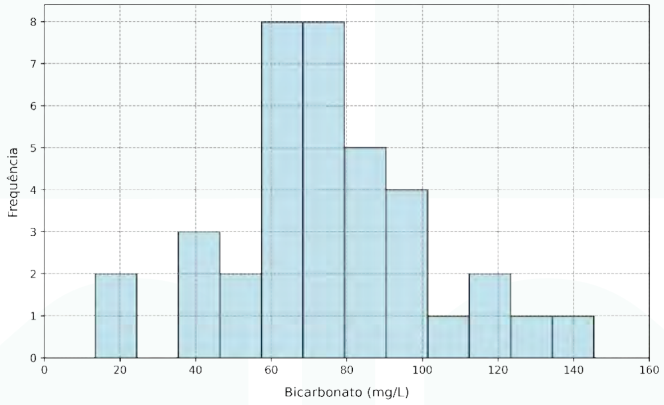
Em águas naturais doces os teores de bicarbonato tendem a ser maiores em relação aos íons carbonatos, visto a faixa de pH (<8,2). Enquanto o íon bicarbonato se mostra benéfico para os vegetais até concentrações em torno de 91,5 mg/L, o íon carbonato apresenta riscos as plantações. Isso porque na forma de carbonato de sódio (Na2CO3) é considerado tóxico para os vegetais. (Neven, 2006). Entretanto, no que diz respeito aos teores desses íons e compostos para o consumo humano, não há referências.

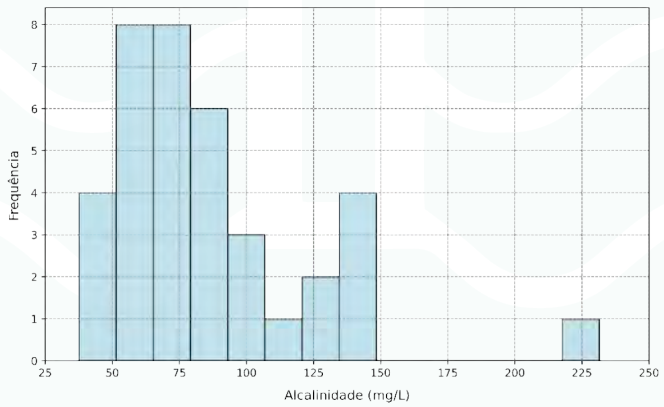
A concentração de Alcalinidade variou entre 37,58 e 231,54 mg L-1, com mediana de 72,01 mg L-1. A concentração de bicarbonato variou entre 13,45 e 145,36 mg L-1, com mediana de 71,66 mg L-1. A concentração de carbonato variou entre zero e 145,64 mg L-1, com mediana de 0,04 mg L-1.

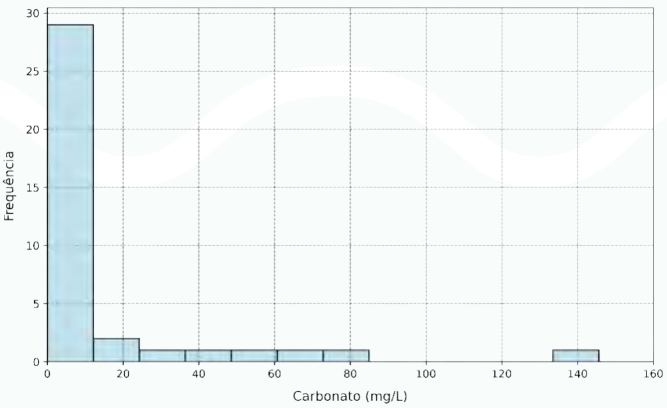
Alcalinidade (mg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	86,34	38,34	37,58	61,24	72,01	104,95	231,54

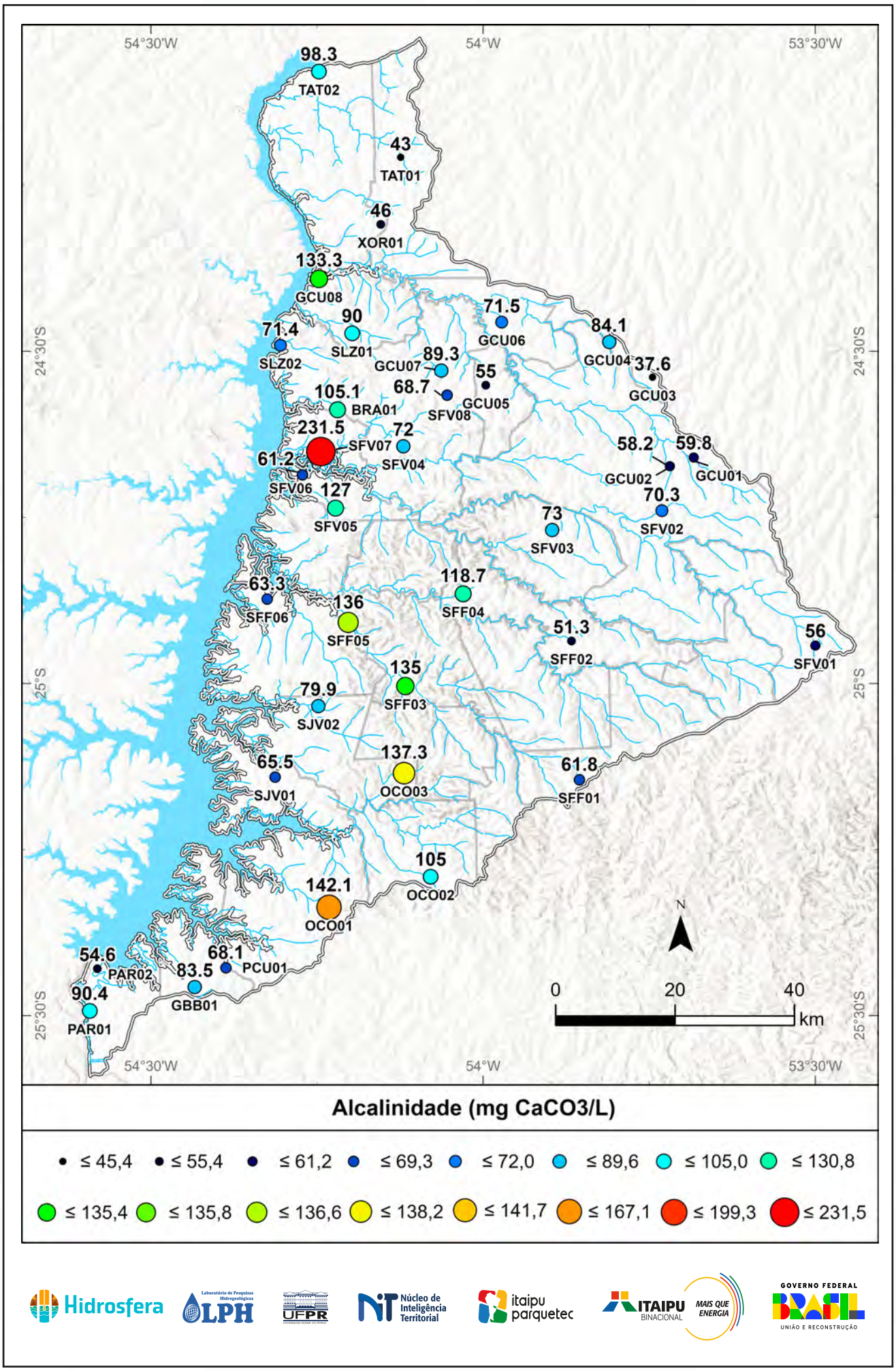
Bicarbonato (mg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	75,32	27,34	13,45	62,00	71,66	86,12	145,36

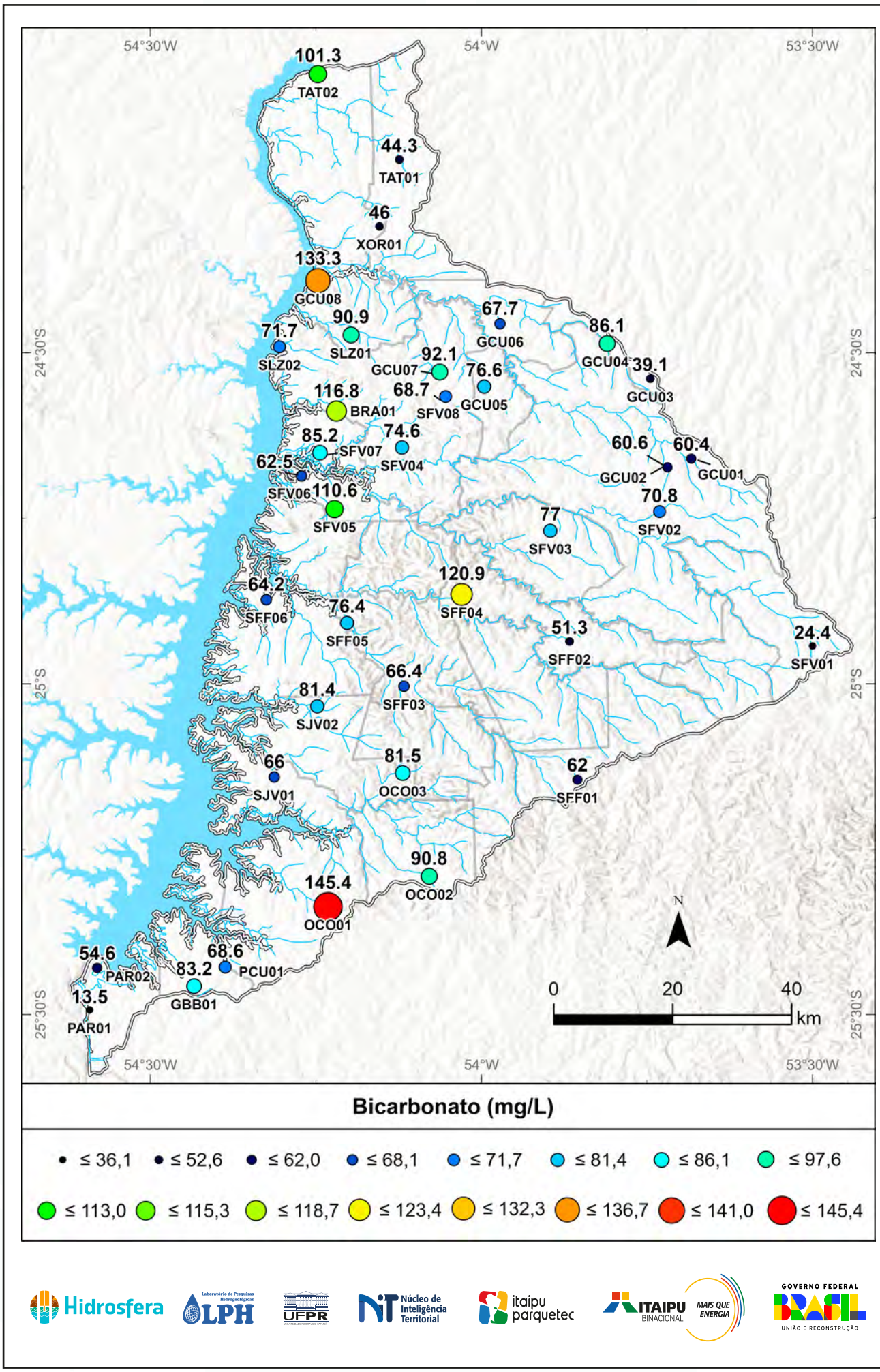
Carbonato (mg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	12,67	30,06	0,00	0,02	0,04	0,05	145,64

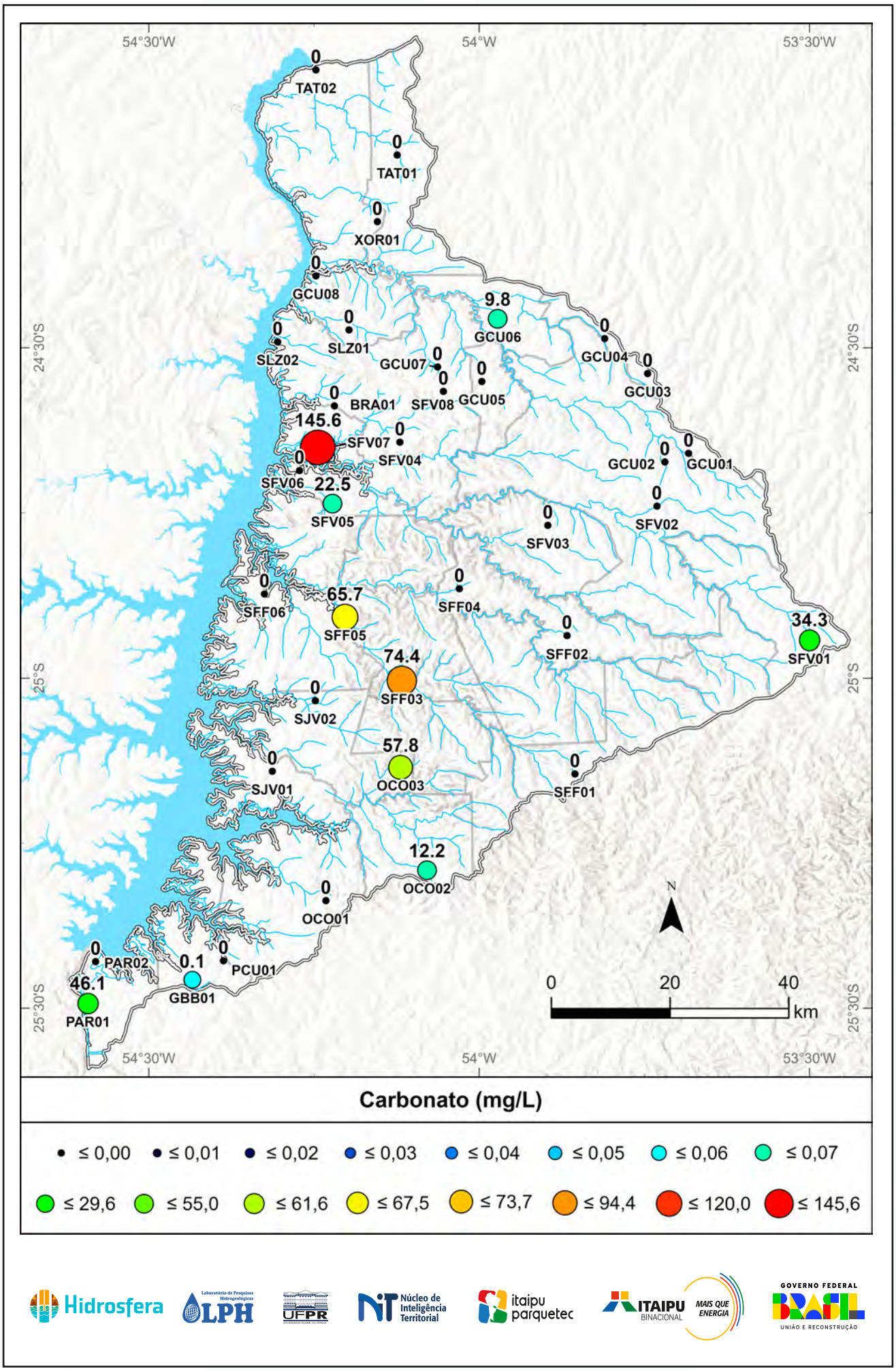







54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
98.3
TAT02
43
TAT01
46
XOR01
133.3
GCU08
71.4
SLZ02
90
SLZ01
71.5
GCU06
84.1
GCU04
89.3
GCU07
55
37.6
GCU03
105.1
BRA01
68.7
SFV08
GCU05
231.5
SFV07
72
SFV04
61.2
SFV06
127
SFV05
58.2
GCU02
59.8
GCU01
70.3
SFV02
73
SFV03
63.3
SFF06
118.7
SFF04
136
SFF05
51.3
SFF02
56
SFV01
135
SFF03
79.9
SJV02
137.3
OCO03
65.5
SJV01
61.8
SFF01
105
OCO02
142.1
OCO01
54.6
PAR02
68.1
PCU01
83.5
GBB01
90.4
PAR01
N
0
20
40
km
Alcalinidade (mg CaCO3/L)
≤ 45,4
≤ 55,4
≤ 61,2
≤ 69,3
≤ 72,0
≤ 89,6
≤ 105,0
≤ 130,8
≤ 135,4
≤ 135,8
≤ 136,6
≤ 138,2
≤ 141,7
≤ 167,1
≤ 199,3
≤ 231,5


54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
101.3
TAT02
44.3
TAT01
46
XOR01
133.3
GCU08
90.9
SLZ01
71.7
SLZ02
67.7
GCU06
86.1
GCU04
92.1
GCU07
76.6
GCU05
39.1
GCU03
116.8
BRA01
68.7
SFV08
85.2
SFV07
74.6
SFV04
62.5
SFV06
110.6
SFV05
60.6
GCU02
60.4
GCU01
70.8
SFV02
77
SFV03
120.9
SFF04
64.2
SFF06
76.4
SFF05
51.3
SFF02
24.4
SFV01
66.4
SFF03
81.4
SJV02
66
SJV01
81.5
OCO03
62
SFF01
90.8
OCO02
145.4
OCO01
54.6
PAR02
68.6
PCU01
83.2
GBB01
13.5
PAR01
N
0
20
40
km
Bicarbonato (mg/L)
≤ 36,1
≤ 52,6
≤ 62,0
≤ 68,1
≤ 71,7
≤ 81,4
≤ 86,1
≤ 97,6
≤ 113,0
≤ 115,3
≤ 118,7
≤ 123,4
≤ 132,3
≤ 136,7
≤ 141,0
≤ 145,4


54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
TAT02
TAT01
XOR01
GCU08
SLZ02
SLZ01
GCU07
GCU06
9.8
GCU04
GCU03
GCU05
SFV08
BRA01
145.6
SFV07
SFV04
SFV06
22.5
SFV05
GCU02
GCU01
SFV02
SFV03
SFF06
65.7
SFF05
SFF04
SFF02
34.3
SFV01
74.4
SFF03
SJV02
57.8
OCO03
SJV01
SFF01
12.2
OCO02
OCO01
PAR02
0.1
PCU01
46.1
GBB01
PAR01
N
0
20
40
km
Carbonato (mg/L)
≤ 0,00
≤ 0,01
≤ 0,02
≤ 0,03
≤ 0,04
≤ 0,05
≤ 0,06
≤ 0,07
≤ 29,6
≤ 55,0
≤ 61,6
≤ 67,5
≤ 73,7
≤ 94,4
≤ 120,0
≤ 145,6

2. Cálcio

O cálcio (Ca) é o quinto elemento e o terceiro metal mais abundante no planeta Terra, de maneira que representa cerca de 3% do peso da crosta terrestre e aproximadamente 1 kg do peso humano. Nas águas subterrâneas, sua abundância média varia entre 1 a 500 mg L^{-1} (CRQ SP, 2019; APHA, 2017).

Apesar de ser um metal brilhante, raramente é encontrado em sua forma metálica devido a sua instabilidade no ar. Na natureza é encontrado principalmente na forma de carbonatos e hidróxidos, ou ainda na forma iônica em soluções não fortemente alcalinas. (APHA, 2017; MINEROPAR, 2001).

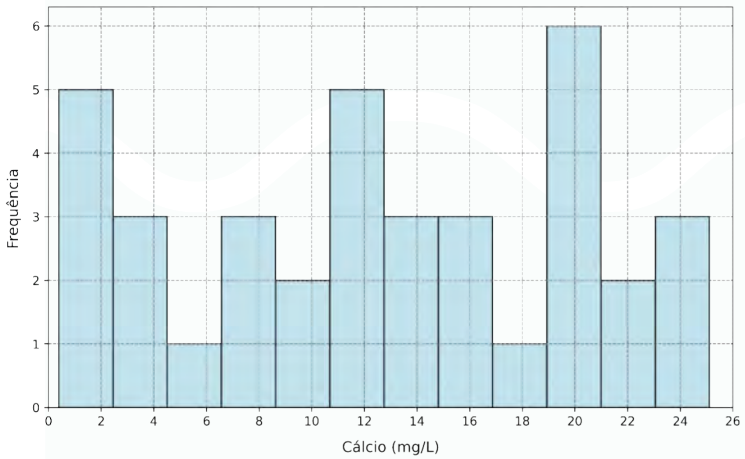
O Ca é largamente utilizado na construção civil (cal, cimento, gesso), na agricultura (correção de solo e fertilizantes) e no tratamento de águas. Porém, também é usado em diferentes etapas nos processos de fabricação do aço e do papel (CRQ SP, 2019; APHA,2017).

