

AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO PROVENIENTE DO CARVÃO NOS POÇOS DO AQUÍFERO FORMADO POR LEQUES ALUVIAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARARANGUÁ, SANTA CATARINA

Angela DA SILVA BELLETTINI¹; Guilherme CASAROTTO TROIAN³; Antônio PEDRO VIERO²

¹Serviço Geológico do Brasil – CPRM, angela.bellettini@cprm.gov.br; ² Serviço Geológico do Brasil – CPRM, guilherme.troian@cprm.gov.br; ³Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, antonio.viero@ufrgs.br

RESUMO

A Região Carbonífera de Santa Catarina (RCSC) passou por fases de alta exploração de carvão mineral, as quais geraram um grande passivo ambiental, com diversas áreas contaminadas com pilhas de rejeitos e estéril expostos. O Serviço Geológico do Brasil - CPRM monitora ambientalmente os recursos hídricos da região carbonífera do sul do Estado de Santa Catarina, dentro desta atividade são coletadas e analisadas em laboratório amostras de água subterrânea de cinco poços de monitoramento do aquífero dos leques aluviais na bacia hidrográfica do Rio Araranguá. Dentro deste contexto, realizou-se a análise da contaminação por carvão dos dados preexistentes referente a 21 campanhas de coletas de água subterrânea nos poços realizadas até 2019. Os estudos resultaram na confirmação de contaminação derivada pela atividade de mineração nos leques aluviais em três poços de monitoramento, estes situados próximas a áreas impactadas pela mineração de carvão.

Palavras-chave: Carvão, Região Carbonífera, Monitoramento Ambiental, Água Subterrânea

ABSTRACT

The Carboniferous Region of Santa Catarina (CRSC) went through phases of high mining of coal, which generated a great environmental liability, with several areas contaminated with piles of waste and exposed sterile. The Geological Survey of Brazil - CPRM environmentally monitors water resources in the southern CRSC. Inside this activity, samples of groundwater from five wells for monitoring the aquifer of alluvial fans, in the hydrographic basin Araranguá, are collected and analyzed in the laboratory. This context, the analysis of coal contamination of the pre-existing data regarding 21 campaigns for collecting groundwater in the wells until 2019 was carried out. The studies resulted in the confirmation of contamination derived by the mining activity in the alluvial fans in three monitoring wells, located next to areas impacted by coal mining.

Key-Words: Coal, Carboniferous Region Environmental Monitoring, Groundwater

1 INTRODUÇÃO

As camadas de carvão, da Formação Rio Bonito, situadas no estado de Santa Catarina no sul do Brasil são mineradas desde o século XIX. Com isso, a região engloba as bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Urussanga e Tubarão sendo conhecida como Bacia Carbonífera, sendo um dos principais distritos mineiro de carvão no Brasil.

A Região Carbonífera de Santa Catarina (RCSC) passou por fases de alta exploração de carvão mineral por empresas estrangeiras, no início e durante a Primeira Guerra Mundial, crescendo a

atuação de empresas nacionais, a partir da crise do Petróleo, em 1973. Entretanto, em outros momentos, houve a redução da produção de carvão, acarretando falência de algumas empresas. Os principais métodos de lavra adotados na bacia carbonífera foram lavra a céu aberto e subterrânea. Os métodos de exploração geraram, um grande passivo ambiental, com diversas áreas contaminadas com pilhas de rejeitos e estéril expostos. Formaram-se também passivos de bocas de minas, caimentos e rios com drenagem ácida de mina. (KREBS; POSSA, 2008).

Nesse contexto, a região foi submetida à sentença nº 20.097 (2000) em decorrência da ação civil pública nº 93.8000533-4 de Autoria do Ministério Público Federal. Essa ação condenou solidariamente as empresas carboníferas de Santa Catarina e a União como responsáveis pela recuperação da degradação ambiental provenientes do setor de carvão mineral no Sul de Santa Catarina. Com o propósito de avaliar as áreas recuperadas pela mineração de carvão, foi criado junto ao Ministério Público um Grupo Técnico de Assessoramento à ação civil pública citada anteriormente. O Serviço Geológico do Brasil - CPRM faz parte deste grupo e tem como função principal monitorar os recursos hídricos da bacia carbonífera do sul do Estado de Santa Catarina (BELLETTINI, 2019a).

No Monitoramento Ambiental da Bacia Carbonífera, a CPRM coleta dados de águas superficiais, incluindo drenagem ácida de bocas de mina; e águas subterrâneas, nas bacias hidrográficas do Rio Araranguá, do Rio Urussanga e do Rio Tubarão. O monitoramento foi iniciado em 2006, mas existem dados desde 2002 de outras instituições. O banco de dados contém 40 campanhas de águas superficiais, 21 campanhas de águas subterrâneas e 22 campanhas de drenagem ácida de bocas de mina.

No monitoramento subterrâneo da bacia carbonífera, foram projetados 37 poços de monitoramento, sendo que apenas 28 encontram-se em operação, e destes nove poços situam-se na bacia hidrográfica do Rio Araranguá (área objeto de estudo deste trabalho). Neste trabalho serão analisados dados de cinco poços utilizados no monitoramento do aquífero formado pelos leques aluviais na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá para verificar a contaminação proveniente da mineração de carvão. A análise e os dados da avaliação da contaminação proveniente do carvão no aquífero profundo, formado principalmente pelas unidades geológicas Rio Bonito e Palermo da Bacia do Paraná, podem ser encontrados em Bellettini (2019b).

