





RTC220103-R2



FUNDAÇÃO
renova



**ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA
DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA**

JANEIRO 2023

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 2/142
	RTC220103		REV. 2



**ANÁLISE DO MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL
PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA
NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021
RTC220103-R2**

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 3/142
	RTC220103		REV. 2

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Amostras de PM10 coletadas em fontes emissoras e em pontos receptores em Barra Longa/MG – Campanha 5 (01/11/2018 a 23/01/2019) e Campanha 6 (18/03/2019 a 13/06/2019).....	21
Figura 3.2 – Amostras de PM10 coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores em Barra Longa/MG – Campanha 7 (05/10/2020 a 17/03/2021).	22
Figura 3.3 – Amostras de PM10 coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores em Barra Longa/MG – Campanha 8 (15/06/2021 a 17/08/2021).	23
Figura 4.1 – Concentrações de PM10 medidas em Barra Longa pelas estações Centro e Volta da Capela e em Gesteira (novembro de 2018 a agosto de 2021). PI-1: Padrão de qualidade do ar intermediário 1 (linha vermelha), Padrão Final de Qualidade do Ar (linha preta) CONAMA 491/2018. A sigla “C” indica Campanha e seu respectivo número.	27
Figura 5.1 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 5 (01/11/2018 a 23/01/2019)	31
Figura 5.2 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 7 (16/03/2021 a 17/03/2021)	32
Figura 5.3 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 8 (06/08/2021 a 09/08/2021)	33
Figura 5.4 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros de nylon – Campanha 6 (18/03/19 a 13/06/19).....	35
Figura 5.5 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros MCE – Campanha 6 (18/03/19 a 13/06/19).....	36
Figura 5.6 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros de nylon – Campanha 7 (05/10/20 a 17/03/21).....	37
Figura 5.7 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros MCE – Campanha 7 (05/10/20 a 17/03/21).....	38
Figura 5.8 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros de nylon – Campanha 8 (15/06/21 a 18/08/21).....	39
Figura 5.9 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros MCE – Campanha 8 (15/06/21 a 18/08/21).....	40
Figura 6.1 – Evolução das concentrações diárias de PM10 e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor estação de monitoramento de qualidade do ar Barra Longa Centro .	56
Figura 6.2 – Evolução das concentrações diárias de PM10 e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor estação de monitoramento de qualidade do ar Barra Longa Volta da Capela.....	58





		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 4/142
	RTC220103		REV. 2

Figura 6.3 – Evolução das concentrações diárias de PM10 e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor estação de monitoramento de qualidade do ar Gesteira.....	60
Figura 6.4 – Concentração de Ferro (Fe) nas amostras de fontes emissoras em Barra Longa ao longo do histórico de todas as campanhas de caracterização química. A área em verde representa o ter de Ferro nas amostras de solo intacto coletadas na região no mesmo período.....	62
Figura A.1 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 6 (Centro).....	134
Figura A.2 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 6 (Volta da Capela)	135
Figura A.3 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 6 (Gesteira)	136
Figura A.4 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 7 (Centro).....	137
Figura A.5 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 7 (Volta da Capela)	138
Figura A.6 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 7 (Gesteira)	139
Figura A.7. Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 8 (Centro).....	140
Figura A.8 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 8 (Volta da Capela)	141
Figura A.9 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 8 (Gesteira)	142