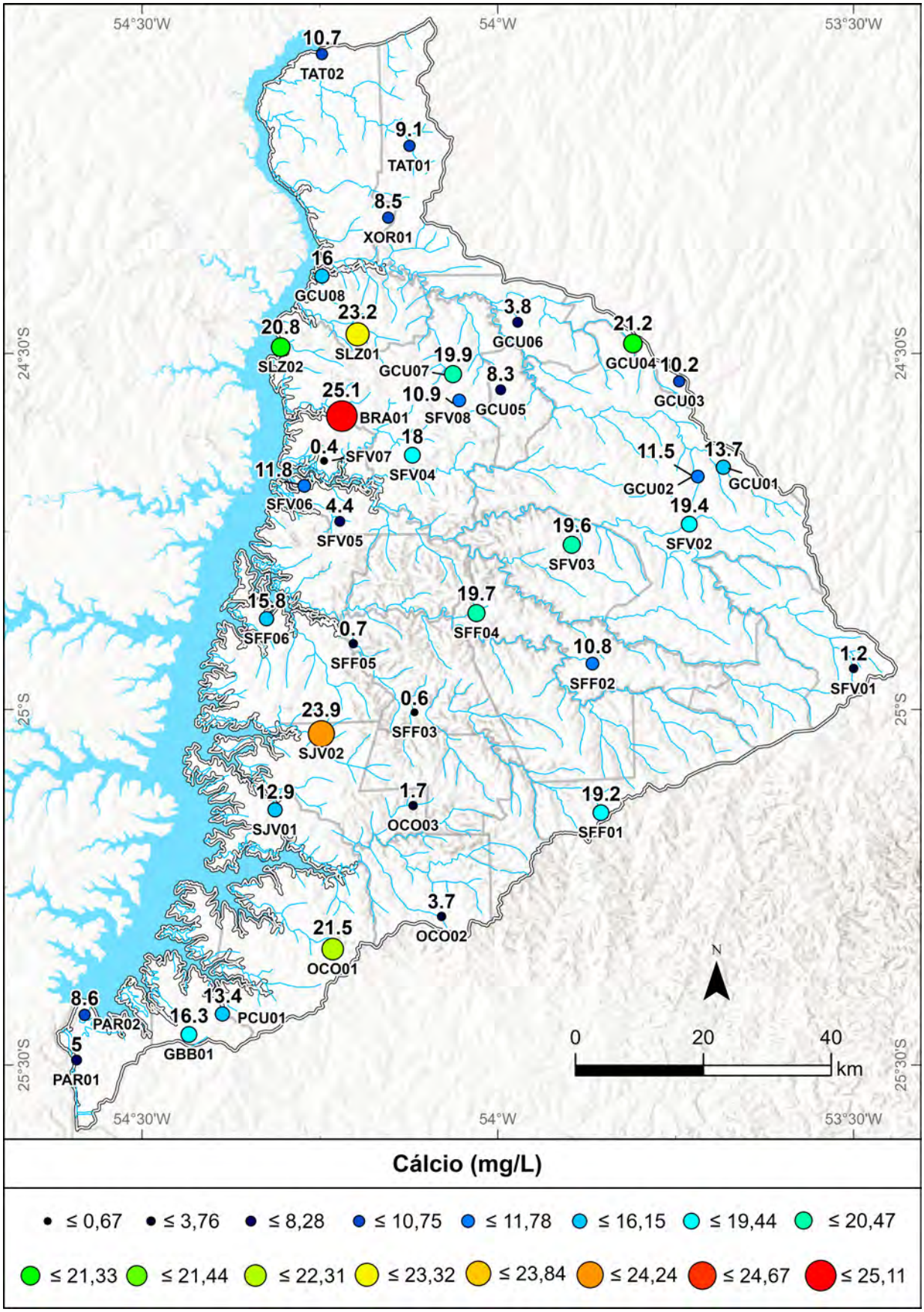
A concentração desse elemento nas águas é controlada pelo pH e pelo teor de CO_2 dissolvido, bem como da presença de Ca ao seu entorno, como nas rochas (calcário, dolomita, mármore, etc.) ou por adição antrópica.

Visto que é considerado essencial aos seres vivos, o inconveniente associado à sua presença em águas diz respeito a formação de incrustações formadas por carbonatos de cálcio ($CaCO_3$) nas tubulações e torneiras (APHA, 2017).

A concentração de cálcio nas águas da BP3 variou entre 0,39 e 25,11 mg L^{-1}, com mediana de 11,78 mg L^{-1}.

Cálcio (mg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	12,48	7,40	0,39	8,28	11,78	19,44	25,11




54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
10.7
TAT02
9.1
TAT01
8.5
XOR01
16
GCU08
23.2
SLZ01
20.8
SLZ02
3.8
GCU06
21.2
GCU04
19.9
GCU07
8.3
GCU05
10.2
GCU03
25.1
BRA01
10.9
SFV08
18
SFV04
0.4
SFV07
11.8
SFV06
4.4
SFV05
11.5
GCU02
13.7
GCU01
19.4
SFV02
19.6
SFV03
19.7
SFF04
15.8
SFF06
0.7
SFF05
10.8
SFF02
1.2
SFV01
0.6
SFF03
23.9
SJV02
12.9
SJV01
1.7
OCO03
19.2
SFF01
3.7
OCO02
21.5
OCO01
8.6
PAR02
13.4
PCU01
16.3
GBB01
5
PAR01
N
0
20
40
km
Cálcio (mg/L)
≤ 0,67
≤ 3,76
≤ 8,28
≤ 10,75
≤ 11,78
≤ 16,15
≤ 19,44
≤ 20,47
≤ 21,33
≤ 21,44
≤ 22,31
≤ 23,32
≤ 23,84
≤ 24,24
≤ 24,67
≤ 25,11

3. Cloreto

O Cloreto (Cl^-) é o ânion inorgânico com maior presença em águas naturais e residuais. Proveniente do cloro (Cl), o ânion é formado a partir da hidrólise do próprio Cl molecular ou do hipoclorito (ClO^-) em soluções aquosas e sua proporção no meio depende do pH e temperatura principalmente (APHA,2017).

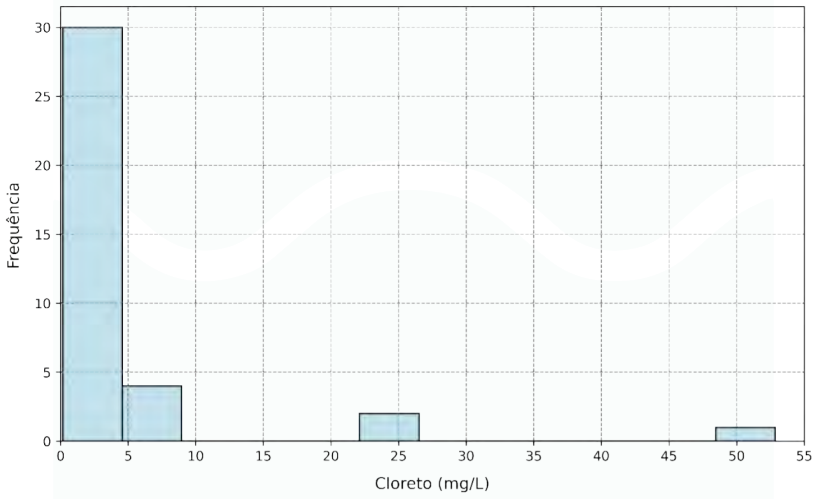
Em teores acima de 250 mg L^{-1} Cl^-, pode conferir um sabor salgado as águas quando associado ao cátion Na^+. Entretanto, se o ânion estiver em equilibro com os cátions Ca^{2+} ou Mg^{2+}, o sabor salino somente será detectado em concentrações de cloreto maiores que 1000 mg L^{-1} (Vogel, 1992).

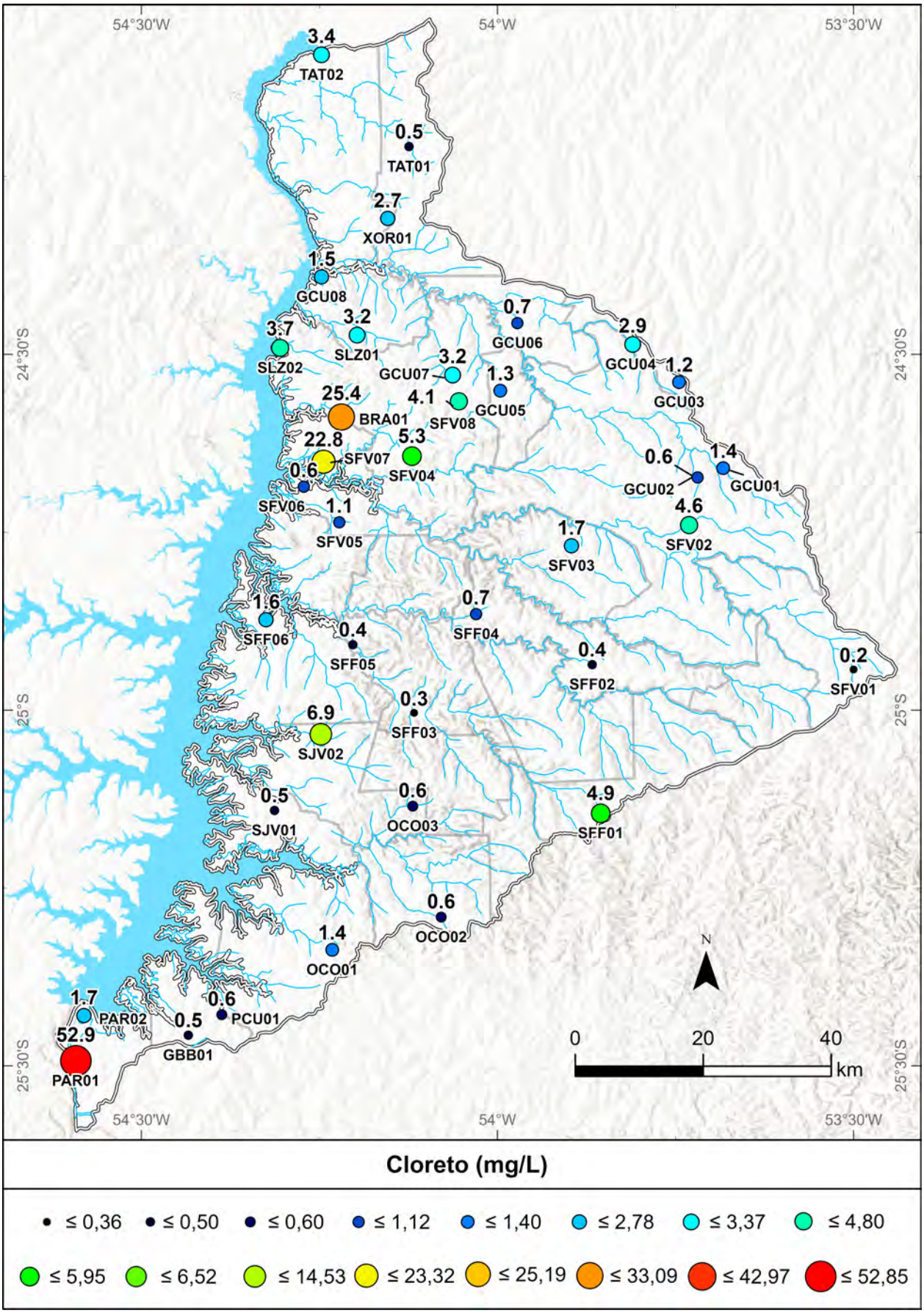
O íon cloreto por si só não é prejudicial à saúde humana, de modo que a resolução nº 396/2008 do CONAMA dispõe de teores de até 250 mg L^{-1} em águas para o consumo humano. Entretanto, concentrações elevadas desse íon são prejudiciais as plantas e tornam a água corrosiva, gerando danos as estruturas metálicas como as tubulações (Rosa Filho et. al., 2011; APHA, 2017).

Por ser muito solúvel os íons cloretos chegam as águas naturais por diferentes modos, dentre os quais pode-se destacar a dissolução de sais de cloreto contidos na superfície do solo, descargas residuais domésticas, bem como pela inserção na etapa de tratamento de água. Em efeito, nas águas subterrâneas os teores de cloretos tendem a ser inferiores a 100 mg L^{-1} (Venancio, 2011; Fernandes, 2005).

A concentração de cloreto nas águas da BP3 variou entre 0,17 e 52,85 mg L^{-1}, com mediana de 1,40 mg L^{-1}.

Cloreto (mg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	4,49	9,77	0,17	0,60	1,40	3,37	52,85




54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
3.4
TAT02
0.5
TAT01
2.7
XOR01
1.5
GCU08
3.2
SLZ01
3.7
SLZ02
0.7
GCU06
2.9
GCU04
1.2
GCU03
3.2
GCU07
1.3
GCU05
25.4
BRA01
4.1
SFV08
22.8
SFV07
5.3
SFV04
0.6
SFV06
1.1
SFV05
0.6
GCU02
1.4
GCU01
4.6
SFV02
1.7
SFV03
1.6
SFF06
0.4
SFF05
0.7
SFF04
0.4
SFF02
0.2
SFV01
6.9
SJV02
0.3
SFF03
0.5
SJV01
0.6
OCO03
4.9
SFF01
0.6
OCO02
1.4
OCO01
1.7
PAR02
0.6
PCU01
0.5
GBB01
52.9
PAR01
N
0
20
40
km
Cloreto (mg/L)
≤ 0,36
≤ 0,50
≤ 0,60
≤ 1,12
≤ 1,40
≤ 2,78
≤ 3,37
≤ 4,80
≤ 5,95
≤ 6,52
≤ 14,53
≤ 23,32
≤ 25,19
≤ 33,09
≤ 42,97
≤ 52,85

4. Condutividade elétrica

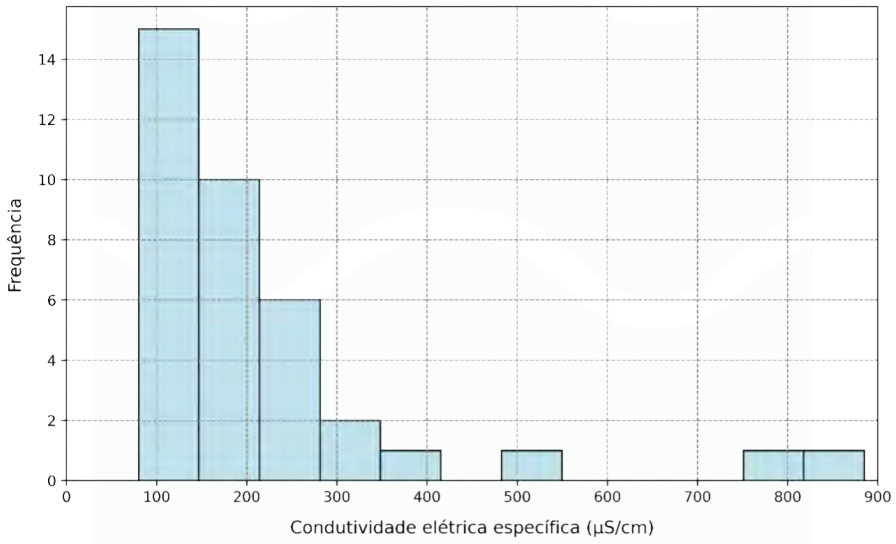
A condutividade elétrica (CE) é a medida da capacidade de uma solução aquosa em conduzir corrente elétrica. Esse parâmetro está relacionado a presença de íons, as concentrações totais, bem como a mobilidade e valência desses íons, além de ser influenciada pela temperatura (APHA, 2017).

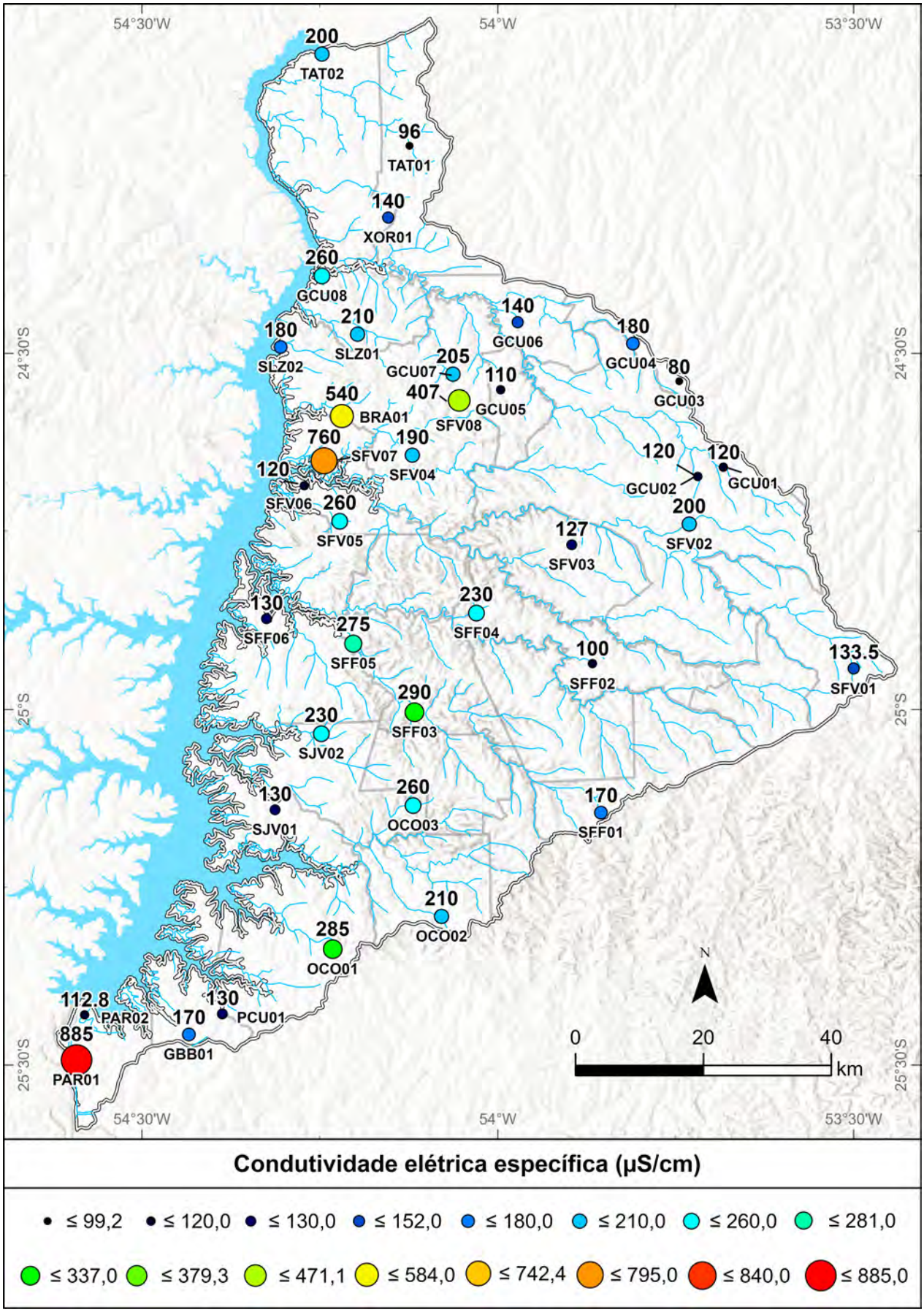
Os resultados obtidos a partir da análise desse parâmetro podem ser utilizados como ferramentas para diversos estudos hidrogeológicos, isso porque há uma relação de proporcionalidade entre o teor de sais dissolvidos (íons) e a condutividade elétrica. De fato, há uma correlação entre a CE e os sólidos totais dissolvidos (STD), podendo este ser calculado através da equação: CE (µS/cm) = A x STD (mg L^{-1}), onde A corresponde a uma constante que varia de 0,55 a 0,75 para uma ampla faixa de água naturais (Hem,1985, in Fitts 2002).

De acordo com Libânio (2010) as águas naturais apresentam condutividade elétrica inferior a 100 µS/cm. E embora não seja um parâmetro determinante para os padrões de potabilidade da água, a CE é um parâmetro simples e rápido para indicar uma eventual poluição nos corpos hídricos, uma vez que se relaciona ao teor de STD. Em efeito, a condutividade elétrica de corpos hídricos como as águas subterrâneas pode ser alterada pela interação com efluentes e águas salinas, entre outros fatores.

A condutividade elétrica específica nas águas da BP3 variou entre 80 e 885 µS cm^{-1}, com mediana de 180 µS cm^{-1}.

Condutividade elétrica específica (µS cm^{-1})							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	226.67	171.06	80.00	130.00	180.00	260.00	885.00




54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
200
TAT02
96
TAT01
140
XOR01
260
GCU08
210
SLZ01
180
SLZ02
140
GCU06
180
GCU04
205
GCU07
110
80
GCU03
540
BRA01
407
GCU05
SFV08
760
SFV07
190
SFV04
120
SFV06
120
GCU02
120
GCU01
260
SFV05
200
SFV02
127
SFV03
130
SFF06
230
SFF04
275
SFF05
100
SFF02
133.5
SFV01
290
SFF03
230
SJV02
130
SJV01
260
OCO03
170
SFF01
210
OCO02
285
OCO01
112.8
PAR02
130
PCU01
170
GBB01
885
PAR01
N
0
20
40
km
Condutividade elétrica específica (µS/cm)
≤ 99,2
≤ 120,0
≤ 130,0
≤ 152,0
≤ 180,0
≤ 210,0
≤ 260,0
≤ 281,0
≤ 337,0
≤ 379,3
≤ 471,1
≤ 584,0
≤ 742,4
≤ 795,0
≤ 840,0
≤ 885,0

5. Estrôncio

O estrôncio (Sr) é um metal prateado, maleável, dúctil e que reage rapidamente com o ar quando na forma metálica. Sua abundância relativa na crosta terrestre é de 384 partes por milhão, enquanto nas águas subterrâneas seu teor varia de 0,01 a 10 mg L^{-1} (APHA, 2017).