2 ÁREA DE ESTUDO

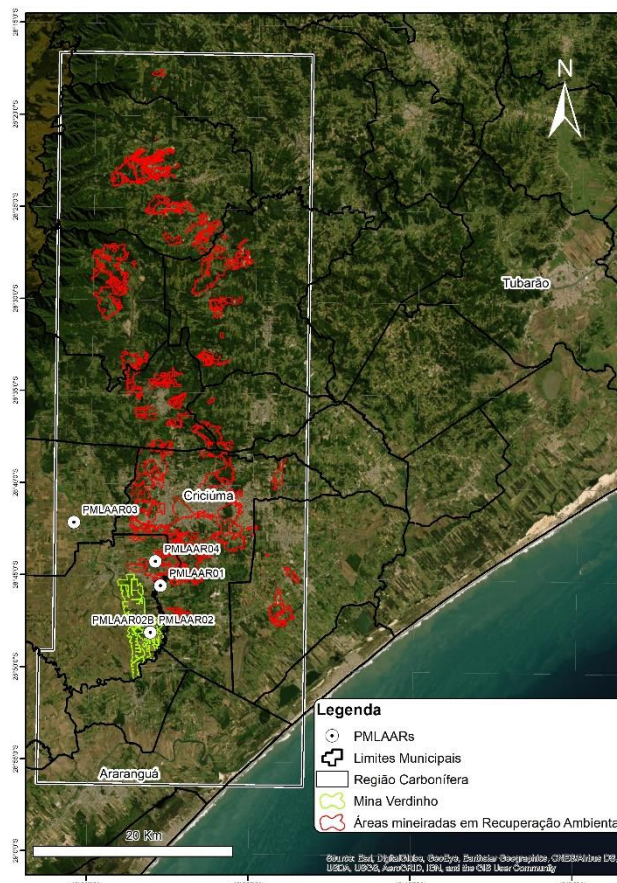
A Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (BHRA) faz parte da região hidrográfica nacional do Atlântico Sul com uma extensão territorial de 3089 km² (limite atualizado SDS/DRHI, 2013/2015), calculada com o software ArcMap versão 10.6.1. Os poços de monitoramento estudados estão situados na planície costeira no sul da RCSC, nos municípios de

Forquilha, Criciúma e Nova Veneza conforme a figura 1.

2.1 GEOLOGIA

A RCSC encontra-se no contexto geológico da borda leste da Bacia do Paraná, apresenta porções do Batólito Florianópolis (a sudeste) e coberturas sedimentares de idade Cenozoica (Figura 2). As principais unidades geológicas presentes na borda leste da Bacia do Paraná são os Supergrupos Tubarão e São Bento, e, no Batólito Florianópolis, os Granitoides Santa Rosa de Lima e os Granitos Imaruí-Capivari e Jaguaruna (WILDNER et al., 2014).

Figura 1 – Localização dos poços de monitoramento dos leques aluviais na Região Carbonífera de Santa Catarina.



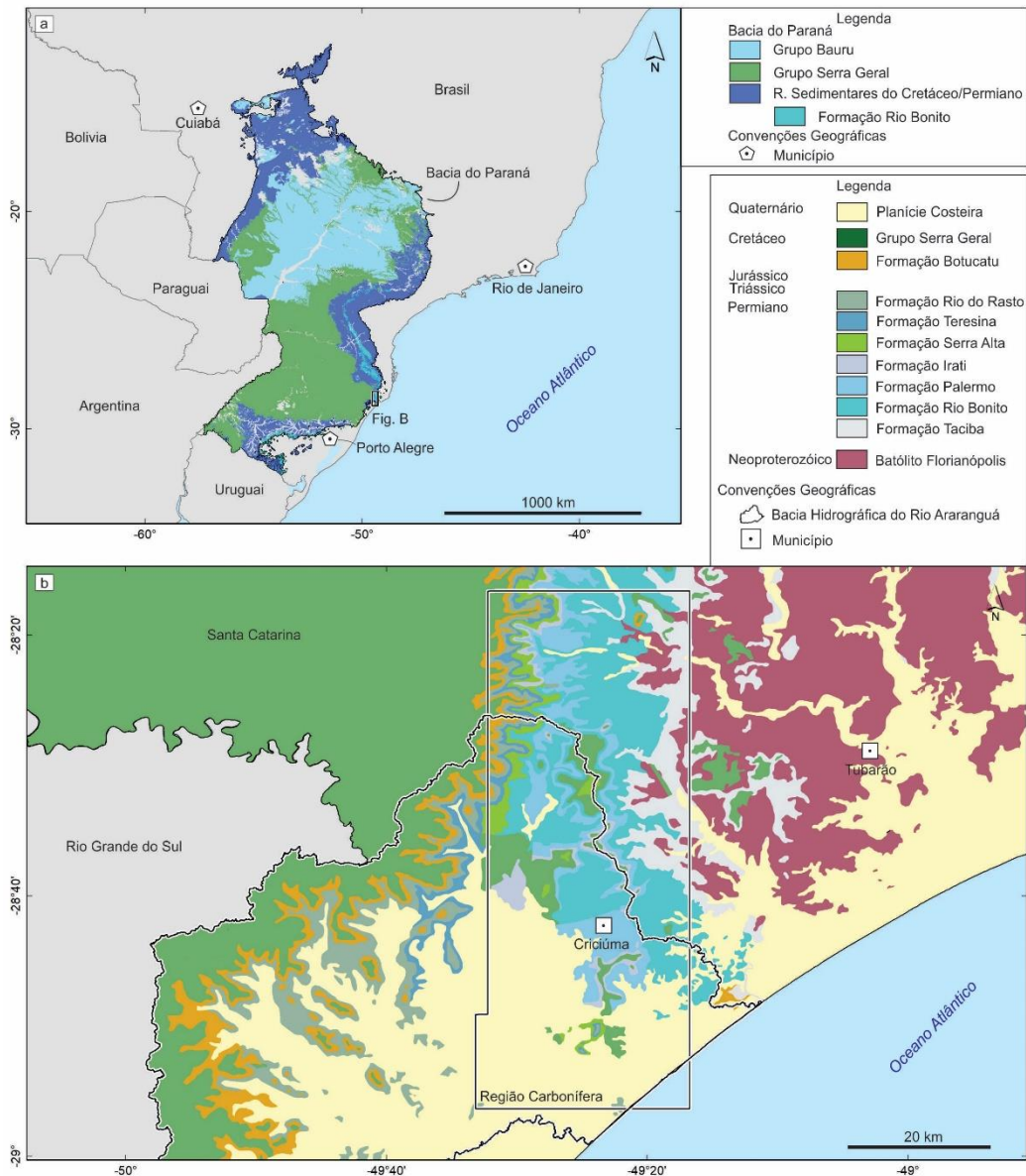
De acordo com a coluna estratigráfica da região carbonífera (Tabela 1) modificada de Krebs (2004), os sedimentos da Bacia do Paraná: Grupo Itararé, Grupo Guatá, Grupo Passa Dois e Grupo São Bento depositaram-se acima das rochas neoproterozóicas do Batólito Florianópolis. As litologias cenozóicas foram depositadas após as unidades geológicas da Bacia do Paraná. Na área de estudo, que engloba os poços de monitoramento da BHRA, ocorrem afloramentos das litologias

sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná e os sedimentos cenozoicos (WILDNER et al., 2014).

Os depósitos de idades Cenozoica presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, segundo

Krebs (2004), resultam do Sistema de leques aluviais, que recobrem uma área expressiva da BHRA, e os Sistemas Laguna Barreira, ambos descritos no Estado de Santa Catarina por Caruso Jr. (1995).

Figura 2 – Mapa Geológico da Bacia Carbonífera de Santa Catarina (Modificado de BELLETTINI, 2019a).



O Sistema de leques aluviais é composto por depósitos sedimentares proximais das encostas do embasamento granítico e das escarpas da Serra Geral, e fácies aluviais de transporte de material (CARUSO JR., 1995). Leques aluviais são caracterizados por depósitos de sedimentos em forma cônica depositados próximos ao sopé de encostas declivosas até áreas com declividades planas (BULL, 1968; MEDEIROS, 1971; NICHOLS,

2009). Na BHRA, esses depósitos são constituídos por cascalhos, areias e lama mal-classificadas depositados por fluxos torrenciais não canalizados e canalizados, correntes normais e fluxos de detritos (KREBS, 2004).

Os leques proximais ocupam uma área maior, na BHRA e mais plana, e apresentam depósitos com litologias de granulometrias que diminuem em

direção à planície costeira. São formados por processos fluviais e apresentam estruturas internas, como clastos suportados com presença ou não de clastos imbricados. As características demonstram que esses depósitos apresentam litologias com boas características aquíferas, bem como os depósitos de leque distal, entretanto, eles parecem pouco espessos e encobertos por litologias dos sistemas laguna-barreira na BHRA. Esses depósitos apresentam granulometrias ainda mais finas, são compostos por seixos, grânulos e areia grossa, com a ocorrência de imbricação de grãos por gradação normal (KREBS, 2004).

Atualmente, também há formação dos depósitos aluviais de diversos tipos que retrabalham sedimentos e rochas e são depositados pelos principais cursos d'água presentes na bacia hidrográfica estudada. Os principais depósitos próximos às áreas fontes e elevadas são barras transversais ou longitudinais e barras em pontal, e, em regiões mais planas, em vales abertos, depósitos argilosos ou com composições arenosas, siltícas e argilosas (KREBS, 2004; WILDNER et al., 2014).

Os aquíferos porosos relacionados aos sedimentos cenozoicos ocorrem sobre unidades pré-cambrianas e terrenos gonduânicos, sendo que, na BHRA, ocorrem, principalmente, sobre as litologias da Bacia do Paraná (Gonduânica).

Esse sistema aquífero situa-se na planície costeira e é constituído de depósitos de leques aluviais (são os depósitos com maior extensão na BHRA), barreiras marinhas com retrabalhamento eólico, paleo-lagunares e fluviolagunares (KREBS, 2004; MACHADO, 2013).

O sistema aquífero de depósitos Cenozoicos caracteriza-se por ser livre a semi-confinado, com porosidade intragranular com boa permeabilidade e é regionalmente homogêneo. Apresenta importância hidrogeológica por sua potencialidade aquífera elevada em quase toda a sua extensão. Porém, pode ocorrer localmente potencialidade aquífera reduzida ou nula, em depósitos paleo-lagunares, devido à baixa permeabilidade das suas camadas de composição siltico-argilosas (KREBS, 2004; MACHADO, 2013).

As áreas de recarga desse aquífero ocorrem em praticamente toda a sua extensão, na área de estudo, desde as cabeceiras da Serra Geral até o oceano, por infiltração direta e/ou por declive hidráulico. Entretanto, sua proximidade com o

oceano, as diversas ocupações urbanas nas áreas de recarga e a granulometria dos depósitos conferem elevada vulnerabilidade natural de contaminação.

Essa contaminação pode ocorrer por falta de saneamento, por pesticidas utilizados na agricultura, por irrigação (Rio Mãe Luzia e afluentes) de lavouras de arroz em áreas próximas e distantes de áreas mineiradas por carvão (KREBS, 2004; MACHADO, 2013).

Tabela 1 Coluna estratigráfica da região carbonífera de Santa Catarina; sequências de Milani (2007) incluem Gondwana III no Cretáceo e no Jurássico e Gondwana I no Triássico e Permiano (modificado de KREBS, 2004).