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 5/142	
	RTC220103	REV. 2	

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Amostras de PM10 coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores definidos pelas estações Centro, Volta da Capela e Gesteira em Barra Longa/MG.	18
Tabela 4.1 – Padrões de Qualidade do Ar - Resolução CONAMA nº 491/2018	26
Tabela 5.1 – Concentrações em ordem decrescente dos elementos ferro, silício e alumínio nas amostras de fontes emissoras coletadas durante as Campanhas 5, 7 e 8 localizadas em Barra Longa/MG e Gesteira/MG.	30
Tabela 6.1 – Composição química e incerteza do perfil médio das amostras de PM10 em fontes emissoras em Barra Longa durante a campanha 5.	46
Tabela 6.2 – Composição química e incerteza do perfil médio das amostras de PM10 em fontes emissoras em Barra Longa durante as campanhas 7 e 8.	48
Tabela 6.3 – Composição química e incerteza do perfil médio das amostras de PM10 em fontes emissoras em Gesteira durante as campanhas 5, 7 e 8.	50
Tabela 6.4 – Composição química média e incerteza entre as amostras de PM10 no ponto receptor avaliado na modelagem CMB – Campanhas 6,7 e 8 – Barra Longa.....	52
Tabela 6.5 – Composição química média e incerteza entre as amostras de PM10 no ponto receptor avaliado na modelagem CMB – Campanhas 6,7 e 8 - Gesteira	53
Tabela 6.6 – Contribuição das fontes emissoras na concentração de PM10 dos pontos receptores analisados durante as campanhas 6, 7 e 8 – Resultados da Modelagem CMB	54
Tabela 7.1 – Concentração de alumínio na Estação de Barra Longa Centro	66
Tabela 7.2 – Concentração de alumínio na Estação de Barra Longa Volta da Capela	66
Tabela 7.3 – Concentração de alumínio na Estação de Gesteira.....	66
Tabela 7.4 – Concentração de arsênio na Estação de Barra Longa Centro	68
Tabela 7.5 – Concentração de arsênio na Estação de Barra Longa Volta da Capela	68
Tabela 7.6 – Concentração de arsênio na Estação de Gesteira.....	69
Tabela 7.7 – Concentração de chumbo na estação Barra Longa Centro	74
Tabela 7.8 - Concentração de cobre na Estação de Barra Longa Centro	77
Tabela 7.9 - Concentração de cobre na Estação de Barra Longa Volta da Capela	77
Tabela 7.10 - Concentração de cobre na Estação de Gesteira.....	77
Tabela 7.11 - Concentração de ferro na Estação de Barra Longa Centro	80
Tabela 7.12 - Concentração de ferro na Estação de Barra Longa Volta da Capela.....	80
Tabela 7.13 - Concentração de ferro na Estação de Gesteira.....	80
Tabela 7.14 - Concentração de manganês na Estação de Barra Longa Centro	82
Tabela 7.15 - Concentração de manganês na Estação de Barra Longa Volta da Capela	82





		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 6/142
		RTC220103	REV. 2

Tabela 7.16 - Concentração de manganês na Estação de Gesteira.....	83
Tabela 7.17 - Concentração de Níquel na Estação de Barra Longa Centro	86
Tabela 7.18 - Concentração de Níquel na Estação de Barra Longa Volta da Capela	87
Tabela 7.19 - Concentração de Níquel na Estação de Gesteira.....	87
Tabela 7.20 - Concentração de silício na Estação de Barra Longa Centro	88
Tabela 7.21 - Concentração de silício na Estação de Barra Longa Volta da Capela.....	88
Tabela 7.22 - Concentração de silício na Estação de Gesteira	89
Tabela 7.23 - Concentração de zinco na Estação de Barra Longa Centro	91
Tabela 7.24 - Concentração de zinco na Estação de Barra Longa Volta da Capela.....	91
Tabela 7.25 - Concentração de zinco na Estação de Gesteira	91
Tabela A.1 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em fontes emissoras – Campanha 5 (01/11/2018 a 23/01/2019)	111
Tabela A.2 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em fontes emissoras – Campanha 7 (16/03/2021 a 17/03/2021)	116
Tabela A.3 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em fontes emissoras – Campanha 8 (06/08/2021 a 09/08/2021)	121
Tabela A.4 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de nylon	126
Tabela A.5 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de MCE	129



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 7/142
		RTC220103	REV. 2

LISTA DE SIGLAS E/OU SÍMBOLOS


ADME	Área de Disposição de Material Excedente
Ag	Prata
Al	Alumínio
Ar	Árgon
As	Arsênio
Au	Ouro
B	Boro
Ba	Bário
Bi	Bismuto
Br	Bromo
C	Carbono
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
Ce	Cério
Cl	Cloro
CMB	<i>Chemical Mass Balance</i>
Co	Cobalto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Crômio
Cs	Césio
Cu	Cobre
Dy	Disprósio
ECD	Diâmetro Circular Equivalente
EDX	Espectroscopia por Energia Dispersiva do Raio X
Er	Érbio
ES	Espírito Santo
Eu	Európio
F	Flúor
Fe	Ferro
Ga	Gálio
Gd	Gadolínio
Ge	Germânio
Hf	Háfnio
Hg	Mercúrio
Ho	Hólmio
I	Iodo
In	Índio
Ir	Írídio
K	Potássio
La	Lantânio
Lu	Lutécio