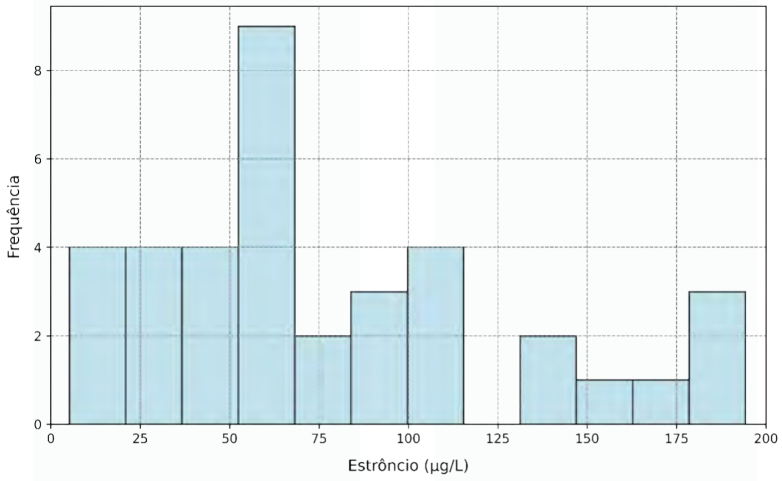
Esse elemento é encontrado principalmente em minerais ígneos celestita ($SrSO_4$) e estroncianita ($SrCO_3$) e é bastante utilizado em fogos de artifício devido a coloração avermelhada de seus compostos de carbonato ($SrCO_3$) e nitrato ($Sr(NO_3)_2$) quando queimam. Na época das televisões de tubo o óxido de estrôncio era comumente utilizado nos tubos de raios catódicos (CRQ SP, 2019; APHA, 2017)

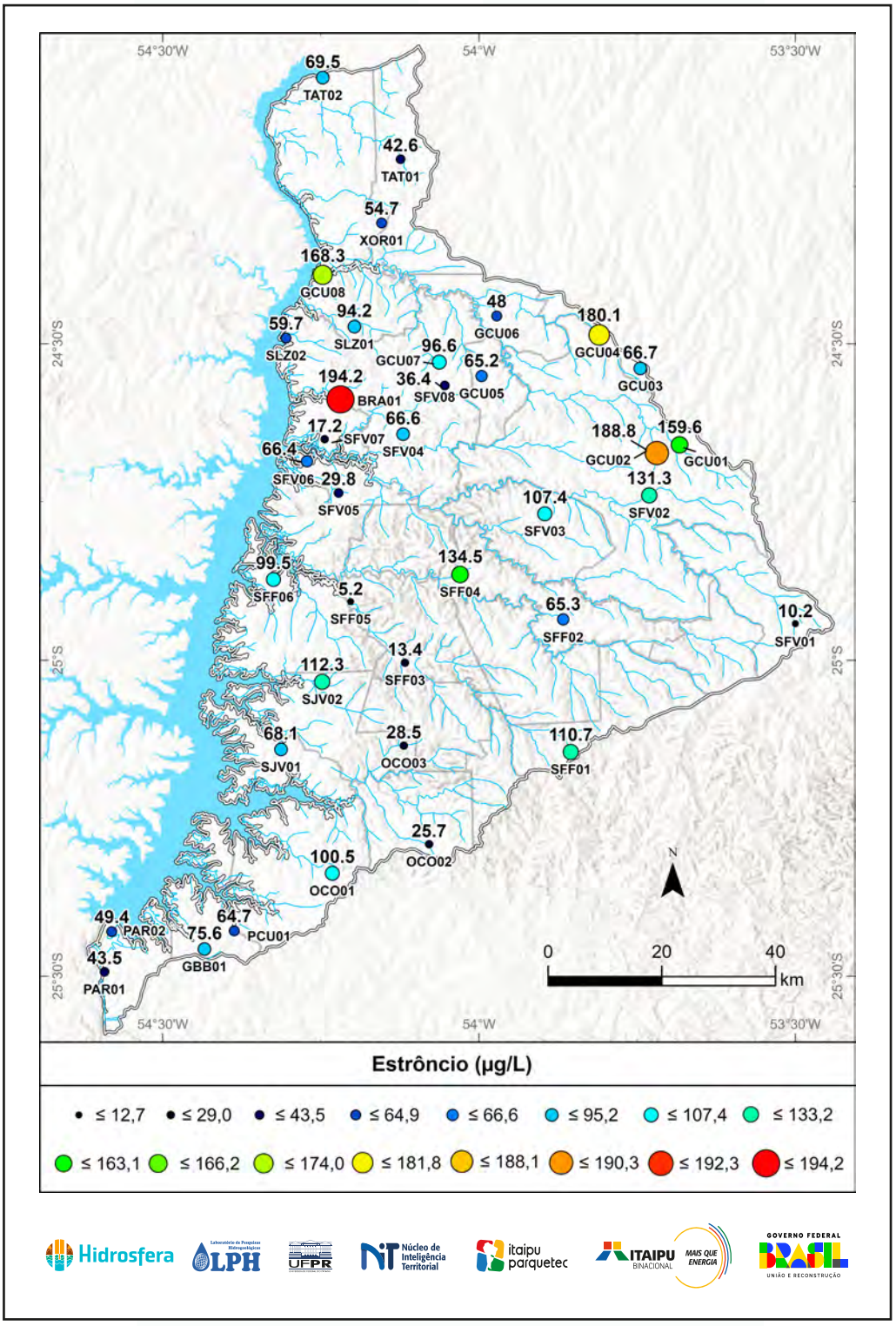
Uma curiosidade sobre esse elemento é que seus isótopos estáveis não apresentam riscos à saúde humana, enquanto os isótopos radioativos podem causar doenças como o câncer. Em efeito, dentre os isótopos radioativos o Sr-90 é o mais perigoso. Esse isótopo é um produto de reações nucleares e se espalhou na superfície terrestre devido aos testes com armas nucleares. (CRQ SP, 2019).

Em águas, a espécie predominante é o Sr^{2+}, o qual tem sua solubilidade controlada pela presença de carbonatos e sulfatos. Apesar da CONAMA 396/2008 não apresentar valores normativos para presença de Sr em águas usadas para consumo humano, é importante ressaltar que por ser quimicamente parecido com o Ca esse elemento pode ser absorvido pelo corpo humano causando desenvolvimento ósseo anormal entre outras doenças ósseas. De modo que a agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (EPA – do inglês Environmental Protection Agency) recomenda que os níveis de Sr estável nas águas potáveis não sejam superiores a 4,0 mg L^{-1}, o que corresponde a 4000 µg L^{-1} (ATSDR, 2025).

A concentração de estrôncio nas águas da BP3 variou entre 5,18 e 194,23 µg L^{-1}, com mediana de 66,62 µg L^{-1}.

Estrôncio (µg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	79,74	51,31	5,18	43,48	66,62	107,39	194,23


Frequência
Estrôncio (µg/L)
0
2
4
6
8
0
25
50
75
100
125
150
175
200


54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
69.5
TAT02
42.6
TAT01
54.7
XOR01
168.3
GCU08
59.7
SLZ02
94.2
SLZ01
48
GCU06
180.1
GCU04
66.7
GCU03
96.6
GCU07
65.2
GCU05
194.2
BRA01
36.4
SFV08
17.2
SFV07
66.6
SFV04
66.4
SFV06
29.8
SFV05
188.8
GCU02
159.6
GCU01
131.3
SFV02
107.4
SFV03
99.5
SFF06
5.2
SFF05
134.5
SFF04
65.3
SFF02
10.2
SFV01
112.3
SJV02
13.4
SFF03
68.1
SJV01
28.5
OCO03
110.7
SFF01
25.7
OCO02
100.5
OCO01
49.4
PAR02
64.7
PCU01
75.6
GBB01
43.5
PAR01
N
0
20
40
km
Estrôncio (µg/L)
≤ 12,7
≤ 29,0
≤ 43,5
≤ 64,9
≤ 66,6
≤ 95,2
≤ 107,4
≤ 133,2
≤ 163,1
≤ 166,2
≤ 174,0
≤ 181,8
≤ 188,1
≤ 190,3
≤ 192,3
≤ 194,2

6. Ferro

O Ferro (Fe) é o principal metal do núcleo da Terra e o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, variando entre 5,0 e 6,2%. Já nas águas subterrâneas seu teor varia de 0,1 a 10 mg L^{-1} (CRQ SP, 2019; APHA, 2017).

Os principais minérios de ferro são a hematita (Fe_2O_3) e a magnetita (Fe_3O_4), fato este que está relacionado a rápida oxidação do ferro metálico quando em contato com o ar. Quando em solução, o Fe^{2+} tem sua solubilidade controlada pela concentração de carbonatos, enquanto o Fe^{3+} tende a formar óxidos insolúveis como os minerais citados anteriormente (CRQ SP, 2019; APHA, 2017).

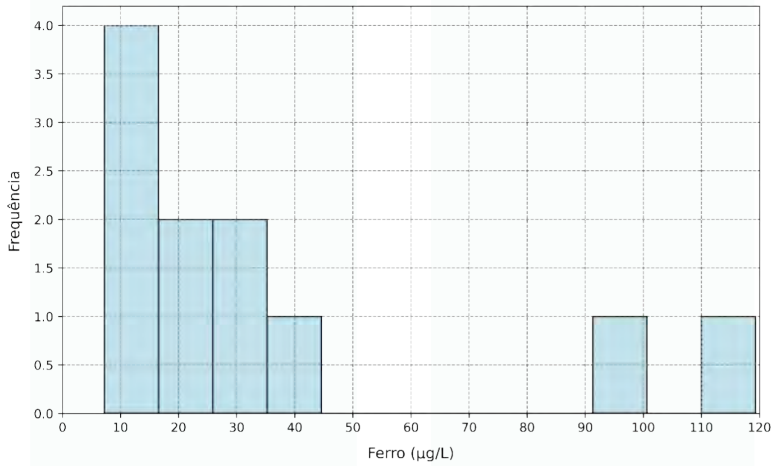
O Ferro é largamente utilizado em nosso dia a dia, estando presente nos automóveis, eletrodomésticos e na construção civil, uma vez que é um dos principais componentes do aço. Além, é claro, de ser um nutriente essencial a vida humana. O Fe é primordial para nossa respiração, visto que as moléculas que contém ferro, como a hemoglobina, são responsáveis pelo transporte do oxigênio no corpo humano. Em efeito, a ausência de ferro em condições adequadas no organismo humano é responsável pela anemia ferropriva, doença que afeta cerca de 1,5 milhões de pessoas (CRQ SP, 2019; Cozzolino, 2016).

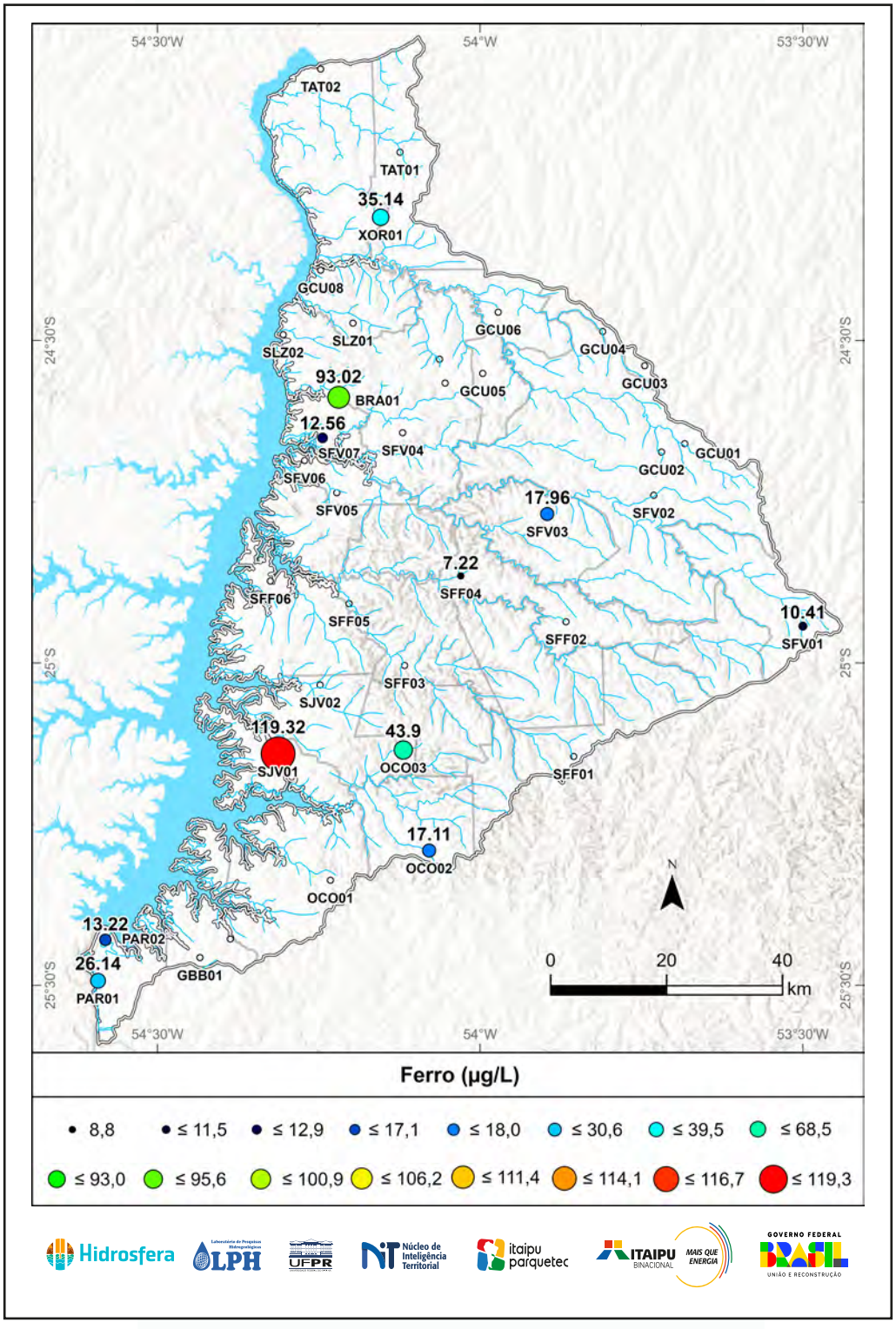
Em contrapartida, elevadas concentrações de ferro no organismo humano também podem ser prejudiciais à saúde, embora condições como a talassemia e a hemocromatose não sejam tão comuns como a anemia e possuam tratamento simples.

Assim sendo, como o Fe é consumido primordialmente de outras fontes como carnes e leguminosas, a sua presença em águas para o consumo humano é regulada pela resolução 396/2008 do CONAMA, sendo o limite máximo permitido para o este fim de 300 µg L^{-1}.

A concentração de ferro nas águas da BP3 variou entre 7,22 e 119,32 µg $^{L-1}$, com mediana de 17,96 µg L^{-1}.

Ferro (µg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
11	36,00	36,86	7,22	12,89	17,96	39,52	119,32


Frequência
Ferro (µg/L)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120


54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
TAT02
TAT01
35.14
XOR01
GCU08
GCU06
GCU04
GCU03
GCU05
GCU01
GCU02
SLZ01
SLZ02
93.02
BRA01
12.56
SFV07
SFV04
SFV06
SFV05
17.96
SFV03
SFV02
SFV01
10.41
7.22
SFF04
SFF06
SFF05
SFF02
SFF03
SJV02
119.32
SJV01
43.9
OCO03
SFF01
17.11
OCO02
OCO01
13.22
PAR02
26.14
PAR01
GBB01
N
0
20
40
km
Ferro (µg/L)
8,8
≤ 11,5
≤ 12,9
≤ 17,1
≤ 18,0
≤ 30,6
≤ 39,5
≤ 68,5
≤ 93,0
≤ 95,6
≤ 100,9
≤ 106,2
≤ 111,4
≤ 114,1
≤ 116,7
≤ 119,3
Hidrosfera
LPH
UFPR
Núcleo de Inteligência Territorial
itaipu parquetec
ITAIPU BINACIONAL
MAIS QUE ENERGIA
GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

7. Fluoreto

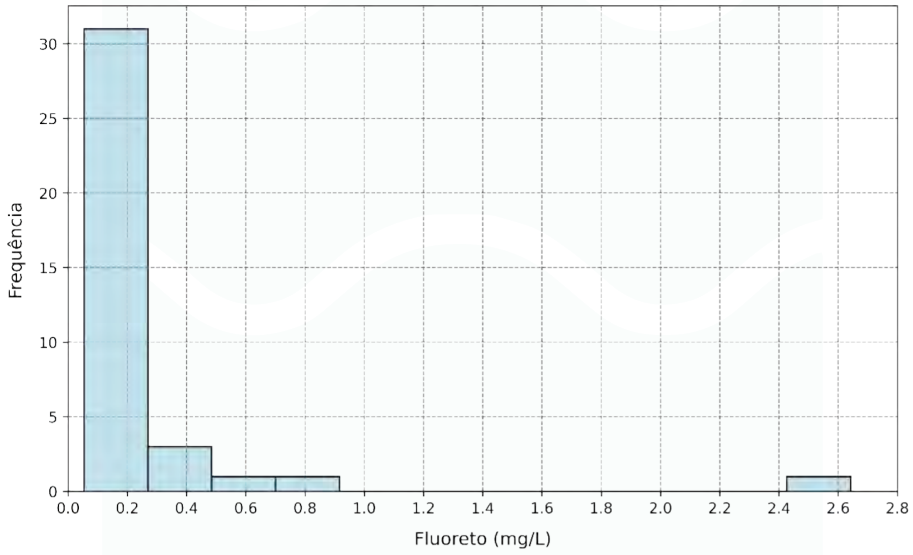
O Flúor (F) é o 13º elemento mais abundante no solo, entretanto é também o elemento mais reativo da tabela periódica de modo que não é encontrado na natureza em sua forma pura. A sua forma iônica F^-, conhecida como fluoreto, é encontrada na natureza em minerais e rochas como fluorita (CaF_2), criolita (Na_3AlF_6), entre outras. Sua abundância na crosta terrestre varia entre 20 e 500 partes por milhão. Em águas subterrâneas, em raros casos, o teor desse elemento de forma natural pode chegar a 10 mg L^{-1} (CETESB, 2022; APHA, 2017)

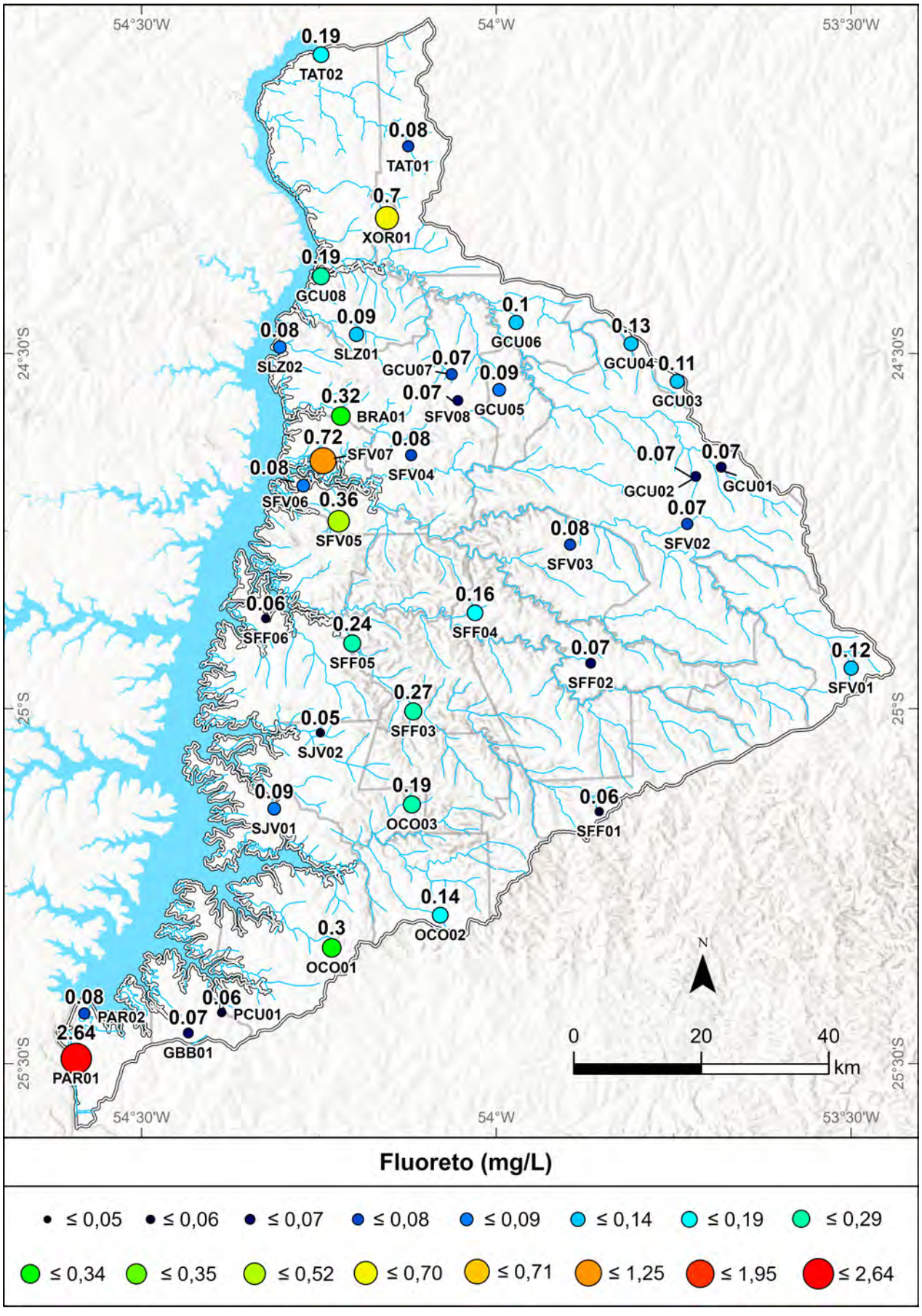
Os compostos inorgânicos de flúor são utilizados em diferentes áreas da sociedade, tais como nas indústrias farmacêuticas, de plásticos, de lâmpadas fluorescentes, na esmaltação de louças, entre outros. No Brasil, uma das principais aplicações é a fluoretação das águas para consumo humano visando a redução de cárie dental da população. Dessa forma, a determinação de F^- se tornou importante para que se mantenha uma concentração adequada para sua eficácia além de monitorar teores elevados de flúor que podem levar a distúrbios gástricos e redução temporária da capacidade de urinar (CESTESB, 2022; FUNASA; 2012).

Desse modo a resolução 396/2008 do CONAMA regulamenta um valor máximo de 1,5 mg L^{-1} do íon fluoreto em águas para o consumo humano.

A concentração de cloreto nas águas da BP3 variou entre 0,05 e 2,64 mg L^{-1}, com mediana de 0,09 mg L^{-1}.