Era	Período	Grupo ¹	Formação ¹	Membro ¹
Cenozóica			Planície costeira	
Mesozóica	Cretáceo	São Bento	Serra Geral Botucatu	
	Jurássico Triássico	Passa Dois	Rio do Rasto	Morro Pelado
Paleozóica	Permiano			Serrinha
			Teresina Serra Alta	
		Guatá	Palermo Rio Bonito	Assistência Taquaral Siderópolis Paraguaçu Triunfo
		Itararé	Taciba	Rio do Sul
Proterozóica	Neoproterozóica		Batólito Florianópolis	

¹Schneider (1974)

3 METODOLOGIA

Através de imagens de satélite do Google Earth e do Basemap do ArcMap observou-se as áreas mineradas localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (BHRA) e na região Carbonífera no estado de Santa Catarina, no sul do Brasil. Bem como, avaliou-se a proximidade dos poços de monitoramento situados nos leques aluviais com as áreas mineradas e passivos ambientais situados no entorno dos poços de monitoramento. Este estudo consiste na análise de dados de qualidade de água subterrânea coletada em poços de monitoramento e analisada pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM a cada seis meses, desde julho de 2008. Sendo que foram utilizados dados coletados em cinco poços

instalados no sistema aquífero de Leques Aluviais (CPRM 2018). O monitoramento dos parâmetros analisados teve modificações ao longo do tempo e apenas três poços possuem o perfil construtivo, como mostra a tabela 2.

Tabela 2 Informações dos poços de monitoramento, datum SIRGAS 2000 (CPRM, 2018).

Poços	Coord. E	Coord. N	Ano	Aquífero	P (m)	C	Nível do filtro (m)
PMLAAR01	653627	681774 5	2009	Leque Aluvial	8	x	7 - 8
PMLAAR02	652556	681307 5	2013	Leque Aluvial	14	x	8 - 10
PMLAAR02 B	652536	681302 0		Leque Aluvial	11,5	-	-
PMLAAR03	644924	682412 4		Leque Aluvial	11	-	-
PMLAAR04	653118	682019 8	2010	Leque Aluvial	7	x	6 - 7

Coord. = coordenadas; Ano = ano de perfuração dos poços; P = profundidade máxima do poço; C = Perfil construtivo; x = possui perfil construtivo; Nível do filtro = intervalo de localização do filtro; (-) = não determinado.

Esta tabela também mostra informações de coordenadas em UTM, ano de perfuração, aquífero, profundidade e nível de captura dos quatro poços analisados. É relevante ressaltar que, devido ao difícil acesso e a problemas técnicos com a coleta no poço PMLAAR02, desde a 10ª campanha iniciou-se também a coleta do poço PMLAAR02B, pertencente à extinta Carbonífera Criciúma, ambos situados muito próximos geograficamente.

A amostragem segue a norma NBR-15.847 para água subterrânea, sendo coletada preferencialmente pelo método Low Flow (baixa vazão). Os dados estão contidos nos relatórios técnicos internos dos termos de execução descentralizada relativos ao acordo de cooperação técnica firmado entre a CPRM e o Ministério do Meio Ambiente – MMA, no período de 2008 a 2018 referidos no Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2018).

Cada campanha de monitoramento analisou os seguintes parâmetros de campo: pH, condutividade elétrica, temperatura, oxigênio dissolvido, ORP (Potencial de Redução de Oxidação), TDS (total de sólidos dissolvidos); e os seguintes parâmetros laboratoriais: pH, condutividade elétrica, alcalinidade, acidez, Cl⁻, SO₄²⁻, Fe, Fe²⁺, Mn, Al, Mg, Ca, K, Cu, Cd, Pb, Na, Zn, As, Hg. Desde a instalação dos poços de monitoramento, a proporção de parâmetros analisados foi alterada,

incluindo cloreto, cálcio, sódio e potássio a partir da sexta campanha de amostragem (CPRM 2018).

Os parâmetros laboratoriais foram analisados no Centro Nacional de Treinamento para Controle da Poluição na Mineração (CECOPOMIN) SGB/CPRM na Superintendência de São Paulo (SUREG-SP) de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Water Works Association et al. 2005). Os parâmetros pH, alcalinidade, condutividade elétrica e acidez foram analisados com titulação potenciométrica por eletrodos; Cl⁻ com titulação potenciométrica com nitrato de prata usando Titran (boletim de aplicação nº 130 com eletrodo de oxi-redução) e para comparação o Kit de Cloreto Merck no fotômetro Nova60; SO₄²⁻ com análise gravimétrica; Fe²⁺ por análise espectrométrica no equipamento UV-VIS; Fe total, Mn total, Al total, Mg, Ca, K, Cu, Cd, Pb, Na, Zn por espectrometria de emissão óptica por plasma (ICP-OES); e As por hidreto para espectrometria de emissão óptica por plasma (HVG-ICP-OES). Uma sonda multiparâmetro foi usada para analisar os parâmetros de campo.

Para a interpretação e análise dos dados utilizou-se diagramas de variação binária através do software Excel para identificar processos geoquímicos a partir da relação entre os parâmetros químicos. Enquanto que para a avaliação da contaminação das águas subterrâneas comparou-se os dados com as concentrações máximas dos parâmetros com os valores máximos permitidos na resolução CONAMA 396-08 (CONAMA 2008). Também se comparou com os resultados de Background para águas subterrâneas na RCSC (SIMÃO et al., 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os poços de monitoramento no aquífero dos leques aluviais situados na BHRA, são PMLAAR01, PMLAAR02, PMLAAR03 e PMLAAR04. O PMLAAR02B apresenta poucos dados químicos (8 campanhas de coleta) e informações construtivas do poço.

PMLAAR01 situa-se no município de Criciúma, o PMLAAR02 e PMLAAR04 em Forquilha, e PMLAAR03 em Nova Veneza, estando apenas PMLAAR03 a montante das áreas mineiradas na região carbonífera de Santa Catarina, conforme a figura 7. Inclusive PMLAAR02 e PMLAAR02B situam-se na área da Mina Verdinho (em processo de

fechamento após o abandono pela Carbonífera Criciúma em 2016) próximo ao depósito de rejeito.

Os perfis construtivos dos poços PMLAAR01, PMLAAR02 e PMLAAR 04 demonstram a diferença litológica local, pois ambos se encontram em litologias dos leques aluviais. O PMLAAR01 monitora a água entre 6 a 8 metros de profundidade em siltito cinza alterado, bem como no PMLAAR04, entretanto a entrada de água deste poço situa-se a 5 metros. Já, o filtro no PMLAAR02 encontra-se em uma camada sedimentar formada por seixos rolados, entre 8 e 10 metros de profundidade.