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 8/142
		RTC220103	REV. 2

MeV	Mega elétrons-volt
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
Mg	Magnésio
MG	Minas Gerais
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
Na	Sódio
Nb	Nióbio
Nd	Neodímio
Ni	Níquel
O	Oxigênio
Os	Ósmio
P	Fósforo
Pb	Chumbo
Pd	Paládio
PIXE	<i>Proton Induced X-Ray Emission</i>
Pm	Promécio
PM _{2.5}	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm
PM ₁₀	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 10 µm
ppb	Partes por bilhão
ppm	Partes por milhão
Pr	Praseodímio
Pt	Platina
PTS	Partículas Totais em Suspensão
Rb	Rubídio
Re	Rênio
Rh	Ródio
Ru	Rutênio
S	Enxofre
Sb	Antimônio
Sc	Escândio
Se	Selênio
Si	Silício
Sm	Samário
Sn	Estanho
Sr	Estrôncio
Ta	Tântalo
Tb	Térbio
Tc	Tecnécio
Te	Telúrio
Th	Tório
Ti	Titânio



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 9/142
		RTC220103	REV. 2

Tl	Tálio
Tm	Túlio
U	Urânio
UHE	Usina Hidrelétrica
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
V	Vanádio
W	Tungstênio
Y	Ítrio
Yb	Itérbio
Zn	Zinco
Zr	Zircônio
<	Menor que
>	Maior que
%	Por cento
µm	Micrômetro
L/min	Litro por minuto

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 10/142
		RTC220103	REV. 2

SUMÁRIO

SUMÁRIO EXECUTIVO.....	11
1. Introdução.....	12
2. Objetivos	15
3. Metodologia.....	16
3.1. Coleta e preparação de amostras.....	16
3.1.1. Amostras em fontes emissoras.....	16
3.1.2. Amostras em pontos receptores	17
3.2. Análises químicas	24
3.2.1. Métodos analíticos	24
3.2.2. Análises de dados.....	24
4. Caracterização da localidade analisada	24
5. Análises químicas pelo método PIXE.....	28
6. Modelagem CMB.....	41
6.1. Descrição do modelo CMB	41
6.2. Análise do modelo CMB	45
6.3. Considerações sobre o modelo CMB	61
7. Potenciais efeitos para a saúde.....	63
7.1. Alumínio.....	64
7.2. Arsênio	67
7.3. Cádmio	69
7.4. Chumbo.....	72
7.5. Cobre	75
7.6. Ferro.....	78
7.7. Manganês	81
7.8. Níquel	83
7.9. Silício	88
7.10. Zinco.....	89
8. Conclusão	92
9. Equipe Técnica	94
10. Referências Bibliográficas	95
APÊNDICE A – Resultados das Análises Químicas de PM₁₀ – Método PIXE	111
A.1. Resultados do Método PIXE – Amostras em Fontes Emissoras	111
A.2. Resultados do Método PIXE – Amostras em Pontos Receptores.....	126
ANEXO A – Arquivos de Saída do Modelo CMB	132

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 11/142
	RTC220103		REV. 2

SUMÁRIO EXECUTIVO



O rompimento da Barragem de Fundão, pertencente ao Complexo Germano da Samarco Mineradora S.A., em Mariana (MG), no dia 05 de novembro de 2015, foi responsável pela liberação de um grande volume de rejeito, proveniente do beneficiamento de minério de ferro. Desde o evento, diversas ações vêm sendo realizadas para auxiliar no entendimento dos possíveis impactos causados na qualidade do ar a que população da área diretamente afetada está exposta.

De acordo com as ações previstas no Plano de Monitoramento da Qualidade do Ar e Emissões Atmosféricas, o presente trabalho faz uma avaliação dos resultados relacionados às análises químicas que são realizadas em amostras de partículas inaláveis, material particulado menor que 10 µm (PM₁₀). Para isso, buscou-se caracterizar quimicamente essas partículas para subsidiar a aplicação de modelo receptor de balanço químico de massa, onde pretende-se estabelecer a contribuição de uma determinada fonte emissora em um determinado receptor (qualidade do ar), bem como avaliar os potenciais efeitos que os elementos químicos presentes na poeira podem causar na saúde da população da região.