Fluoreto (mg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	0,23	0,44	0,05	0,07	0,09	0,19	2,64




54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
0.19
TAT02
0.08
TAT01
0.7
XOR01
0.19
GCU08
0.09
SLZ01
0.08
SLZ02
0.1
GCU06
0.13
GCU04
0.11
GCU03
0.07
GCU07
0.09
GCU05
0.07
SFV08
0.32
BRA01
0.72
SFV07
0.08
SFV04
0.08
SFV06
0.36
SFV05
0.07
GCU02
0.07
GCU01
0.07
SFV02
0.08
SFV03
0.06
SFF06
0.24
SFF05
0.16
SFF04
0.07
SFF02
0.12
SFV01
0.27
SFF03
0.05
SJV02
0.09
SJV01
0.19
OCO03
0.06
SFF01
0.14
OCO02
0.3
OCO01
0.08
PAR02
0.06
PCU01
0.07
GBB01
2.64
PAR01
N
0
20
40
km
Fluoreto (mg/L)
≤ 0,05
≤ 0,06
≤ 0,07
≤ 0,08
≤ 0,09
≤ 0,14
≤ 0,19
≤ 0,29
≤ 0,34
≤ 0,35
≤ 0,52
≤ 0,70
≤ 0,71
≤ 1,25
≤ 1,95
≤ 2,64

8. Fosfato

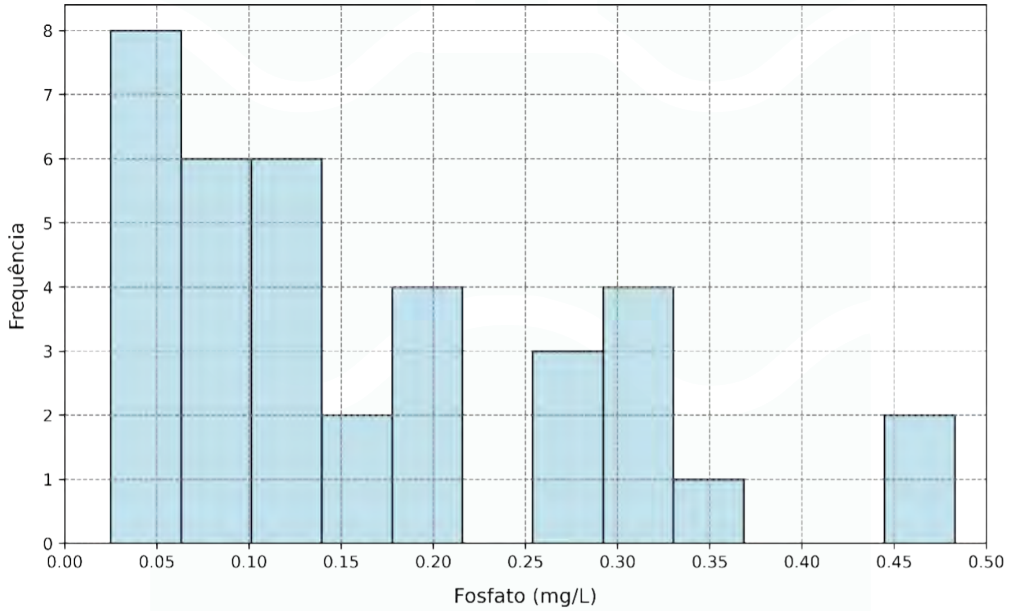
O íon fosfato (PO_4^{3-}) é proveniente do elemento fósforo (P) e ocupa o 11º lugar em abundância na crosta terrestre, sendo encontrado em rochas ígneas e sedimentares nomeadas de rochas fosfáticas (CRQ SP, 2019).

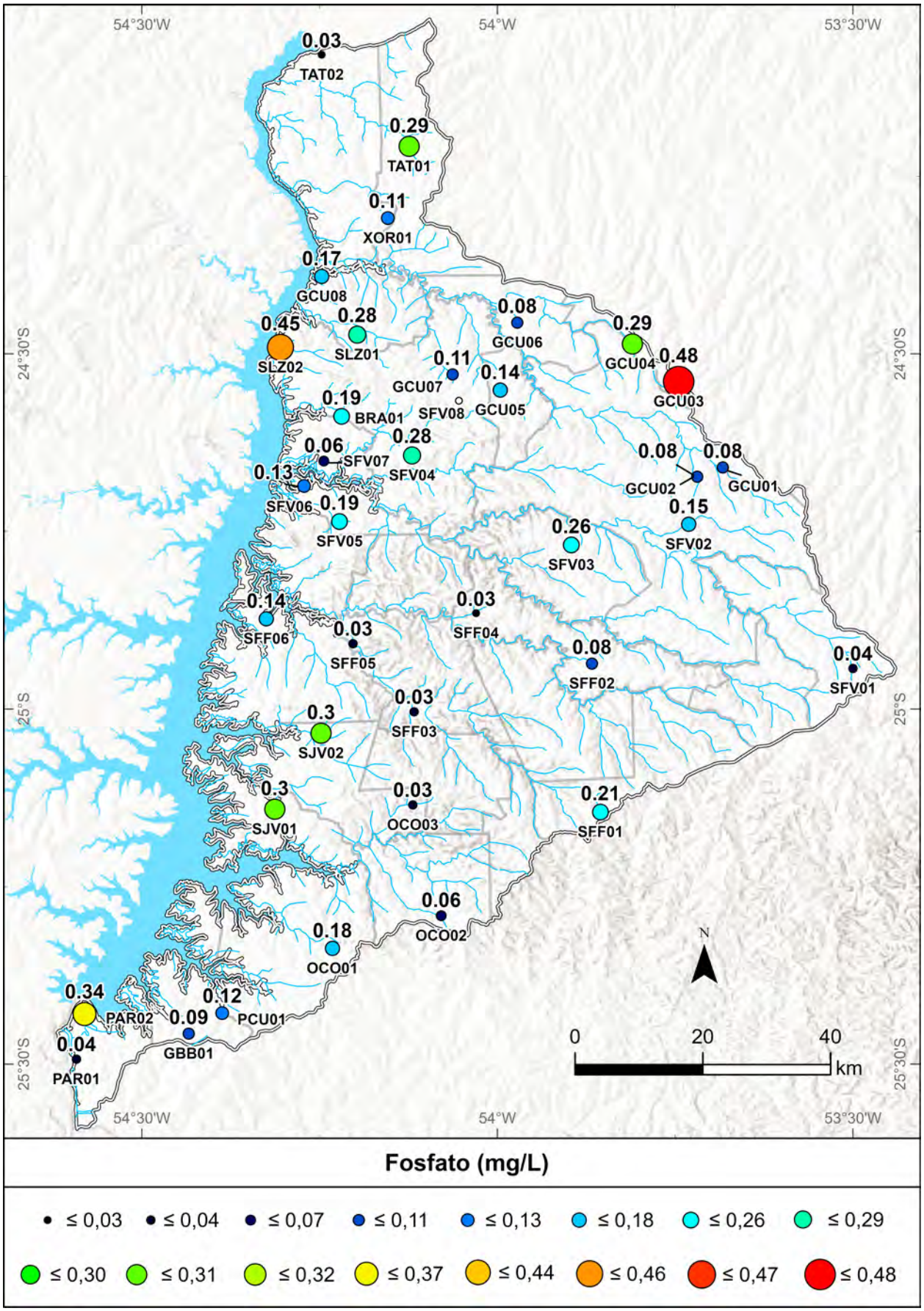
É amplamente utilizado em fertilizantes, uma vez que é um nutriente essencial para as plantas, e em produtos de limpeza como detergentes. Além do mais, são encontrados em uma variedade de produtos alimentícios como refrigerantes, queijos e até mesmo em carnes processadas. Visto que é presente de modo natural predominantemente na crosta terrestre e apresenta compostos pouco solúveis, o fosfato encontrado em águas é proveniente majoritariamente de ações antropogênicas (CRQ SP, 2019; APHA, 2017; Gonçalvez, 2025)

Quando em elevadas concentrações nos corpos hídricos os compostos de fosfatos podem contribuir para a eutrofização desses compartimentos, causando a morte de peixes e demais organismos aquáticos (APHA, 2017).

A concentração de fosfato nas águas da BP3 variou entre 0,03 e 0,48 mg L^{-1}, com mediana de 0,13 mg L^{-1}.

Fosfato (mg L^{-1})							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
36	0,16	0,12	0,03	0,07	0,13	0,26	0,48





Hidrosfera · LPH Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas · UFPR · NIT Núcleo de Inteligência Territorial · itaipu parquetec · ITAIPU BINACIONAL MAIS QUE ENERGIA · GOVERNO FEDERAL BRASIL UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

9. Lítio

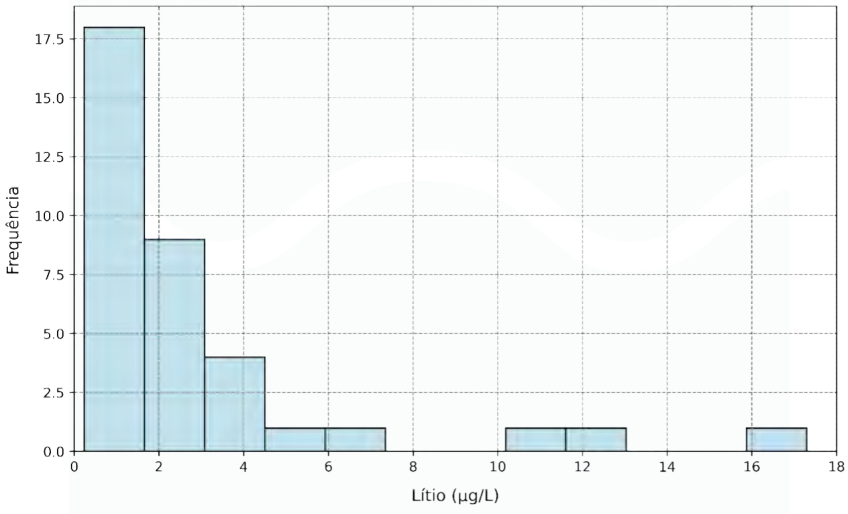
O Lítio (Li) é metal pertencente ao grupo 1 da tabela periódica, juntamente com hidrogênio, sódio, potássio e outros elementos. Sua abundância na crosta terrestre é cerca de 18 partes por milhão, enquanto que nas águas subterrâneas seu teor aproxima-se de 0,1 mg L^{-1} (APHA, 2017).

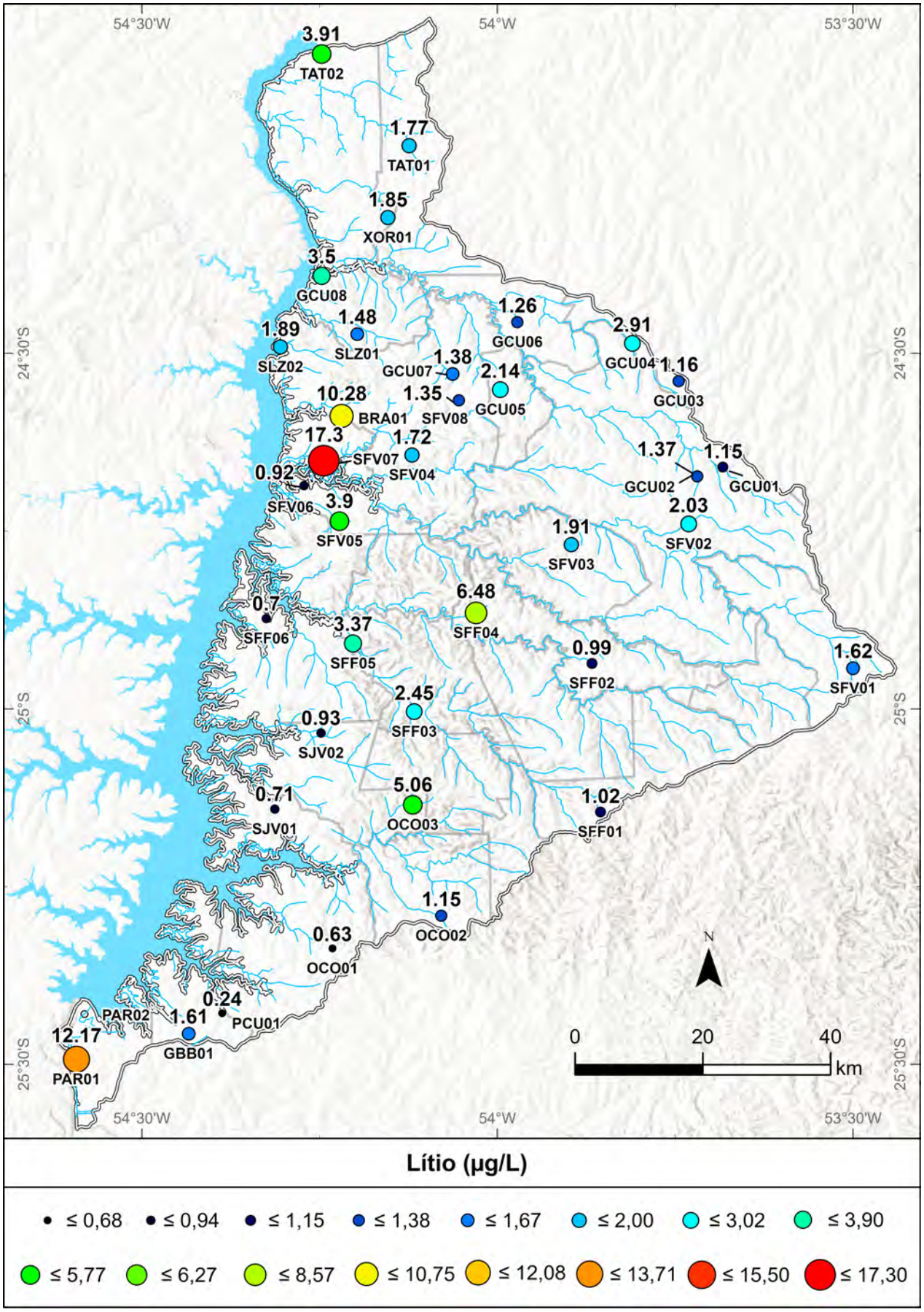
As principais fontes de Li são os minerais lepidolita ($KLi_2Al(Al,Si)_3O_{10}(F,OH)_2$) e espodumênio ($LiAl(SiO_3)_2$),sendo esse elemento amplamente utilizado na indústria farmacêutica, bem como em sabões, baterias, cerâmica, cosméticos, entre outros. Como medicamento, o lítio tem sido usado a décadas, entretanto, somente em 1949 esse elemento foi introduzido na psiquiatria, se tornando o remédio mais importante na psiquiatria moderna. Em efeito, desde 1975, medicamentos à base de Li são comumente utilizados na prevenção e tratamento de doenças maníaco-depressivas (CRQ SP, 2019; APHA, 2017). Apesar de sua utilização na medicina, altas concentrações desse elemento podem levar a problemas de saúde humana, tais como: alergia de pele, arritmia cardíaca, hipotireoidismo (CRQ SP, 2019).

Como os sais de lítio são pouco solúveis em água, tende-se a ter baixas concentrações nesses ambientes, de modo que não há limites máximos permitidos para sua presença em águas utilizadas para consumo humano. O teor de Li nas águas é controlado pela presença de minerais argilosos e hidróxidos de ferro e manganês (APHA, 2017; MINEROPAR, 2001).

A concentração de lítio nas águas da BP3 variou entre 0,24 e 17,30 µg L^{-1}, com mediana de 1,67 µg L^{-1}.

Lítio (µg L^{-1})							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
36	2,90	3,53	0,24	1,15	1,67	3,02	17,30




54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
3.91
TAT02
1.77
TAT01
1.85
XOR01
3.5
GCU08
1.89
SLZ02
1.48
SLZ01
1.26
GCU06
2.91
GCU04
1.16
GCU03
1.38
GCU07
2.14
GCU05
10.28
BRA01
1.35
SFV08
17.3
SFV07
1.72
SFV04
0.92
SFV06
3.9
SFV05
1.37
GCU02
1.15
GCU01
2.03
SFV02
1.91
SFV03
6.48
SFF04
0.7
SFF06
3.37
SFF05
0.99
SFF02
1.62
SFV01
2.45
SFF03
0.93
SJV02
0.71
SJV01
5.06
OCO03
1.02
SFF01
1.15
OCO02
0.63
OCO01
0.24
PCU01
PAR02
1.61
GBB01
12.17
PAR01
N
0
20
40
km
Lítio (µg/L)
≤ 0,68
≤ 0,94
≤ 1,15
≤ 1,38
≤ 1,67
≤ 2,00
≤ 3,02
≤ 3,90
≤ 5,77
≤ 6,27
≤ 8,57
≤ 10,75
≤ 12,08
≤ 13,71
≤ 15,50
≤ 17,30

10. Magnésio

O Magnésio (Mg) é o oitavo elemento mais abundante na crosta terrestre, apresentando uma abundância média de 2,1%. Nas águas subterrâneas o seu teor varia em torno de 5 mg L^{-1} (CRQ SP, 2019; APHA, 2017).

Nas rochas, o Mg é encontrado principalmente na forma de carbonatos e sulfatos insolúveis e seus minerais principais são a magnesita ($MgCO_3$) e a dolomita ($CaMg(CO_3)_2$). Além do mais, esse elemento está presente em concentrações significantes em lagos salgados e na água do mar (CRQ SP, 2019).

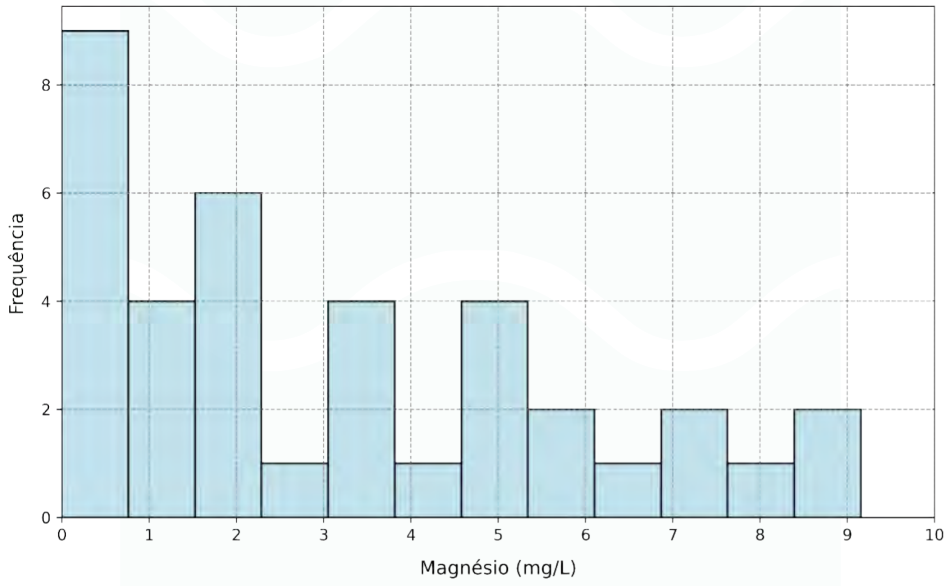
É largamente utilizado em ligas de alumínio, visto que melhora a mecânica e o processo de fabricação dessas ligas, bem como na indústria farmacêutica, de fertilizantes, alimentos, entre outras (APHA, 2017). O óxido de magnésio (MgO) é utilizado frequentemente como antiácido e também como revestimento refratário.

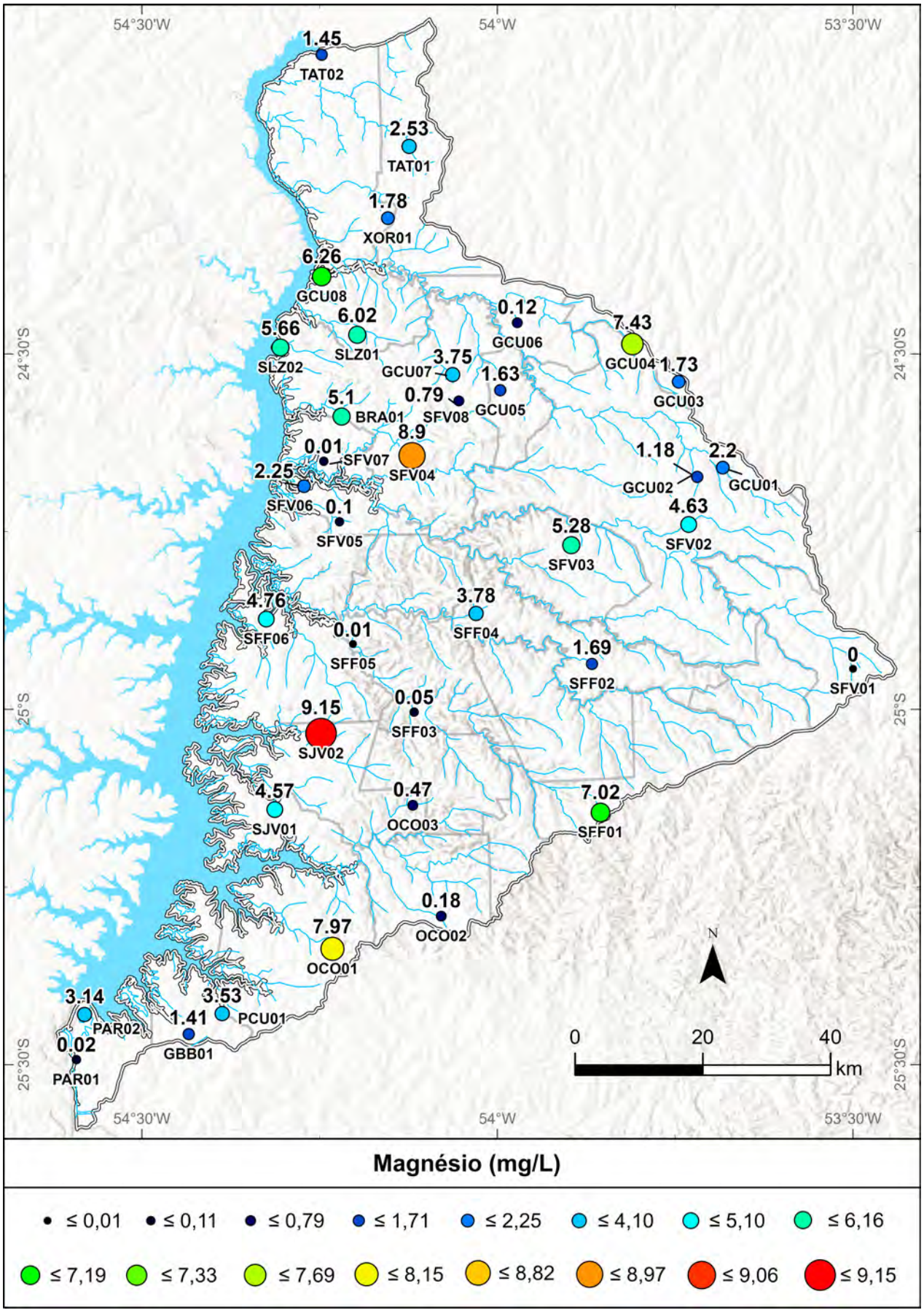
Já o carbonato de magnésio é muito utilizado por atletas para eliminar o suor das mãos, como no caso dos ginastas e escaladores (CRQ SP, 2019).