Os valores médios, mínimos, máximos, desvio padrão e número de campanhas de coleta dos parâmetros analisados em campo (pH, CE e Eh) e no laboratório CECOPOMIN encontram-se nas tabelas 3 (PMLAAR01) e 4 (PMLAAR02, PMLAAR02B, PMLAAR03 e PMLAAR04). Dentre os parâmetros de campo a média do pH dos poços situa-se no intervalo de 4,67 a 6,64 valores considerados levemente ácidos a neutro (valores próximos de 7). Segundo Simão et al. (2019), as águas subterrâneas naturais (ausência de contaminação) na RCSC apresentam pH no intervalo de 5,5 a 7,9, ou seja, apenas o PMLAAR01 apresenta concentração média inferior ao background.

Os poços PMLAAR01, PMLAAR02, e o PMLAAR03 mostram médias de condutividade elétrica menores que 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e PMLAAR02B em torno de 455 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e o PMLAAR04 valores muito mais elevados. O Eh começou a ser analisado a partir da 17ª campanha de coleta, apresentando apenas 5 campanhas de coleta para cada poço. Até o momento, o poço PMLAAR01 é o único com todos os valores positivos, enquanto as médias de Eh nos poços PMLAAR02 e PMLAAR02B apresentam valores positivos, os poços PMLAAR03 e PMLAAR04 apresentam médias de Eh com valores negativos.

No geral, o poço de monitoramento que apresentou os maiores teores de boa parte dos parâmetros, tais como, condutividade elétrica, cloreto, sulfato, cálcio, sódio, magnésio, ferro, ferro II, manganês, potássio e cobre, foi PMLAAR04 (Figura 4). PMLAAR01 apresentou valores baixos para quase todos os parâmetros laboratoriais, menos para Eh, Al e K, entretanto apenas a média do potássio está abaixo da média no poço PMLAAR04. Os poços PMLAAR02, PMLAAR02B e PMLAAR03 têm

concentrações maiores de Fe total (médias > 3), Ca e Na em comparação ao PMLAAR01.

Tabela 3 Média, mínimo (min), máximo (max), desvio padrão (dp) e número total de campanhas de campo (c) dos dados coletados no poço PMLAAR01.

Parâmetros	PMLAAR01				
	média	min	Max	dp	c
pH	4,67	3,90	5,83	0,48	18
CE	91,91	71,00	183,50	28,57	18
Eh	217,00	41,80	305,30	103,84	5
Alcal.	1,73	0	5,59	1,56	13
Cl ⁻	7,23	2,18	10,67	2,80	19
SO ₄ ²⁻	11,01	3,70	21,81	5,31	19
Ca	3,36	1,37	5,74	1,05	14
Na	6,44	4,23	10,50	1,81	13
Mg	2,26	0,88	4,74	0,90	14
Fe	1,74	0,16	16,50	3,79	19
Fe ²⁺	1,70	0,50	2,90	1,70	5
Mn	0,17	0	1,88	0,42	19
Al	1,69	0,16	17,40	4,04	19
K	3,26	1,85	14,00	3,14	14
Cu (LQ=0,002)	0,02	0	0,04	0,02	10
Cd (LQ=0,002)	<LQ	<LQ	<LQ	-	10
Pb (LQ=0,005)	<LQ	<LQ	<LQ	-	10
Zn (LQ=0,005)	0,05	0,02	0,18	0,05	10
As (LQ=0,002)	<LQ	<LQ	<LQ	-	10
Hg (LQ=0,0003)	<LQ	<LQ	<LQ	-	10

CE. = condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); Eh = potencial de oxidação (mV); Alcal. = alcalinidade (CaCO_3 mg/l); íons em mg/l; (-) não determinado.