Diversas amostragens ao longo do período de estudo, novembro de 2018 a agosto de 2021, foram realizadas para caracterizar quimicamente as fontes emissoras da região (vias de tráfego, rejeito, solo intacto e obra) e a qualidade do ar nos receptores (Estações Barra Longa, Volta da Capela e Gesteira), totalizando 41 amostras que foram analisadas em laboratório por meio do método PIXE (*Proton Induced X-Ray Emission*).

Através das análises PIXE, utilizou-se o modelo CMB (*Chemical Mass Balance*) para tentar estabelecer qual o grau de contribuição das fontes emissoras da região (vias de tráfego, rejeito, solo intacto e obra) nos receptores (Estações Barra Longa Centro, Volta da Capela e Gesteira).

Com as análises PIXE nos receptores, também foi possível comparar as amostras dessas fontes emissoras e receptores entre si, para observar se há diferentes padrões característicos para cada tipo de amostra. Por fim, as concentrações dos diversos elementos químicos presentes na poeira foram comparadas com limites de referência e discutidas sob a perspectiva dos potenciais efeitos na saúde do ser humano, de modo a compreender se há potencial risco para a saúde da população da região de Barra Longa (MG).

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 12/142
	RTC220103		REV. 2

1. Introdução

O rompimento da Barragem de Fundão (EVENTO), localizada no Complexo Germano da Samarco Mineração S.A., município de Mariana (MG), em 05 de novembro de 2015, provocou o carreamento de um volume estimado de 43,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos e água, correspondendo a aproximadamente 77% do volume total de materiais contidos na barragem (CH2M, 2017).



O material liberado durante o EVENTO percorreu o Rio Gualaxo do Norte e, desaguou no Rio Doce, atingindo as áreas situadas nas proximidades do rio até sua foz, do município de Mariana (MG) ao de Linhares (ES). Entretanto, cerca de metade desse material - aproximadamente 20 milhões de metros cúbicos - depositou-se ao longo do trajeto até a Usina Hidrelétrica (UHE) Risoleta Neves (Candonga), localizada entre os limites das cidades de Rio Doce (MG) e Santa Cruz do Escalvado (MG) (Fundação Renova, 2019). Neste trajeto percorrido, a cidade de Barra Longa (MG) teve sua área urbana como uma das mais afetadas pelo EVENTO. Além disso, o distrito de Gesteira, localizado a montante do Centro de Barra Longa, foi outra área afetada.

Diversas ações foram e vêm sendo realizadas pela Fundação Renova (FUNDAÇÃO), tais como: remoção de rejeito¹ e sedimento² de locais atingidos (ruas, praças e rios); reconstrução de pontes, vias, praças, casas; reconfirmação das margens dos rios; obras de controle de erosão e uso de bioengenharia nas margens dos rios e afluentes atingidos; dragagem do reservatório da UHE Risoleta Neves, dentre outras.

Tais ações, quando executadas, têm o potencial de emissão de poluentes atmosféricos, e além disto, os próprios sedimentos depositados nas margens, encostas e planícies de inundação, tornam-se áreas expostas suscetíveis à ação do vento, podendo emitir material particulado para a atmosfera. Conforme os inventários de emissões atmosféricas elaborados para a região, as principais fontes emissoras de poluentes estão relacionadas à movimentação de materiais e manejo de sedimento, áreas expostas suscetíveis à erosão eólica, pilhas de

¹ Fração estéril produzida pelo beneficiamento do minério depositada na Barragem de Fundão. O termo rejeito será utilizado para o material depositado nos diques.

² Mistura de rejeitos que, durante o trajeto, incorporou sedimentos, solos e vegetação, presentes nas calhas, encostas e planícies aluvionares.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 13/142
	RTC220103		REV. 2



materiais, operações no solo (escavação, terraplanagem, etc.), ressuspensão de partículas nas vias de tráfego, escapamento de veículos, máquinas e equipamentos.