A espécie aquosa desse elemento é o íon Mg^{2+} e assim com o Ca^{2+} esse ânion contribui para a dureza da água, propriedade essa responsável pelas incrustações em tubulações.

A concentração de magnésio nas águas da BP3 variou entre 0,01 e 9,15 mg L^{-1}, com mediana de 2,25 mg L^{-1}.

Magnésio (mg L^{-1})							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	3,15	2,76	0,01	0,79	2,25	5,10	9,15




54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
1.45
TAT02
2.53
TAT01
1.78
XOR01
6.26
GCU08
6.02
SLZ01
5.66
SLZ02
0.12
GCU06
7.43
GCU04
3.75
GCU07
1.63
GCU05
1.73
GCU03
5.1
BRA01
0.79
SFV08
8.9
SFV04
0.01
SFV07
2.25
SFV06
0.1
SFV05
1.18
GCU02
2.2
GCU01
4.63
SFV02
5.28
SFV03
4.76
SFF06
3.78
SFF04
0.01
SFF05
1.69
SFF02
0
SFV01
9.15
SJV02
0.05
SFF03
4.57
SJV01
0.47
OCO03
7.02
SFF01
0.18
OCO02
7.97
OCO01
3.14
PAR02
3.53
PCU01
1.41
GBB01
0.02
PAR01
N
0
20
40
km
Magnésio (mg/L)
≤ 0,01
≤ 0,11
≤ 0,79
≤ 1,71
≤ 2,25
≤ 4,10
≤ 5,10
≤ 6,16
≤ 7,19
≤ 7,33
≤ 7,69
≤ 8,15
≤ 8,82
≤ 8,97
≤ 9,06
≤ 9,15

11. Nitrato

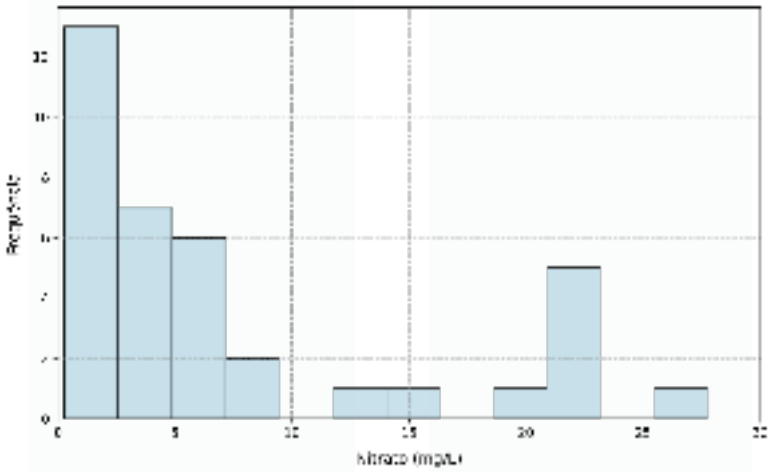
O nitrato (NO_{3-}) faz parte do ciclo do nitrogênio (N), sendo um dos principais indicadores de contaminação das águas subterrâneas. Apesar de ocorrer naturalmente nos corpos hídricos devido sua presença em rochas ígneas e de sua formação a partir da decomposição de animais e vegetais, o nitrato é utilizado como indicador de contaminação antropogênica uma vez que naturalmente apresenta baixos teores (< 0,7 mg L^{-1}) (APHA, 2017; CERH, 2021)

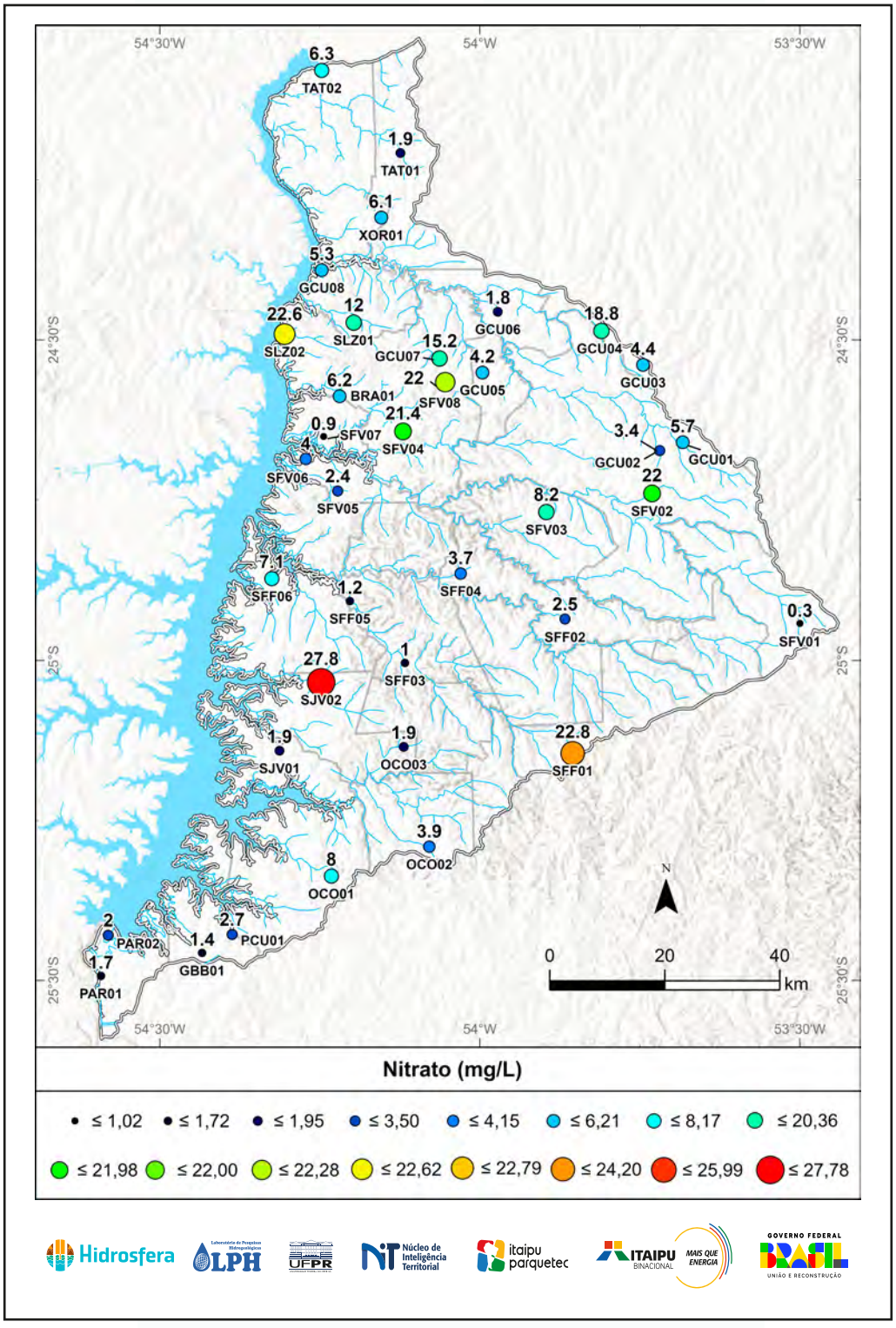
Nas áreas rurais a contaminação por nitrato está associada majoritariamente ao uso excessivo de fertilizantes agrícolas nitrogenados, enquanto nas áreas urbanas a contaminação está associada à disposição incorreta de resíduos como lixões e aterros sanitários inadequadamente construídos e a falta ou baixa eficiência de sistemas de saneamento na remoção de nitrato (CERH, 2021; CETESB, 2022).

Em concentrações elevadas no corpo humano o nitrato pode causar metemoglobinemia, doença relacionada a diminuição do transporte de oxigênio, diminuição da pressão arterial, aumento do batimento cardíaco, entre outros, e até mesmo câncer, como o gástrico e do linfático (CETESB, 2022). Por isso a resolução 396/2008 do CONAMA apresenta valores orientadores máximos de 10 mg L^{-1} de $N\text{-}NO_{3-}$ (expresso em N de nitrato), o que corresponde a um valor de 45 mg L^{-1} de NO_{3-} de nitrato.

A concentração de nitrato nas águas da BP3 variou entre 0,29 e 27,78 mg L^{-1}, com mediana de 4,15 mg L^{-1}.

Nitrato (mg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	7,69	7,92	0,29	1,95	4,15	8,17	27,78


Nitrato (mg/L)


54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
6.3
TAT02
1.9
TAT01
6.1
XOR01
5.3
GCU08
22.6
SLZ02
12
SLZ01
1.8
GCU06
18.8
GCU04
15.2
GCU07
4.2
4.4
GCU03
6.2
BRA01
22
GCU05
SFV08
21.4
SFV04
0.9
SFV07
4
SFV06
2.4
SFV05
3.4
GCU02
5.7
GCU01
22
SFV02
8.2
SFV03
7.1
SFF06
1.2
SFF05
3.7
SFF04
2.5
SFF02
0.3
SFV01
27.8
SJV02
1
SFF03
1.9
SJV01
1.9
OCO03
22.8
SFF01
3.9
OCO02
8
OCO01
2
PAR02
2.7
PCU01
1.4
GBB01
1.7
PAR01
N
0
20
40
km
Nitrato (mg/L)
≤ 1,02
≤ 1,72
≤ 1,95
≤ 3,50
≤ 4,15
≤ 6,21
≤ 8,17
≤ 20,36
≤ 21,98
≤ 22,00
≤ 22,28
≤ 22,62
≤ 22,79
≤ 24,20
≤ 25,99
≤ 27,78

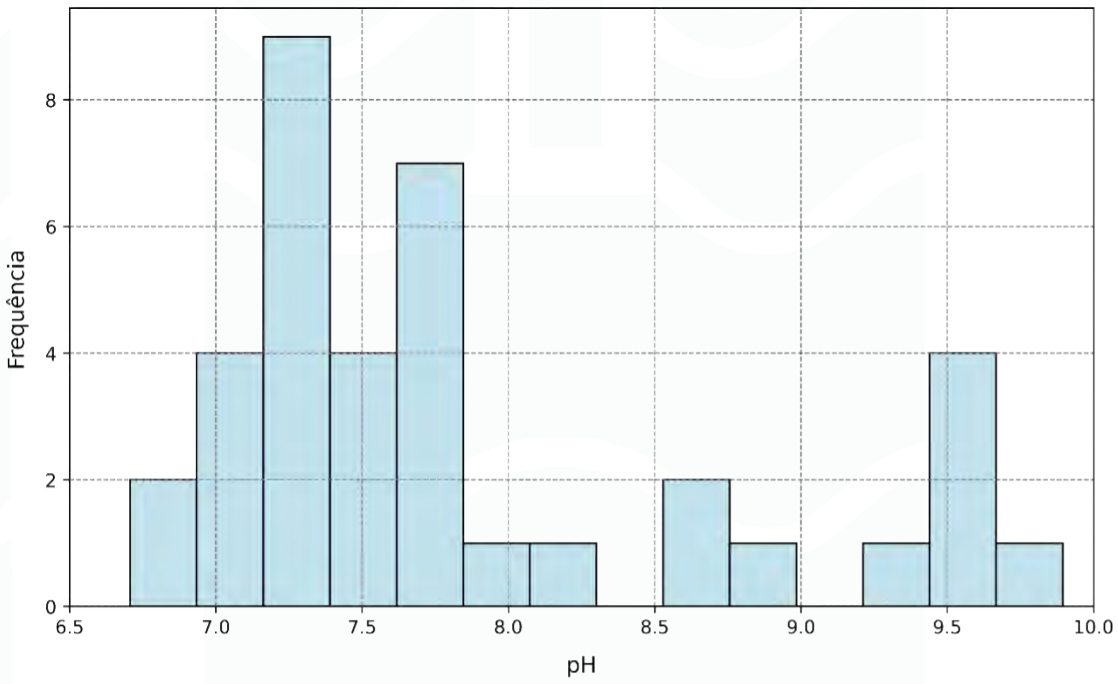
12. pH

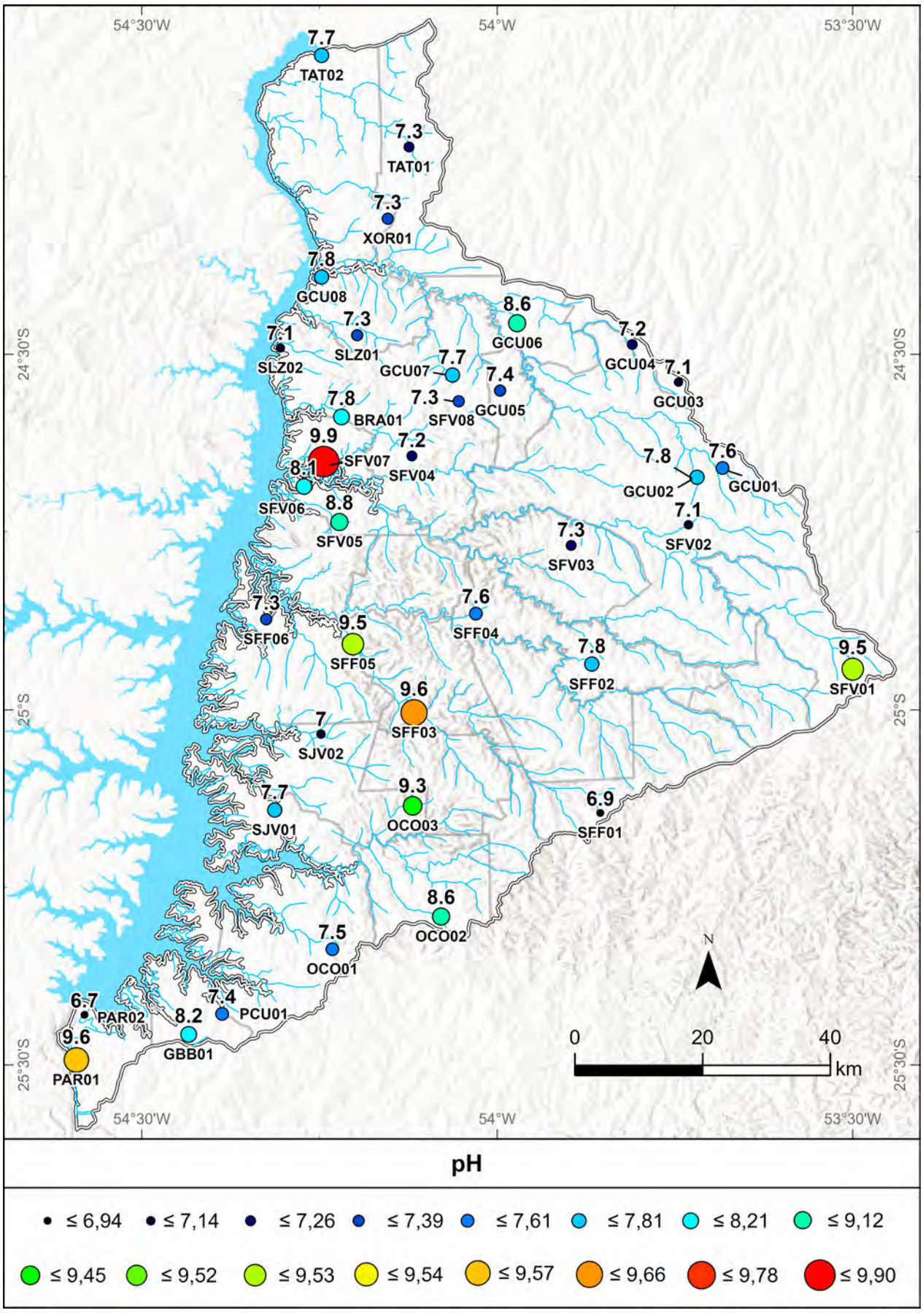
O pH é determinado pela concentração dos íons hidrogênio (H^+) em solução aquosa e é utilizado para determinar de forma simples a acidez, neutralidade e alcalinidade da água. É comumente utilizado para verificar as etapas do tratamento da água bem como seu uso (APHA, 2017).

O ministério da saúde, através da portaria 2914 de 12 de dezembro de 2011, recomenda que às águas presentes no sistema de distribuição sejam mantidas na faixa de 6,0 a 9,5.

O pH nas águas da BP3 variou entre 6,71 e 9,90, com mediana de 7,61.

pH							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	7,88	0,89	6,71	7,26	7,61	8,21	9,90




54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
TAT02 7.7
TAT01 7.3
XOR01 7.3
GCU08 7.8
SLZ02 7.1
SLZ01 7.3
GCU07 7.7
GCU06 8.6
GCU04 7.2
GCU03 7.1
GCU05 7.4
BRA01 7.8
SFV08 7.3
SFV07 9.9
SFV04 7.2
SFV06 8.1
SFV05 8.8
GCU02 7.8
GCU01 7.6
SFV02 7.1
SFV03 7.3
SFF06 7.3
SFF05 9.5
SFF04 7.6
SFF02 7.8
SFV01 9.5
SFF03 9.6
SJV02 7
SJV01 7.7
OCO03 9.3
SFF01 6.9
OCO02 8.6
OCO01 7.5
PAR02 6.7
PCU01 7.4
GBB01 8.2
PAR01 9.6
N
0 20 40
km
pH
≤ 6,94 ≤ 7,14 ≤ 7,26 ≤ 7,39 ≤ 7,61 ≤ 7,81 ≤ 8,21 ≤ 9,12
≤ 9,45 ≤ 9,52 ≤ 9,53 ≤ 9,54 ≤ 9,57 ≤ 9,66 ≤ 9,78 ≤ 9,90

13. Potássio

O Potássio (K) é o sétimo metal mais abundante na crosta terrestre, apresentando uma abundância média de 2,5%. Nas águas subterrâneas o seu teor varia entre 0,5 e 10 mg L^{-1} (CRQ SP, 2019; APHA, 2017).

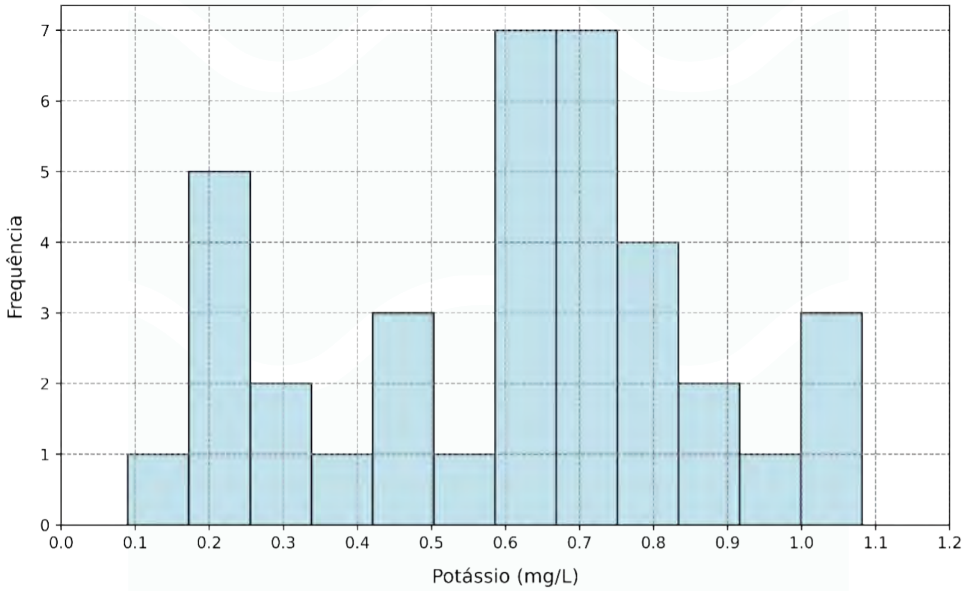
É encontrado em todo o mundo e ocorre principalmente como depósitos de cloreto de potássio (KCl), em rochas sedimentares do tipo silvita. Além do mais está comumente associado aos minerais de aluminossilicatos como os feldspatos. É um elemento essencial a vida humana e para as plantas fazendo parte de metabolismos importantes para a sobrevivência.