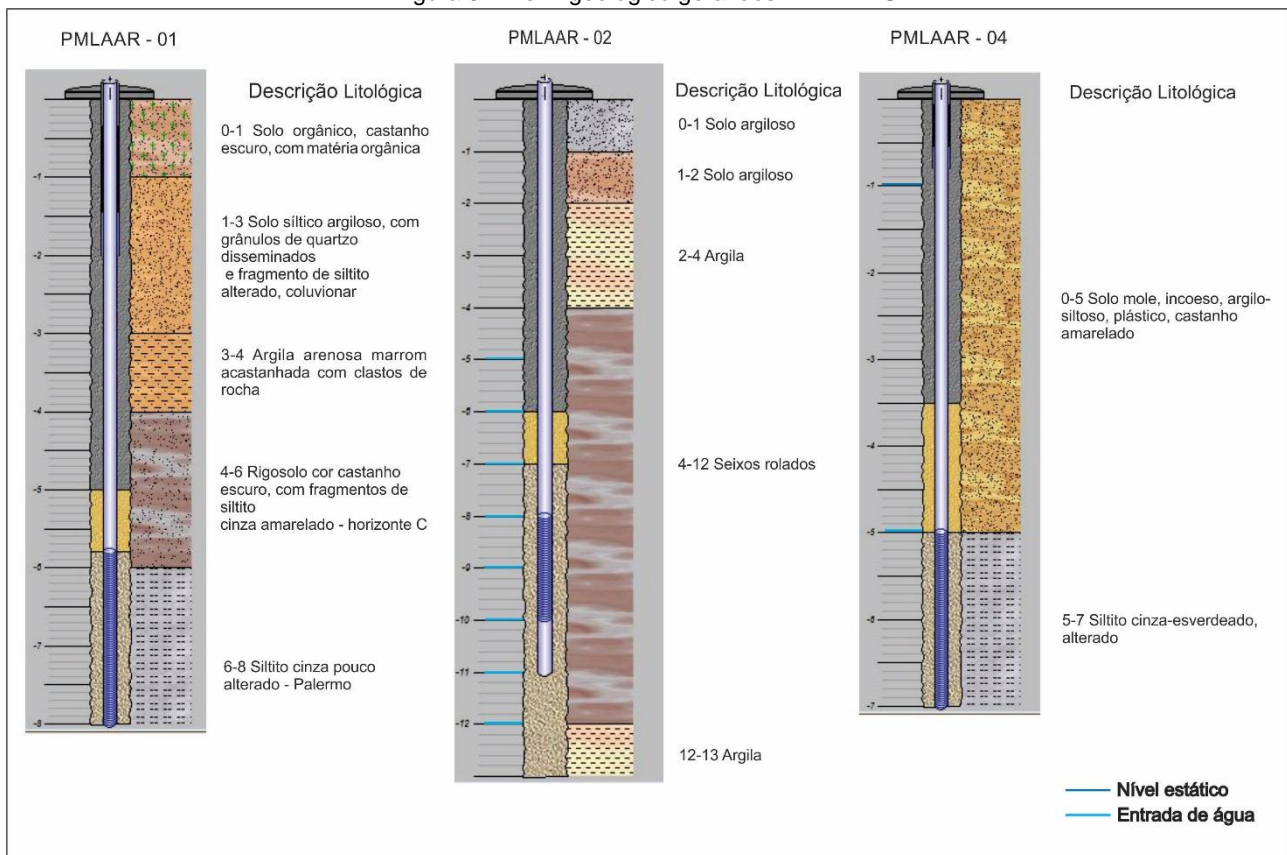
Ressalta-se que os teores de ferro total maiores que 3 mg/L são comuns na região da bacia carbonífera, mesmo em áreas com ausência de mineração de carvão, principalmente, nos leques aluviais, porque são compostos em especial de seixos de basalto da Bacia do Paraná (basalto contém teores de ferro em quantidades elevadas e facilidade para sofrer processos de alteração química e física; BRITO et al., 2006). Também é importante ressaltar que o valor de background para Fe na RCSC em águas subterrâneas é de 2,58 mg/L (SIMÃO et al., 2019). A análise dos parâmetros demonstrou que, nos poços PMLAAR01 e PMLAAR03, não há incidência de contaminação por minas de carvão, pois os teores são reduzidos, principalmente, dos parâmetros Fe, SO₄²⁻, Mn e CE.

Tabela 4 Média, mínimo (min), máximo (max), desvio padrão (dp) e número total de campanhas de campo (c) dos dados coletados no poço PMLAAR02, PMLAAR02B, PMLAAR03 e PMLAAR04.

Parâmetros	PMLAAR02					PMLAAR02B				
	média	min	max	Dp	c	média	min	max	dp	c
pH	5,96	4,49	7,01	0,64	20	6,34	4,96	7,68	0,80	12
CE	232,58	76,00	399,00	73,42	20	455,79	197,00	2308,0	585,75	12
Eh	55,12	-20,3	222,10	86,72	5	31,22	-174,30	270,40	203,08	5
Alcal.	40,15	0	97,50	26,75	16	121,85	62,75	192,71	32,30	11
Cl ⁻	8,36	4,90	13,29	2,14	11	11,31	9,61	12,69	1,57	4
SO ₄ ²⁻	57,63	21,40	106,60	23,65	20	27,55	17,7	46,51	9,08	12
Ca	16,52	7,86	24,70	4,92	18	22,93	14,30	38,60	6,93	12
Na	11,42	5,25	19,40	3,92	16	18,80	11,00	39,20	8,35	10
Mg	9,02	4,76	13,20	2,60	18	10,91	3,10	15,30	3,25	12
Fe	3,52	0,42	12,35	3,46	20	5,51	0,80	11,6	3,19	12
Fe ²	0,1	0,1	0,1	0	5	6,63	5,90	7,80	1,02	5
Mn	0,45	0,04	1,99	0,57	20	0,39	0,08	0,56	0,14	12
Al	0,27	0,02	1,34	0,36	20	0,27	0	0,62	0,32	12
K	1,43	0,61	6,69	1,48	18	2,05	1,05	6,11	1,50	12
Cu (LQ=0,002)	0,05	0	0,09	0,06	11	<LQ	<LQ	<LQ	-	12
Cd (LQ=0,002)	<LQ	<LQ	<LQ	-	11	<LQ	<LQ	<LQ	-	12
Pb (LQ=0,005)	<LQ	<LQ	<LQ	-	11	<LQ	<LQ	<LQ	-	12
Zn (LQ=0,005)	0,03	0,01	0,05	0,02	11	0,21	0,01	0,75	0,24	12
As (LQ=0,002)	<LQ	<LQ	<LQ	-	11	<LQ	<LQ	<LQ	-	12
Hg (LQ=0,0003)	<LQ	<LQ	<LQ	-	11	0	<LQ	0,0008	-	12