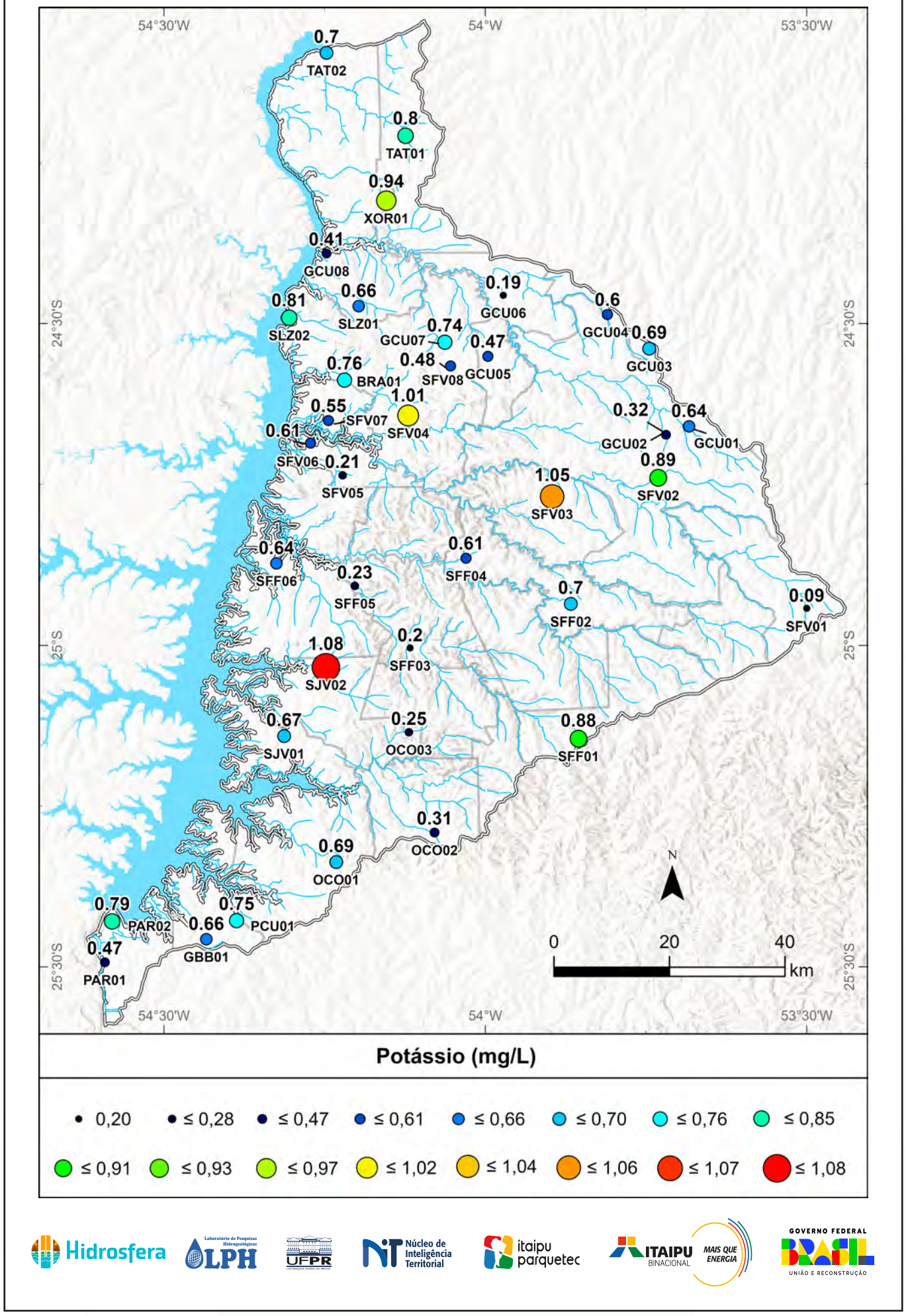
Assim sendo, o potássio é largamente utilizado na agricultura como fertilizante. Porém, diversos compostos de K também são utilizados na produção de vidro, sabão, detergente, ligas de sódio metálico, fogos de artifícios, entre outros.

A espécie aquosa desse elemento é o íon K^+, o qual é facilmente absorvido pelas plantas e incorporado em estruturas argilo-minerais, de modo que tende a não permanecer em solução. (APHA, 2017).

A concentração de potássio nas águas da BP3 variou entre 0,09 e 1,08 mg L^{-1}, com mediana de 0,66 mg L^{-1}.

Potássio (mg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	0,61	0,26	0,09	0,47	0,66	0,76	1,08




54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
0.7
TAT02
0.8
TAT01
0.94
XOR01
0.41
GCU08
0.81
SLZ02
0.66
SLZ01
0.19
GCU06
0.6
GCU04
0.74
GCU07
0.47
0.69
GCU03
0.48
SFV08
GCU05
0.76
BRA01
1.01
SFV04
0.55
SFV07
0.61
SFV06
0.21
SFV05
0.32
0.64
GCU02
GCU01
0.89
SFV02
1.05
SFV03
0.64
SFF06
0.61
SFF04
0.23
SFF05
0.7
SFF02
0.09
SFV01
0.2
SFF03
1.08
SJV02
0.67
SJV01
0.25
OCO03
0.88
SFF01
0.31
OCO02
0.69
OCO01
0.79
PAR02
0.75
PCU01
0.66
GBB01
0.47
PAR01
N
0
20
40
km
Potássio (mg/L)
0,20
≤ 0,28
≤ 0,47
≤ 0,61
≤ 0,66
≤ 0,70
≤ 0,76
≤ 0,85
≤ 0,91
≤ 0,93
≤ 0,97
≤ 1,02
≤ 1,04
≤ 1,06
≤ 1,07
≤ 1,08

14. Sílica

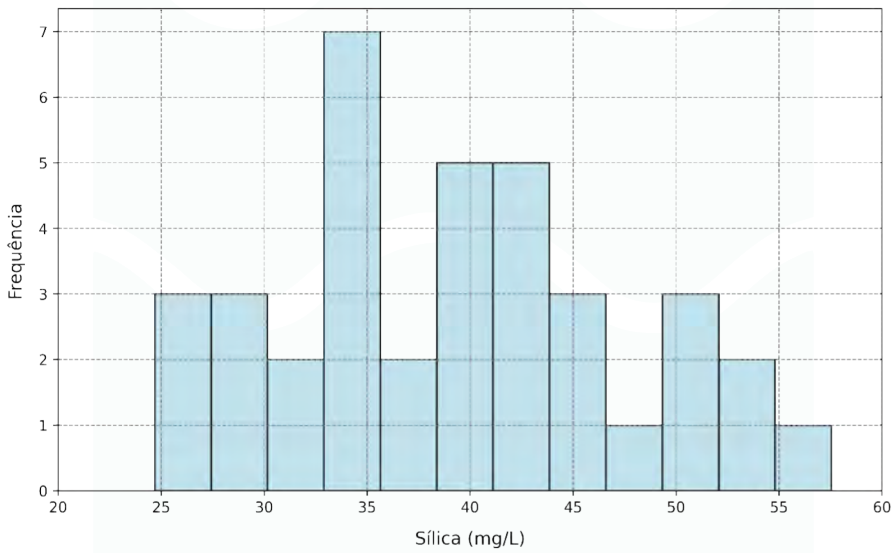
A Sílica (SiO_2) corresponde a interação entre os elementos químicos silício (Si) e o oxigênio (O), uma vez que o Si tende a não ocorrer na natureza de forma livre. A abundância média de sílica em rochas varia de 7 a 80% e seus teores em águas subterrâneas variam em torno de 14 mg L^{-1} (CRQ SP, 2019; APHA, 2017).

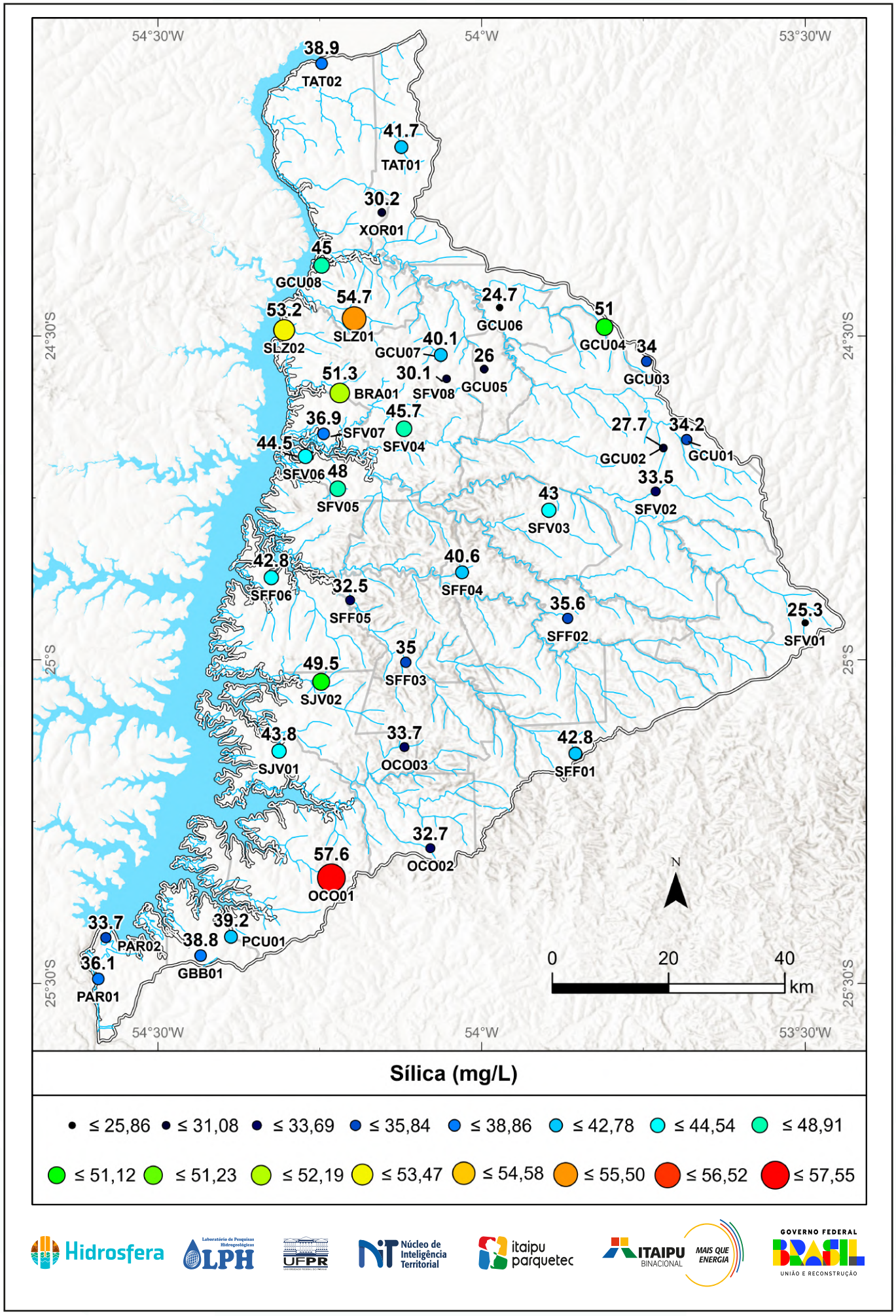
A sílica é encontrada em diferentes tipos de rochas como feldspato, mica, granito, basalto e xisto. É também o principal componente da areia e do arenito. Devido as suas propriedades, é utilizada em diferentes áreas da sociedade como na produção de tintas, filtros de piscina, na indústria de cosméticos, entre outras (APHA, 2017; Gomes, Furtado, Souza, 2018).

A espécie aquosa mais comum é H_4SiO_4 e sua solubilidade varia de acordo com a composição, estrutura e granulometria das diferentes formas de sílica. Na forma de quartzo, a solubilidade é de aproximadamente 6,5 mg L^{-1}, enquanto na forma de sílica amorfa esse teor pode chegar a 115 mg L^{-1} (Gomes, Furtado, Souza, 2018).

Apesar do elemento silício (Si) ser essencial aos animais, a exposição crônica de poeira de sílica é tóxica levando a quadros de silicose, doença que acomete os pulmões. Como essa doença está relacionada a inalação de poeiras, não há limites para a presença de sílica em águas (APHA, 2017; Gomes, Furtado, Souza, 2018). A concentração de sílica nas águas da BP3 variou entre 24,69 e 57,55 mg L^{-1}, com mediana de 38,86 mg L^{-1}.

Sílica (mg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	39,30	8,45	24,69	33,69	38,86	44,54	57,55




54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
38.9
TAT02
41.7
TAT01
30.2
XOR01
45
GCU08
54.7
SLZ01
53.2
SLZ02
24.7
GCU06
51
GCU04
40.1
GCU07
34
GCU03
26
GCU05
51.3
BRA01
30.1
SFV08
45.7
SFV04
36.9
SFV07
44.5
SFV06
48
SFV05
27.7
GCU02
34.2
GCU01
33.5
SFV02
43
SFV03
42.8
SFF06
40.6
SFF04
32.5
SFF05
35.6
SFF02
25.3
SFV01
35
SFF03
49.5
SJV02
43.8
SJV01
33.7
OCO03
42.8
SFF01
32.7
OCO02
57.6
OCO01
33.7
PAR02
39.2
PCU01
38.8
GBB01
36.1
PAR01
N
0
20
40
km
Sílica (mg/L)
≤ 25,86
≤ 31,08
≤ 33,69
≤ 35,84
≤ 38,86
≤ 42,78
≤ 44,54
≤ 48,91
≤ 51,12
≤ 51,23
≤ 52,19
≤ 53,47
≤ 54,58
≤ 55,50
≤ 56,52
≤ 57,55

15. Sódio

O Sódio (Na) diferentemente dos outros metais apresenta suas maiores reservas no oceano. Ainda assim é abundante na crosta terrestre, apresentando uma abundância média de 2,5%. Nas águas subterrâneas o seu teor está em torno de 5 mg L^{-1} (CRQ SP, 2019; APHA, 2017).

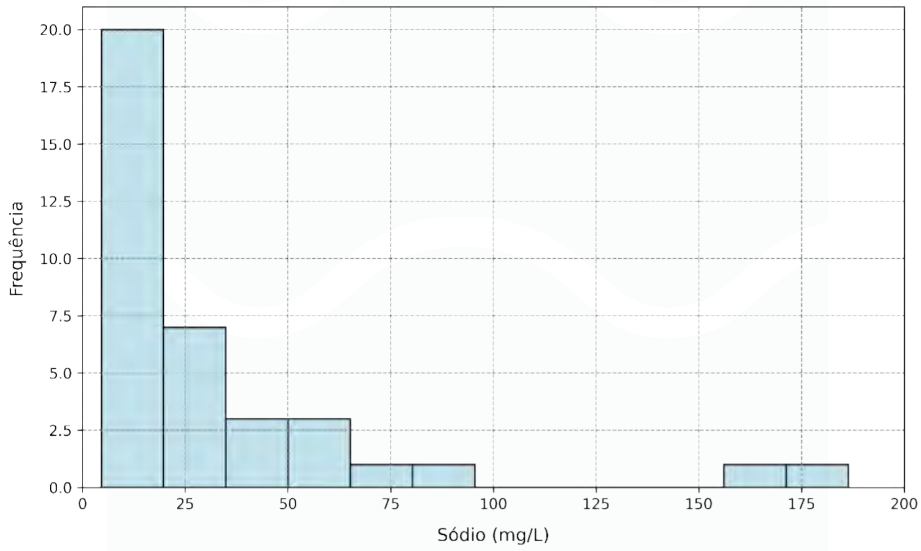
Ocorre em silicatos e em depósitos de sal. O sal pode ser obtido de três maneiras: pela evaporação da água do mar ou de lagos salgados, pela mineração do sal-gema (NaCl) e a partir da mineração (CRQ SP, 2019)

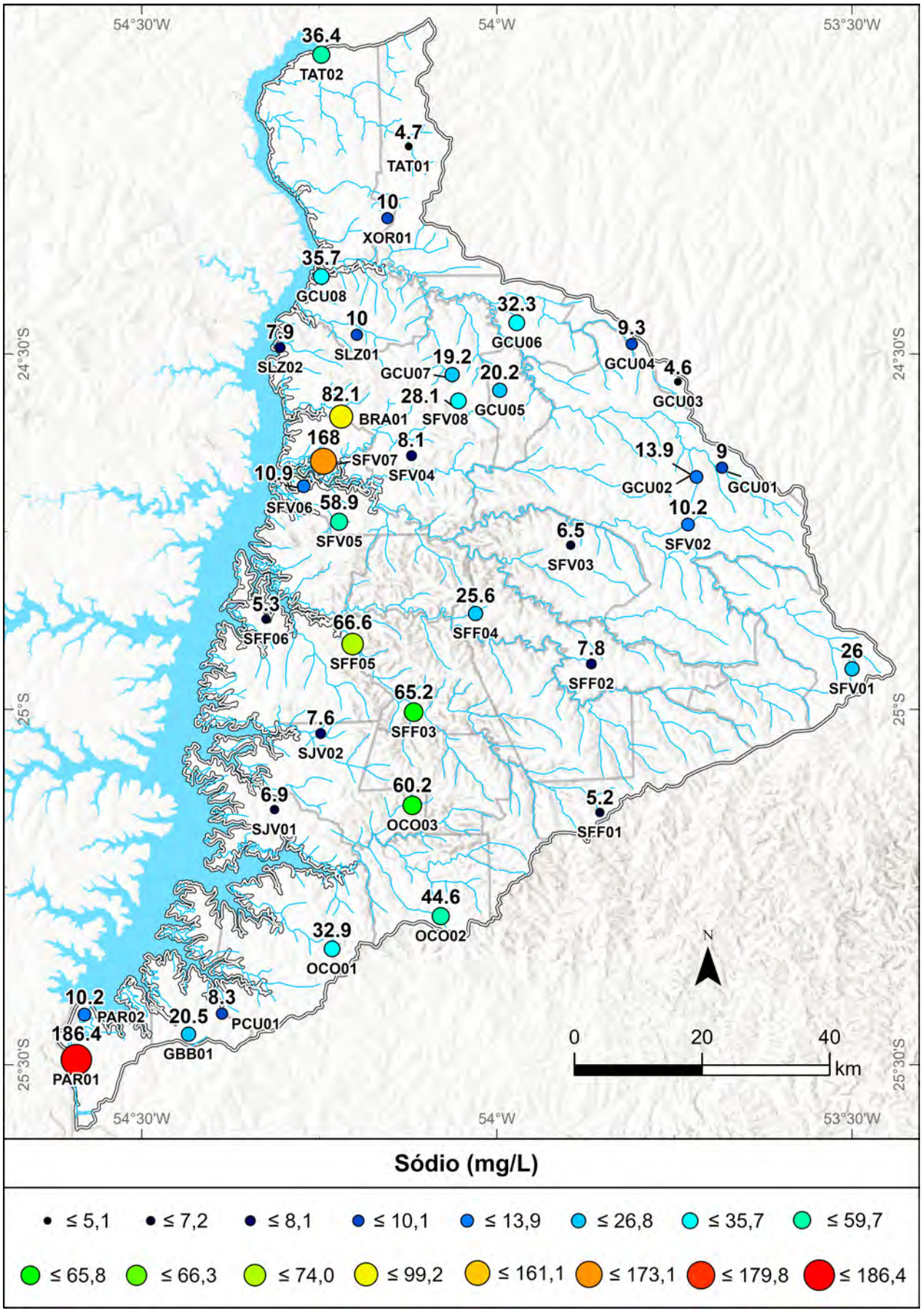
Além da função alimentar, esse metal é utilizado em fertilizantes, sodas cáusticas, em produtos químicos para o tratamento da água, na fabricação de papel, em baterias, entre outras aplicações (CRQ SP, 2019).

De modo geral, os compostos de sódio apresentam boa solubilidade em meios aquosos, liberando íon Na^+. No corpo humano o cátion de sódio é o mais abundante no líquido extracelular e tem como uma de suas funções a regulação osmótica e a manutenção do equilíbrio hídrico no organismo. Assim sendo, a ingestão elevada desse elemento pode causar o aumento da pressão arterial, que é um fator de risco para doenças cardiovasculares e renais (Cozzolino, 2016). Em efeito, a resolução 396/2008 do CONAMA regulamenta o limite máximo desse elemento em águas para o consumo humano em 200 mg L^{-1}.

A concentração de sódio nas águas da BP3 variou entre 4,59 e 186,40 mg L^{-1}, com mediana de 13,86 mg L^{-1}.

Sódio (mg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	31,49	40,89	4,59	8,08	13,86	35,70	186,40



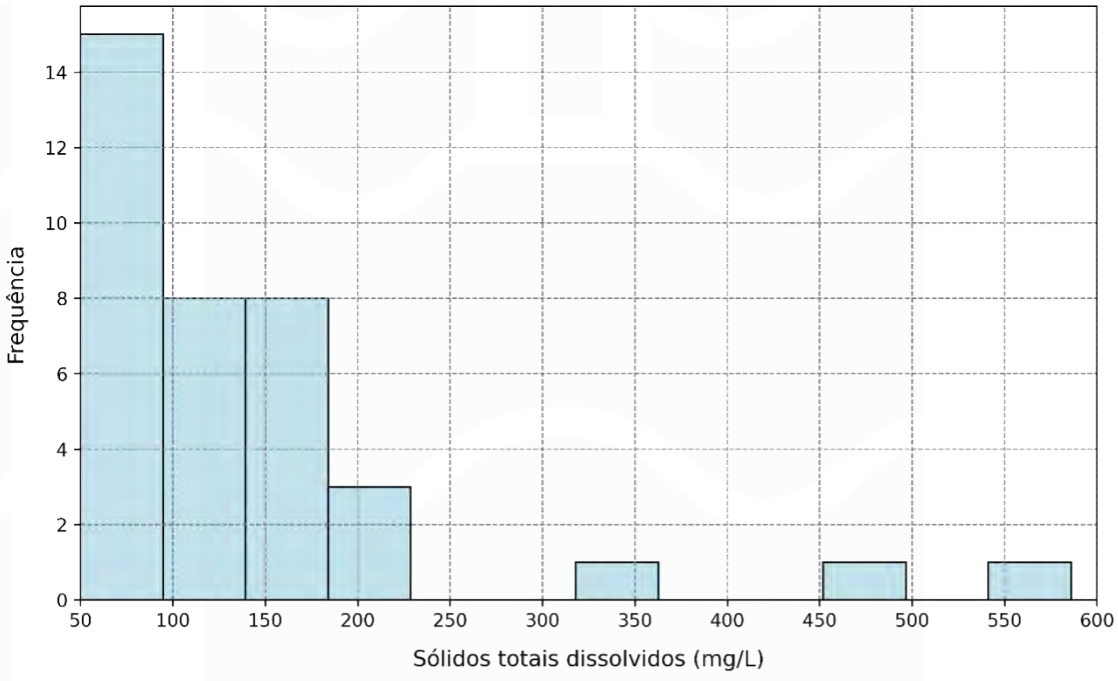

54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
36.4
TAT02
4.7
TAT01
10
XOR01
35.7
GCU08
32.3
GCU06
9.3
GCU04
4.6
GCU03
7.9
SLZ02
10
SLZ01
19.2
GCU07
20.2
GCU05
82.1
BRA01
28.1
SFV08
168
SFV07
8.1
SFV04
13.9
GCU02
9
GCU01
10.9
SFV06
58.9
SFV05
10.2
SFV02
6.5
SFV03
5.3
SFF06
66.6
SFF05
25.6
SFF04
7.8
SFF02
26
SFV01
65.2
SFF03
7.6
SJV02
6.9
SJV01
60.2
OCO03
5.2
SFF01
44.6
OCO02
32.9
OCO01
10.2
PAR02
8.3
PCU01
20.5
GBB01
186.4
PAR01
N
0
20
40
km
Sódio (mg/L)
≤ 5,1
≤ 7,2
≤ 8,1
≤ 10,1
≤ 13,9
≤ 26,8
≤ 35,7
≤ 59,7
≤ 65,8
≤ 66,3
≤ 74,0
≤ 99,2
≤ 161,1
≤ 173,1
≤ 179,8
≤ 186,4

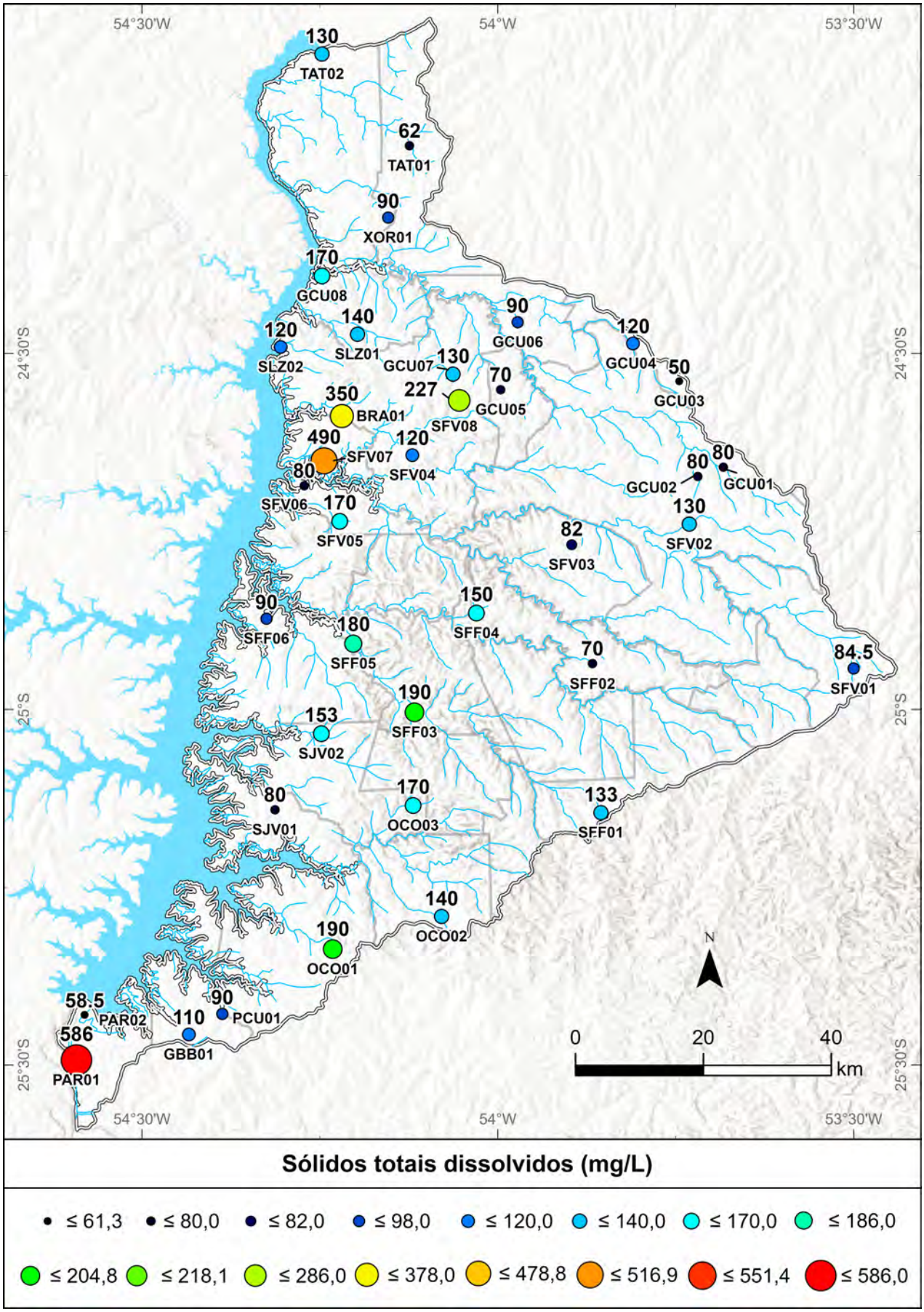
16. Sólidos Totais Dissolvidos

Os sólidos totais dissolvidos (STD) se referem a matéria dissolvida presente nas águas. E como águas com altos teores de sólidos dissolvidos tendem a apresentar menor palatabilidade, além de poderem ocasionar reações fisiológicas indesejáveis ao organismo, a resolução 396/2008 do CONAMA regulamenta o teor máximo de 1000 mg L^{-1} para parâmetro em águas utilizadas para o consumo humano. Outro fator importante, diz respeito a necessidade das análises de sólidos nas diferentes etapas do tratamento de água, com o objetivo de se obter águas dentro dos padrões regulamentados (APHA, 2017).

A concentração de STD nas águas da BP3 variou entre 50 e 586,00 mg L^{-1}, com mediana de 120 mg L^{-1}.

Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	147,46	111,12	50,00	82,00	120,00	170,00	586,00




54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
130
TAT02
62
TAT01
90
XOR01
170
GCU08
140
SLZ01
120
SLZ02
90
GCU06
120
GCU04
50
GCU03
130
GCU07
70
227
GCU05
350
BRA01
SFV08
490
SFV07
120
SFV04
80
SFV06
80
GCU02
80
GCU01
170
SFV05
130
SFV02
82
SFV03
150
SFF04
90
SFF06
180
SFF05
70
SFF02
84.5
SFV01
190
SFF03
153
SJV02
80
SJV01
170
OCO03
133
SFF01
140
OCO02
190
OCO01
58.5
PAR02
90
PCU01
110
GBB01
586
PAR01
N
0
20
40
km
Sólidos totais dissolvidos (mg/L)
≤ 61,3
≤ 80,0
≤ 82,0
≤ 98,0
≤ 120,0
≤ 140,0
≤ 170,0
≤ 186,0
≤ 204,8
≤ 218,1
≤ 286,0
≤ 378,0
≤ 478,8
≤ 516,9
≤ 551,4
≤ 586,0

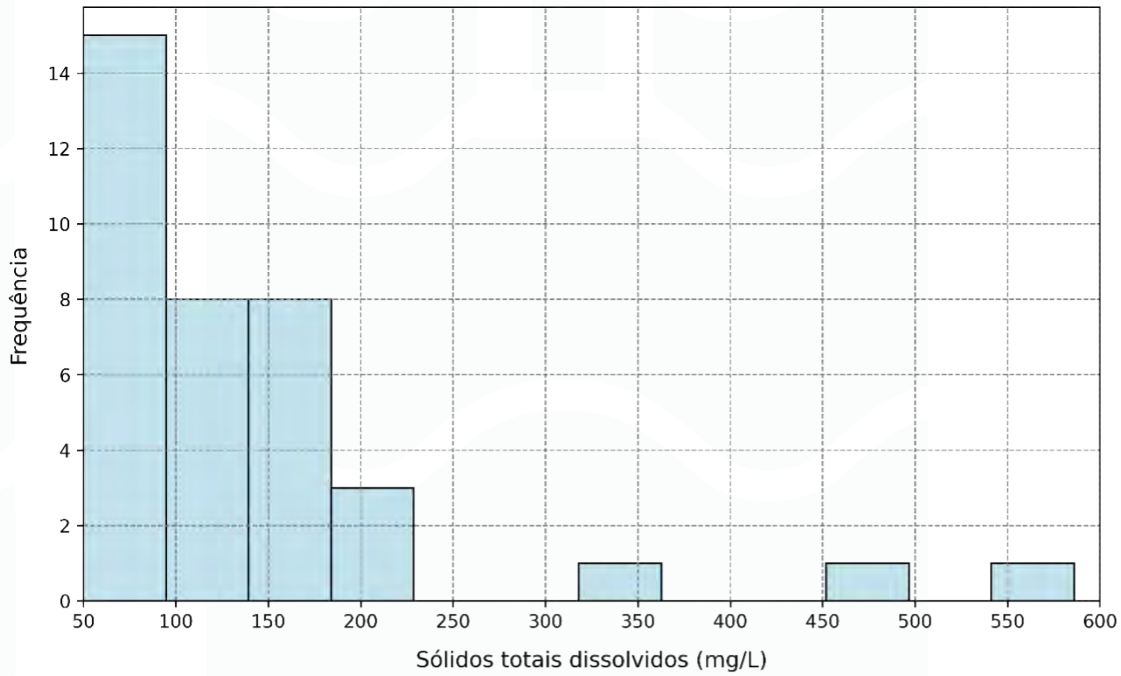
17. Sulfato

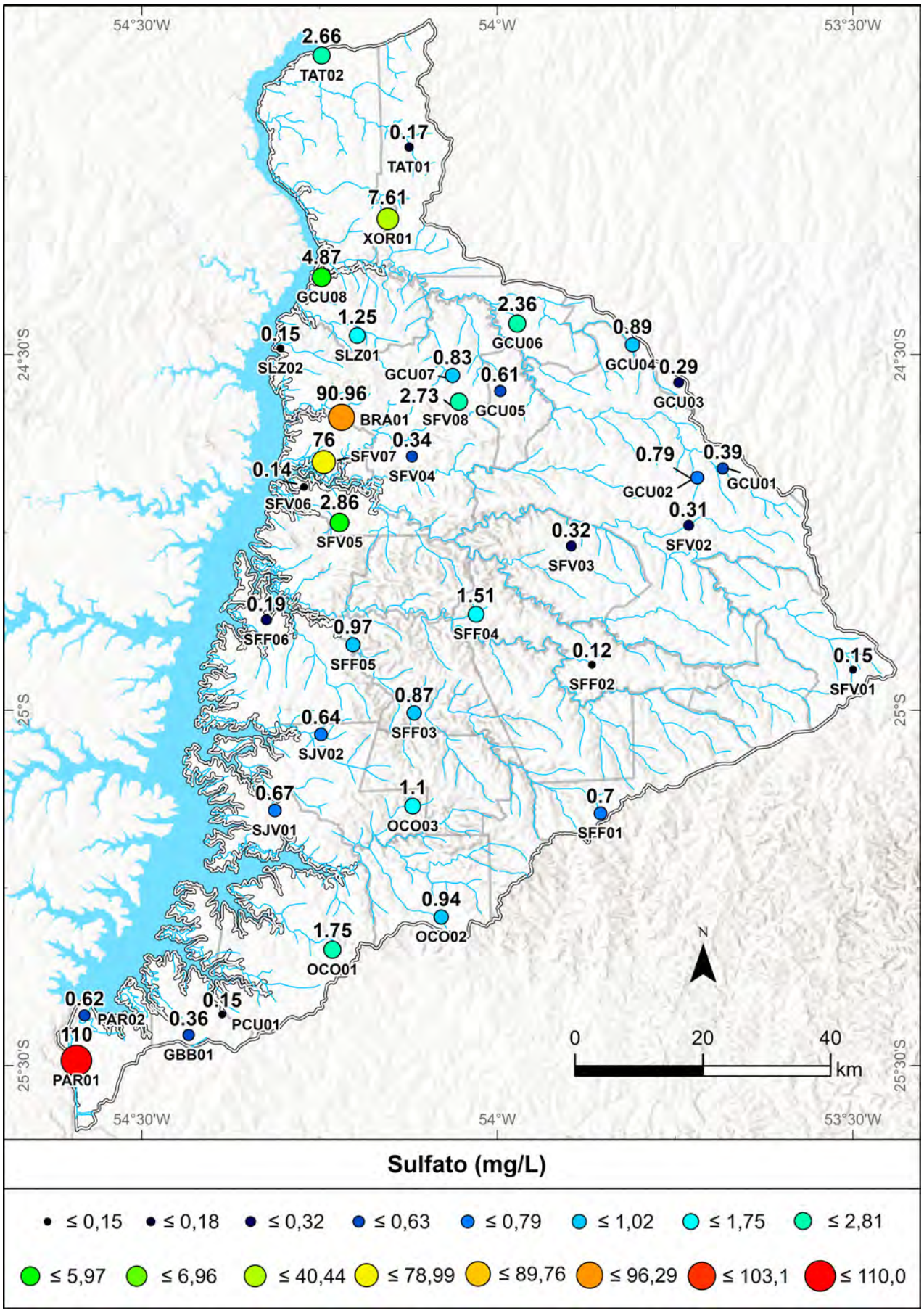
O íon sulfato (SO_4^{2-}) é um ânion comum na natureza e suas concentrações nas águas variam consideravelmente. Nas águas subterrâneas esse ânion é inserido pela dissolução de solos e rochas que contém sulfatos em sua composição, bem como pela oxidação de sulfetos (S^{2-}) (APHA, 2017; Vasconcelos & Oliveira, 2018). O sulfato também tem origem antropogênica a partir de resíduos domésticos e industriais como processos de mineração, produção de aço e de papel, entre outros (Torres-Martínez et al., 2020).

Além de alterar o sabor da água, os íons sulfatos apresentam efeito laxativo, principalmente em crianças (Feitosa et al., 2008). Desse modo, o teor máximo permitido em água utilizadas para o consumo humano é de 250 mg L^{-1} segundo a resolução 396/2008 do CONAMA.

A concentração de sulfato nas águas da BP3 variou entre 0,12 e 110,00 mg L^{-1}, com mediana de 0,79 mg L^{-1}.

Sulfato (mg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	8,57	25,58	0,12	0,32	0,79	1,75	110,00




54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
2.66
TAT02
0.17
TAT01
7.61
XOR01
4.87
GCU08
1.25
SLZ01
0.15
SLZ02
2.36
GCU06
0.89
GCU04
0.83
GCU07
0.61
GCU05
0.29
GCU03
90.96
BRA01
2.73
SFV08
76
SFV07
0.34
SFV04
0.14
SFV06
2.86
SFV05
0.79
GCU02
0.39
GCU01
0.31
SFV02
0.32
SFV03
0.19
SFF06
0.97
SFF05
1.51
SFF04
0.12
SFF02
0.15
SFV01
0.87
SFF03
0.64
SJV02
0.67
SJV01
1.1
OCO03
0.7
SFF01
0.94
OCO02
1.75
OCO01
0.62
PAR02
0.15
PCU01
0.36
GBB01
110
PAR01
N
0
20
40
km
Sulfato (mg/L)
≤ 0,15
≤ 0,18
≤ 0,32
≤ 0,63
≤ 0,79
≤ 1,02
≤ 1,75
≤ 2,81
≤ 5,97
≤ 6,96
≤ 40,44
≤ 78,99
≤ 89,76
≤ 96,29
≤ 103,1
≤ 110,0

18. Temperatura

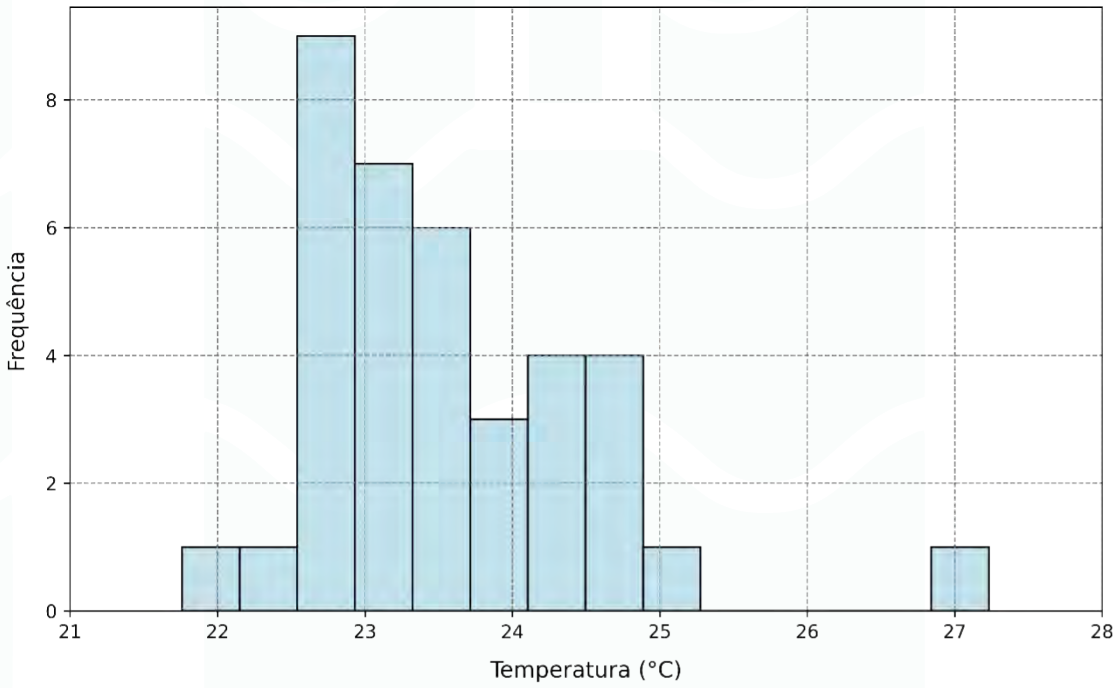
A temperatura (T °C) influencia em outros parâmetros físico-químicos da água, sendo usada em cálculos de alcalinidade, salinidade, em estudos de limnológicos, em testes colorimétricos, entre outros. Em efeito, a fonte de suprimento da água pode ser identificada a partir da temperatura em alguns casos, como de poços profundos (APHA, 2017).

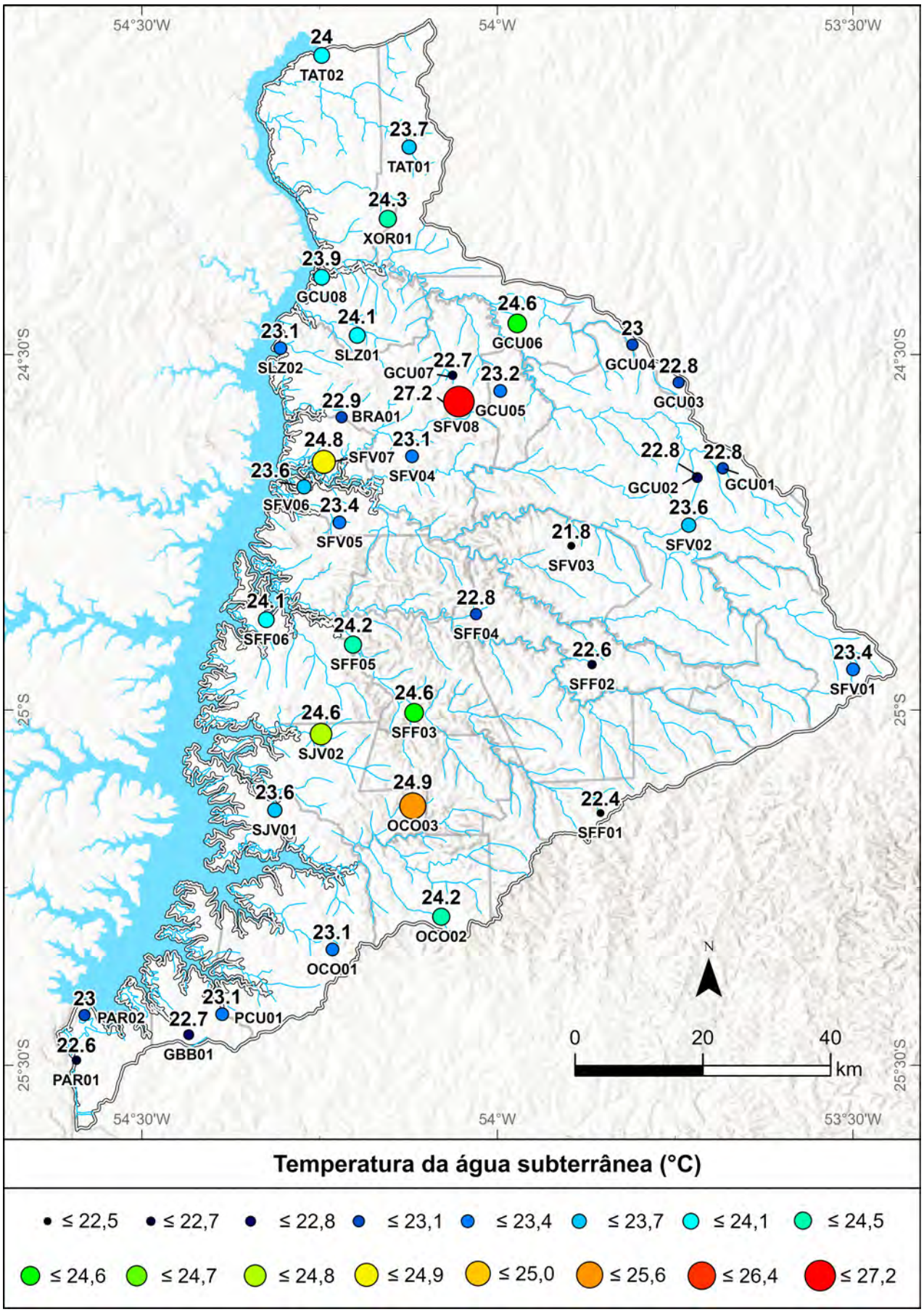
Ademais, a temperatura é um parâmetro a ser considerado nas etapas de tratamento das águas uma vez que ela influencia no pH e consequentemente na solubilidade e ionização das substâncias (FUNASA, 2004).

A temperatura também está correlacionada a profundidade de circulação dos fluxos subterrâneos, inclusive com aquíferos sotopostos.

A temperatura nas águas da BP3 variou entre 21,76 e 27,23 °C, com mediana de 23,35 °C.