Parâmetros	PMLAAR03					PMLAAR04				
	média	min	max	Dp	c	média	min	max	dp	c
pH	6,64	6,05	7,25	0,38	21	5,96	4,69	6,81	0,45	19
CE	234,75	178,00	373,00	55,46	21	1640,70	2,02	2207,00	723,53	19
Eh	-67,20	-115,2	-25,80	43,49	5	-26,77	-113,90	51,55	65,15	5
Alcal.	122,48	99,45	173,54	21,06	14	23,31	0	240,20	64,17	14
Cl ⁻	6,90	4,46	9,10	1,50	8	14,10	9,27	21,77	3,83	8
SO ₄ ²⁻	7,78	0	15,23	5,24	21	1147,21	12,80	1518,78	406,91	19
Ca	21,75	9,50	31,30	5,29	15	255,67	125,00	357,00	52,71	15
Na	10,57	7,97	13,00	1,38	13	60,48	44,50	72,60	8,72	13
Mg	9,72	5,99	13,00	1,65	15	117,65	85,80	136,00	13,17	15
Fe	5,44	3,87	7,78	1,26	21	64,20	3,32	87,40	18,24	19
Fe ²	3,13	2,60	3,60	0,50	5	68,23	66,60	71,00	2,41	5
Mn	0,30	0,10	0,96	0,17	21	4,51	1,87	5,58	0,89	19
Al	0,48	0	0,60	0,23	21	1,28	0	7,04	2,39	19
K	1,45	0,87	6,50	1,40	15	14,12	6,99	69,50	15,41	15
Cu (LQ=0,002)	<LQ	<LQ	<LQ	-	11	0,18	0,00	0,36	0,25	11
Cd (LQ=0,002)	<LQ	<LQ	<LQ	-	11	<LQ	<LQ	<LQ	-	11
Pb (LQ=0,005)	<LQ	<LQ	<LQ	-	11	<LQ	<LQ	<LQ	-	11
Zn (LQ=0,005)	0,02	0,01	0,03	0,01	11	0,03	0,02	0,07	0,02	11
As (LQ=0,002)	<LQ	<LQ	<LQ	-	11	<LQ	<LQ	<LQ	-	11
Hg (LQ=0,0003)	<LQ	<LQ	<LQ	-	11	<LQ	<LQ	<LQ	-	11

 CE. = condutividade elétrica (µS/cm); Eh = potencial de oxi-redução (mV); Alcal. = alcalinidade (CaCO₃ mg/l); ions em mg/l; (-) não determinado.

Figura 3 – Perfil geológico geral dos PMLAARS.


Os poços PMLAAR02 e PMLAAR02B mostram concentrações um pouco mais elevadas desses parâmetros, principalmente pH, sulfato, ferro e mangânes acima dos valores de background (SIMÃO et al., 2019), apresentando indícios de contaminação, provavelmente oriundos da mina verdinho (mineração abandonada pela Carbonífera Criciúma S.A.). O poço PMLAAR04, por sua vez, encontra-se com valores extremos de praticamente todos os parâmetros devido à contaminação por minas de carvão. É importante ressaltar que esse poço se situa no município de Forquilha, dentro das áreas mineiradas que atualmente fazem parte das áreas a serem recuperadas ambientalmente pelas empresas condenadas pela ação civil pública citada anteriormente neste estudo (Figura 1). A tabela 5 contém os valores máximos permitidos na resolução do CONAMA (BRASIL, 2008) para monitoramento ambiental das águas subterrâneas no consumo humano e na irrigação. Comparando os teores dos parâmetros para consumo humano com as médias dos parâmetros por poço, que constam na tabela 5, observou-se Cl⁻, Fe, Mn acima dos valores permitidos, e apenas o sódio encontra-se abaixo dos valores permitidos na CONAMA (BRASIL, 2008) para

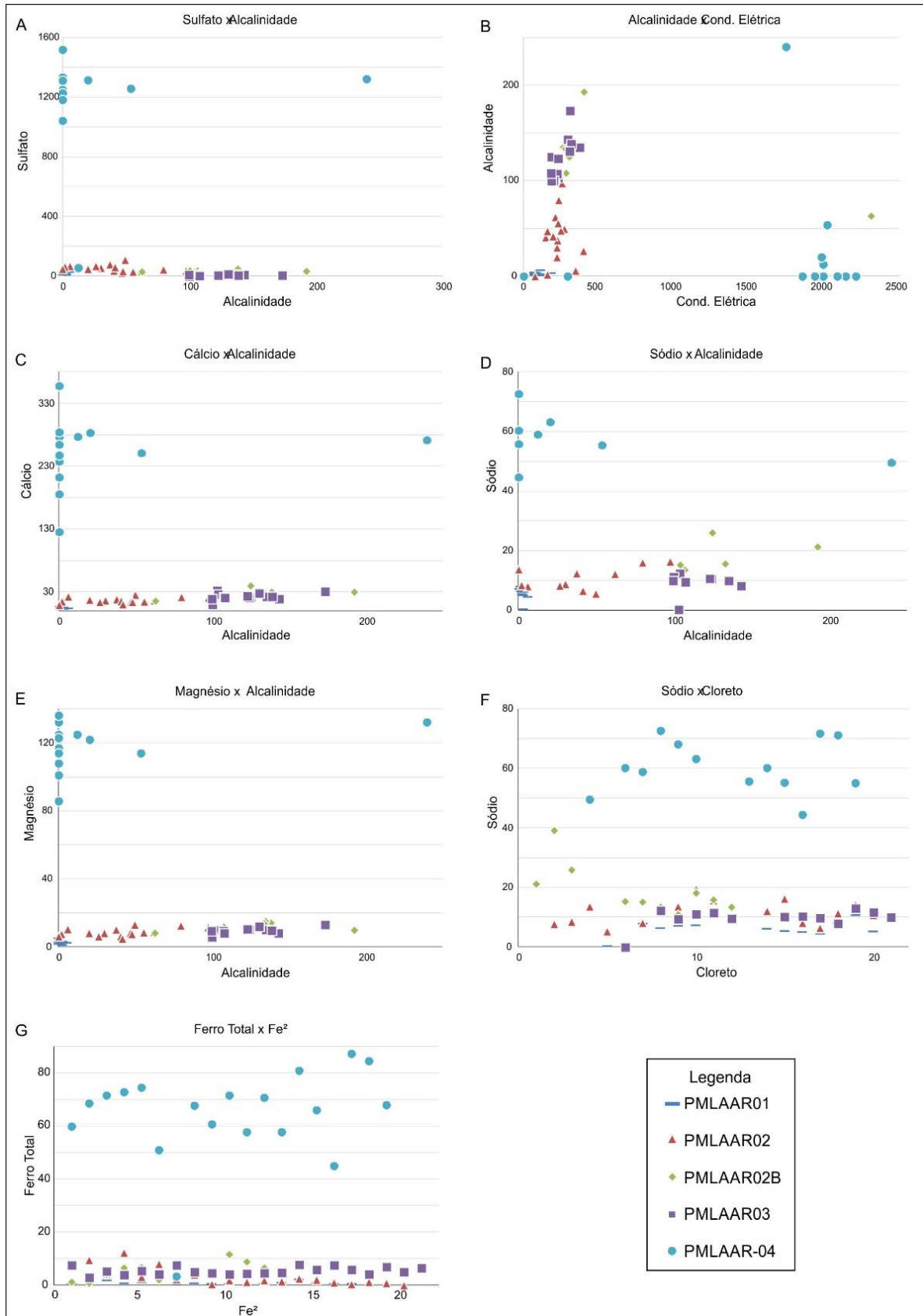
todos os poços. Já o sulfato apresenta teores abaixo do valor permitido apenas no PMLAAR01, pois nos outros poços os teores estão acima de 250 mg/L, e o PMLAAR04 apresenta as concentrações mais elevadas desse parâmetro.