Temperatura da água subterrânea (°C)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
37	23,54	0,98	21,76	22,85	23,35	24,14	27,23




54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
24
TAT02
23.7
TAT01
24.3
XOR01
23.9
GCU08
24.1
SLZ01
23.1
SLZ02
24.6
GCU06
23
GCU04
22.8
GCU03
22.7
GCU07
23.2
GCU05
27.2
SFV08
22.9
BRA01
24.8
SFV07
23.1
SFV04
23.6
SFV06
23.4
SFV05
22.8
GCU02
22.8
GCU01
23.6
SFV02
21.8
SFV03
24.1
SFF06
24.2
SFF05
22.8
SFF04
22.6
SFF02
23.4
SFV01
24.6
SFF03
24.6
SJV02
23.6
SJV01
24.9
OCO03
22.4
SFF01
24.2
OCO02
23.1
OCO01
23
PAR02
23.1
PCU01
22.7
GBB01
22.6
PAR01
N
0
20
40
km
Temperatura da água subterrânea (°C)
≤ 22,5
≤ 22,7
≤ 22,8
≤ 23,1
≤ 23,4
≤ 23,7
≤ 24,1
≤ 24,5
≤ 24,6
≤ 24,7
≤ 24,8
≤ 24,9
≤ 25,0
≤ 25,6
≤ 26,4
≤ 27,2

19. Zinco

O zinco (Zn) é o quarto metal mais utilizado do mundo, atrás do ferro, alumínio e cobre somente. Sua abundância na crosta terrestre é de aproximadamente 76 partes por milhão, enquanto que nas águas subterrâneas seu teor médio está em torno de 0,1 mg L^{-1}. A solubilidade do Zn em águas naturais é controlada pelo equilíbrio de carbonato e complexos orgânicos presentes no meio (CRQ SP, 2019; APHA, 2017).

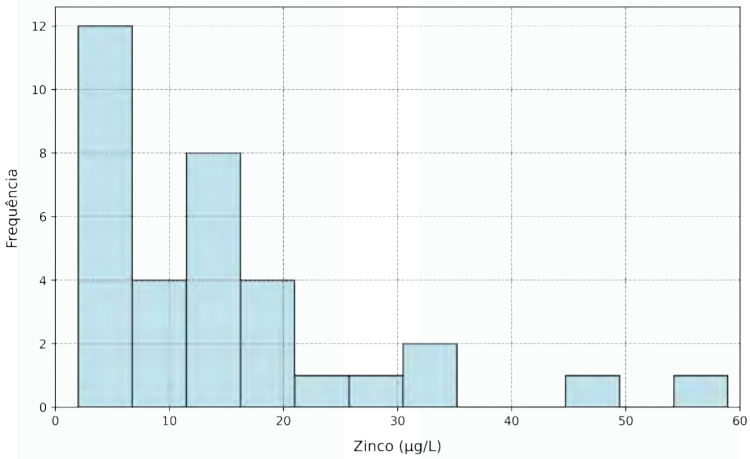
Ocorre na forma de minério, sendo os principais a esfalerita e a wurtzita, os quais possuem fórmula química iguais, a saber ZnS. É largamente utilizado nos processos de galvanização, visando a proteção de ferro e aço contra a corrosão. Porém também é utilizado na indústria química, na agricultura, na construção civil (em telhas, calhas), em baterias como pilhas comuns, entre outras aplicações (CRQ SP, 2019).

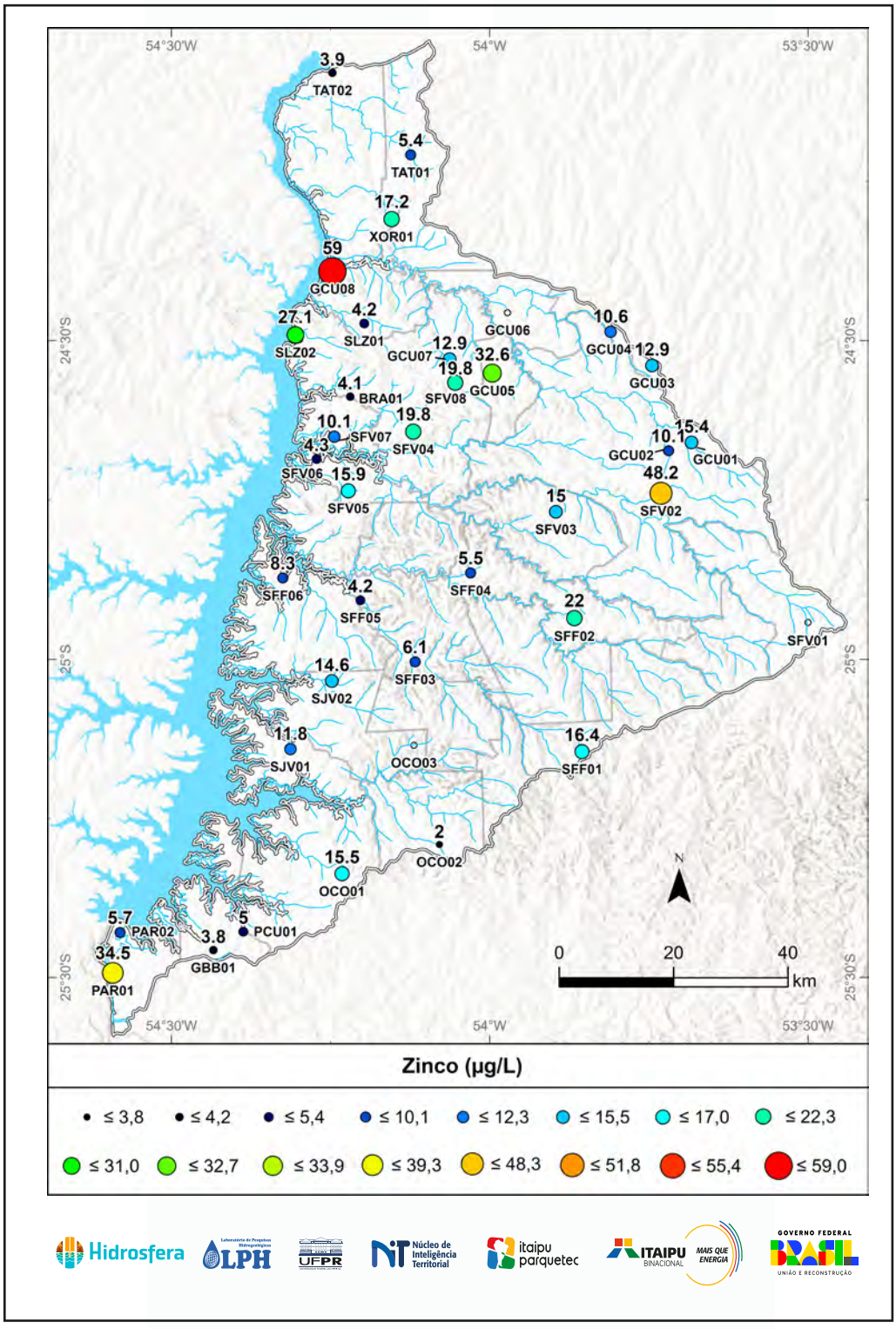
Além de desempenhar um papel importante na sociedade, esse elemento é essencial para o crescimento de plantas e animais. No organismo humano, o teor desse elemento varia entre 1,5 a 2,5 g, os quais estão distribuídos entre órgãos, tecidos, fluídos e secreções (Cozzolino, 2016). O Zn atua em diferentes sistemas fisiológicos, incluindo o da função imune, antioxidante, no desenvolvimento e crescimento, entre outros (Mafra & Cozzolino, 2004). Apesar da essencialidade desse metal para os organismos vivos, é válido ressaltar que pode ser tóxico para algumas espécies de vida aquática em níveis elevados de Zn na água (APHA, 2017).

A resolução 396/2008 do CONAMA recomenda o limite máximo de 5 mg L^{-1} ou 5000 µg L^{-1} para água potáveis e de 2 mg L^{-1} ou 2000 µg L^{-1} para águas utilizadas na irrigação.

A concentração de zinco nas águas da BP3 variou entre 2,00 e 58,96 µg L^{-1}, com mediana de 12,33 µg L^{-1}.

Zinco (µg/L)							
Contagem	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
34	14,82	12,83	2,00	5,43	12,33	16,99	58,96


Frequência
Zinco (µg/L)
0
2
4
6
8
10
12
0
10
20
30
40
50
60


54°30'W
54°W
53°30'W
24°30'S
25°S
25°30'S
3.9
TAT02
5.4
TAT01
17.2
XOR01
59
GCU08
27.1
SLZ02
4.2
SLZ01
GCU06
10.6
GCU04
12.9
GCU07
32.6
19.8
GCU05
12.9
GCU03
4.1
BRA01
SFV08
19.8
SFV04
10.1
SFV07
4.3
SFV06
15.9
SFV05
15.4
10.1
GCU02
GCU01
48.2
SFV02
15
SFV03
8.3
SFF06
4.2
SFF05
5.5
SFF04
22
SFF02
SFV01
6.1
SFF03
14.6
SJV02
11.8
SJV01
OCO03
16.4
SFF01
2
OCO02
15.5
OCO01
5.7
PAR02
5
PCU01
3.8
GBB01
34.5
PAR01
N
0
20
40
km
Zinco (µg/L)
≤ 3,8
≤ 4,2
≤ 5,4
≤ 10,1
≤ 12,3
≤ 15,5
≤ 17,0
≤ 22,3
≤ 31,0
≤ 32,7
≤ 33,9
≤ 39,3
≤ 48,3
≤ 51,8
≤ 55,4
≤ 59,0

ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA

O Índice de Qualidade da Água (WQI) é uma ferramenta desenvolvida para traduzir dados técnicos de qualidade da água em uma linguagem simples, integrada e acessível. Ele transforma os resultados laboratoriais de diferentes parâmetros em um único número entre 0 e 100, que ajuda a entender de forma clara se a água é boa, regular ou ruim para determinado uso, como abastecimento humano e irrigação.

O índice usado no Projeto Hidrosfera foi criado pelo Conselho Canadense de Ministros do Meio Ambiente (CCME), e é atualmente aplicado em diversas partes do mundo, inclusive no Brasil. Sua principal vantagem está em considerar não apenas quantos parâmetros estão fora dos limites recomendados, mas também com que frequência isso acontece e o quanto esses valores ultrapassam os padrões de segurança.

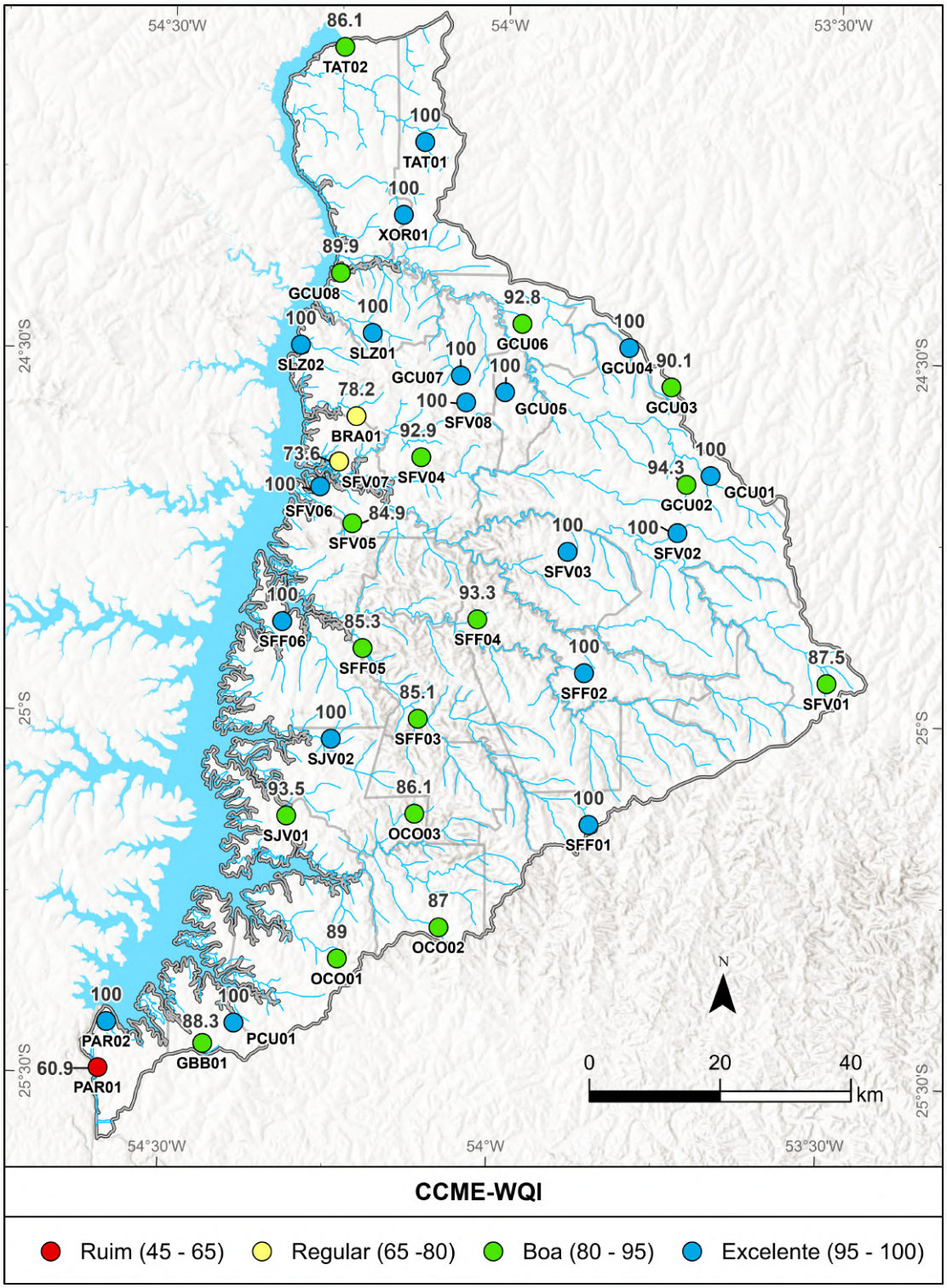
O CCME-WQI avalia a qualidade da água com base em três aspectos: Escopo (F1) – Quantos dos parâmetros analisados ultrapassam os limites recomendados, Frequência (F2) – Quantas vezes essas ultrapassagens ocorrem nas coletas realizadas e Magnitude (F3) – O quanto os valores se distanciam do limite aceitável (para mais ou para menos).

Essas três dimensões são combinadas para calcular um índice final que varia de 0 a 100, com valores mais próximos de 100 indicando melhor qualidade da água. Por exemplo, um ponto de monitoramento que apresenta um índice de 90 indica uma água com qualidade boa, geralmente dentro dos padrões, com pequenas exceções ocasionais. Já um valor abaixo de 50 sugere problemas recorrentes e graves, exigindo atenção e, muitas vezes, ações de mitigação.

Classificação da água a partir do CCME-WQI.

CCME-WQI	Classificação
95 a 100	Excelente
80 a 94	Boa
65 a 79	Regular
45 a 64	Ruim
Menor que 45	Muito ruim

No contexto da BP3, o CCME-WQI é uma ferramenta essencial para avaliar o estado geral da água subterrânea em diferentes regiões da bacia, identificar áreas mais críticas que podem precisar de intervenção, apoiar a gestão ambiental e o planejamento do uso sustentável dos recursos hídricos e comunicar sobre a hidroquímica do aquífero de forma clara com gestores, agricultores, professores e população em geral.



REFERÊNCIAS

COZZOLINO, S.M.F. **Biodisponibilidade de nutrientes.** São Paulo: Brasil, 2016.

CANTO, E.L. **Minerais, minérios, metais: de onde vêm?** para onde vão? São Paulo: Brasil, 2004.

CHIDIAC S, NAJJAR P, OUAINI N, RAYESS Y, AZZI D (2023) **A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives.** Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 22: 349-395. https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7

CONSELHO Estadual de Recursos Hídricos, Câmara Técnica de Águas Subterrâneas. **Nitrato nas águas subterrâneas: desafios frente ao panorama atual.** São Paulo: Brasil, 2021.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** Rio de Janeiro: Brasil, 2008.

FITTS, C. R. **Groundwater Science.** Londres: Reino Unido, 2002.

GAMBINO, D. Potentiality of vanadium compounds as anti-parasitic agents. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 255, p. 2193 – 2203, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ccr.2010.12.028. Acesso em: 12 mar. 2025.

GOMES, L. S.; FURTADO, A. C. R.; SOUZA, M. C. A Sílica e suas Particularidades. **Revista Virtual de Química**, v. 10, p. 1018 – 1038, 2018. FOSFATO, Brasil Escola. Disponível em:https://brasilescola.uol.com.br/quimica/fosfatos-poluentes-ou-nao.htm. Acesso em: 12 mar. 2025.

GREENWOOD, N.E.A. **Chemistry of the Elements.** Oxford: Inglaterra, 1997.

FUNASA. **Manual de fluoretação da água para consumo humano.** Brasília: Brasil, 2012. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/mnl_fluoretacao_2.pdf. Acesso em: 12 mar. 2025.

CETESB. Nitrato e nitrito, ficha de informação toxicológica. São Paulo: Brasil, 2022. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/12/Nitrato-e-Nitrito.pdf. Acesso em: 12 mar. 2025.

CETESB. Flúor e fluoretos, ficha de informação toxicológica. São Paulo: Brasil, 2022. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/24/2022/11/ Fluor-e-fluoretos.pdf. Acesso em: 12 mar. 2025.

CRQ SP. A importância do lítio na psiquiatria. Disponível em: https://crqsp.org.br/a-importancia-do-litio-na-psiquiatria/#:~:text=O%20l%C3%ADtio%20tem%20se%20mostrado,com%20o%20uso%20do%20l%C3%ADtio. Acesso em: 12 mar. 2025.

CRQ SP. Elemento químico - Cálcio. Disponível em: https://crqsp.org.br/elementos-quimicos-calcio/. Acesso em: 12 mar. 2025.

CRQ SP. Elemento químico - Estrôncio. Disponível em: https://crqsp.org.br/elemento-quimico-estroncio/#:~:text=%C3%89%20um%20metal%20prateado%20com,g%C3%A1s%20hidrog%C3%AAnio%20(H2). Acesso em: 12 mar. 2025.

CRQ SP. Elemento químico - Ferro. Disponível em: https://crqsp.org.br/elementos-quimicos-ferro/. Acesso em: 12 mar. 2025.

CRQ SP. Elemento químico - Fósforo. Disponível em: https://crqsp.org.br/elementos-quimicos-fosforo/. Acesso em: 12 mar. 2025.

CRQ SP. Elemento químico - Magnésio. Disponível em: https://crqsp.org.br/elementos-quimicos-magnesio/#:~:text=O%20magn%C3%A9sio%20%C3%A9%20o%20oitavo,tamb%C3%A9m%20no%20mar%20%5B1%5D. Acesso em: 12 mar. 2025.

CRQ SP. Elemento químico - Potássio. Disponível em https://crqsp.org.br/elementos-quimicos-potassio/#:~:text=O%20pot%C3%A1ssio%20%C3%A9%20um%20metal,41%20(6%2C7%25). Acesso em: 12 mar. 2025.

CRQ SP. Elemento químico - Sílicio. Disponível em: https://crqsp.org.br/elementos-quimicos-silicio/. Acesso em: 12 mar. 2025. CRQ SP. Elemento químico - Sódio. Disponível em: https://crqsp.org.br/elementos-quimicos-sodio/. Acesso em: 12 mar. 2025.

Resolução CONAMA nº 396, de 03 de abril de 2008. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=545. Acesso em: 12 mar. 2025.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Strontium. Disponível em: https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp159-c1.pdf. Acesso em: 12 mar. 2025.

Resolução RDC nº 645, de 24 de março de 2022. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-645-de-24-de-marco-de-2022-389582653. Acesso em: 12 mar. 2025.

IARC, Internacional Agency for Research on Cancer. Lead and Lead Compound, Inorganic. **IARC Monographs**, v. 23, 1987.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água.** São Paulo: Brasil, 2010.

MAFRA, D.; COZZOLINO, S.M.F. Importância do zinco na nutrição humana. **Revista de Nutrição**, Campinas, v. 17, p. 79 - 87, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1415-52732004000100009. Acesso em 12 mar. 2025.

FUNASA. **Manual prático de análise de água.** Brasília: Brasil, 2013. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manual_pratico_de_analise_de_agua_2.pdf. Acesso em: 12 mar. 2025.

MINEROPAR. **Atlas geoquímico da Folha de Curitiba.** Curitiba: Brasil, 2001.

NEVEN, K. **Hydrogeology and groundwater modeling.** Boca Raton: Estados Unidos, 2006.

ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; MANTOVANI, L. E.; BITTENCOURT, A. **As águas subterrâneas do Paraná.** Curitiba: Brasil, 2010.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** Washington: Estados Unidos, 2017.

UDDIN MG, NASH S, OLBERT AI (2021) **A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality.** Ecological Indicators 122: 107218. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218

VASCONCELOS, M. A.; OLIVEIRA, I B. Especiação Química do Sulfato em Águas Subterrâneas do Domínio Hidrogeológico Sedimentar do Estado da Bahia - Brasil, Utilizando o Método Tableau. **Águas Subterrâneas**, v. 32, p. 256 - 266, 2018. Disponível em: http://dx.doi.org/10.14295/ras.v32i2.29119. Acesso em: 12 mar. 2025.

VENANCIO, S. A água: características químicas da água. 2001.

FERNANDES, M. A. B.; SANTIAGO, M. M. F.; GOMES, D. F.; MENDES FILHO, J.; FRISCHKORN, H. LIMA, J. O. G. A. origem dos cloretos nas águas subterrâneas na Chapada do Apodi – Ceará. **Águas Subterrâneas**, v. 19, p. 25 - 34, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.14295/ras.v19i1.1349. Acesso em: 12 mar. 2025.

VOGEL, A.I. **Análise Química Quantitativa.** Rio de Janeiro: Brasil, 1992.

QUER CONHECER MAIS SOBRE AS AÇÕES DO PROJETO **HIDROSFERA** NO MONITORAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS?

ACESSE:

ESCOLA ITAIPU PARA SUSTENTABILIDADE

https://bit.ly/4hgZ5pD

Hidrosfera

https://bit.ly/3XQPZJ5

Hidrosfera

Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas LPH

UFPR

Núcleo de Inteligência Territorial

itaipu parquetec

ITAIPU BINACIONAL

MAIS QUE ENERGIA

GOVERNO FEDERAL BRASIL UNIÃO E RECONSTRUÇÃO