Tabela 5 Lista de Valores Máximos Permitidos (VMP) e limites de quantificação (LQ) da Resolução CONAMA 396-08 para os parâmetros de água subterrânea coletados no monitoramento da RCSC (modificado de BRASIL, 2008).

Parâmetros	Consumo Humano	Irrigação	Limite de quantificação - LQ
Cl ⁻	30,2	100 – 700	2
SO ₄ ²⁻	250	-	5
Na	200	-	1
Fe	0,3	5	0,1
Mn	0,1	0,2	0,025
Al	0,2	5	0,05
Cu	2	0,2	0,05
Cd	0,005	0,01	0,005
Pb	0,01	5	0,01
Zn	5	-	-
As	0,01	-	0,005
Hg	0,001	0,002	0,001

Íons em mg/L.

Figura 4 Diagramas de variação binária dos metais, condutividade elétrica, alcalinidade e sulfato referente aos poços PMLAARs. A Diagrama de Sulfato por Alcalinidade; B Diagrama de Alcalinidade por Condutividade Elétrica; C Diagrama de Cálcio por Alcalinidade; D Sódio por Alcalinidade; E Diagrama de Magnésio por Alcalinidade, F Diagrama de Sódio por Cloreto, G Ferro Total por Fe^{2+} .



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises dos dados permitiram avaliar a contaminação da água subterrânea nos leques aluviais da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, na Região Carbonífera de Santa Catarina. Com isto, demonstra-se a importância das recuperações ambientais na RCSC, bem como a relevância do acompanhamento das obras pelo monitoramento de águas subterrâneas.

Os parâmetros estudados demonstraram que há incidência de contaminação oriunda de passivos ambientais da mineração de carvão na região. Principalmente, na comparação dos dados analisados com o background para Ph, ferro, mangânes e sulfato em águas subterrâneas apresentado por SIMÃO et al. (2019).

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20 ed. Washington: APHA, 937p, 1998.

BELLETTINI, A.S. Avaliação da contaminação proveniente da mineração de carvão nas águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá – SC. 2019a. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

BELLETTINI, A.S.; VIERO, A.P.; NETO, A.C.B. Hydrochemical and contamination evolution of Rio Bonito aquifer in the Carboniferous region, Paraná Basin, Brazil. *Environ Earth Sci* 78, 642, 2019b. In: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8625-1>

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 396, de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. In: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>. Acesso em 29 de novembro de 2018.

BRITO, R.S.C.; WILDNER W.; LICHT, O. A. B.; ARIOLI, E. E. (Coords.). Geologia e recursos minerais do sudoeste do estado do Paraná. Relatório Técnico. CPRM, Porto Alegre, 2006. In: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/10439>

BULL, W. B. Alluvial fans. *Journal of Geological Education*. Chapel Hill, N. C., v. 16. *Bulletin of Volcanology*, Berlim, v. 55, p.119 – 139, 1968.

CARUSO Jr, F. Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Sudeste de Santa Catarina. Brasília: DNPM, 1995. Escala 1:100.000

KREBS, A. S. J. Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do Rio Araranguá, SC. Tese (Doutorado em Geografia: Utilização e Conservação de Recursos Naturais) Florianópolis, UFSC, 2004.

KREBS, A. S. J.; POSSA, M. O papel da hidrogeologia como instrumento de gestão ambiental na mineração de carvão. In: SOARES, Paulo Sérgio; SANTOS, Maria Dionísia C.; POSSA, Mario Valente. (Eds) Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, P. 109 – 127, 2008.

MACHADO, J. L. F. Mapa hidrogeológico do estado de Santa Catarina: relatório. Porto Alegre: CPRM, 2013. Escala 1:500.000. In: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/11594>. Acesso em 15 out. 2018.

MEDEIROS, R. A. Fácies sedimentares: análise e critérios para o reconhecimento de ambientes deposicionais. SCHALLER, H. FRIEDMAN, G. M. (colab.) CAMPOS, C. V. M. (trad.) Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1971. 124p.

NICHOLS, G. *Sedimentology and Stratigraphy*. Second edition. Wiley-Blackwell, London, 419p., 2009.

SCHNEIDER, R. L. et al. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: XXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, SBG, v.1, p. 41-66, 1974.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. Relatório técnico do Convênio com o Ministério do Meio Ambiente, referente aos anos 2008-2018 (Termo de convênio nº 003/2014-SMCQ/MMA (2014-2019); Termos do convênio 2012-2014; 2010-2011; 2009-2010 e 2008-2009). Porto Alegre, 2018.

SIMÃO, G. et al. Estabelecimento de valores de background geoquímico de parâmetros relacionados a contaminação por carvão. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 2, p. 109-118, 2019. In: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i2.29207>

WILDNER, W. et al. Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina. CPRM, Porto Alegre. 2014. Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Subprograma de Cartografia Geológica Regional.