Em virtude desse potencial de emissões atmosféricas, em fevereiro de 2016, a FUNDAÇÃO iniciou o seu plano de monitoramento da qualidade do ar com a instalação de uma estação automática no Centro de Barra Longa (MG). Posteriormente, em agosto de 2017, as ações de monitoramento da qualidade do ar em Barra Longa (MG) foram intensificadas com a instalação de uma segunda estação automática de qualidade do ar em Volta da Capela. De forma semelhante ao realizado em Barra Longa, Gesteira também foi contemplada com uma estação automática de qualidade do ar que está em operação desde maio de 2018. Todos os equipamentos de monitoramento das estações utilizam método de referência (atenuação de raio beta) e permitem o acompanhamento ininterrupto das condições de qualidade do ar em Barra Longa (MG) e Gesteira (MG) de forma adequada.

Contudo, além do potencial de emissão de material particulado (PM), e de seus potenciais impactos na qualidade do ar, outras questões relevantes estão relacionadas à composição química das partículas que integram o material particulado, originado nas ações de recuperação promovidas pela FUNDAÇÃO.

Portanto, neste relatório são apresentados os resultados relacionados às análises químicas realizadas para o melhor entendimento sobre a fração de partículas inaláveis, o material particulado menor que 10 μm (PM₁₀). As ações desenvolvidas e apresentadas no âmbito deste estudo estão previstas no *Plano de monitoramento da qualidade do ar e controle de emissões atmosféricas* (ECOSOFT, 2019).



As análises químicas foram realizadas em amostras de PM₁₀ coletadas em pontos receptores (amostras da qualidade do ar) e em materiais presentes nas fontes emissoras de material particulado, na região de Barra Longa (MG) e Gesteira (MG). Como receptores foram caracterizadas as estações de qualidade do ar de Barra Longa (Centro e Volta da Capela) e de Gesteira e, para representação das fontes emissoras, foram coletadas amostras de rejeito e solo natural não-afetado, bem como partículas depositadas nas superfícies das vias de tráfego (pavimentadas e não-pavimentadas) e partículas das áreas em obras. Para as análises químicas dos constituintes do PM₁₀, foi utilizada a técnica analítica: *Proton Induced X-Ray Emission* (PIXE).

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 14/142
	RTC220103		REV. 2

O conhecimento sobre a composição química do PM_{10} possibilita avanços nas discussões acerca da atribuição de responsabilidades quanto à origem do PM_{10} que chega até os receptores de Barra Longa (MG) e Gesteira (MG) (*source apportionment*). Neste estudo, as análises de composição química de fontes emissoras e receptores, realizadas por PIXE, foram utilizadas para a definição dos perfis de especiação utilizados no modelo receptor *Chemical Mass Balance* (CMB), aplicado para o cálculo da contribuição das diferentes fontes para as concentrações de PM_{10} medidas nas estações de qualidade do ar.

Ressalta-se que os resultados apresentados devem ser analisados considerando as limitações impostas pelos métodos utilizados. As principais fontes emissoras de PM_{10} relacionadas às ações da FUNDAÇÃO são difusas e podem ter suas características alteradas dinamicamente. O modelo CMB, utilizado para a análise de contribuição das fontes emissoras, é dependente da inclusão dos perfis de especiação química dessas fontes, portanto, fontes emissoras que não tenham sido caracterizadas quimicamente não serão contabilizadas para efeitos de contribuição. Ao mesmo tempo, fontes emissoras com perfis químicos muito similares (colineares) não são passíveis de distinção pelo método aplicado no modelo receptor.

Mesmo com as limitações inerentes à aplicação das técnicas analíticas e de modelagem, os resultados deste estudo podem ser úteis para a FUNDAÇÃO nas ações de controle e monitoramento das emissões de material particulado e, simultaneamente contribuir para avanços sobre os potenciais riscos à saúde decorrentes da exposição ao PM_{10} em Barra Longa (MG) e Gesteira (MG).


		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 15/142
	RTC220103		REV. 2

2. Objetivos

O principal objetivo deste estudo é a contextualização sobre as análises químicas no âmbito de ampliação do conhecimento e gestão da qualidade do ar das áreas afetadas pelo rompimento da Barragem de Fundão (EVENTO).

São objetivos específicos:

- (i) caracterizar quimicamente as partículas (PM_{10}) provenientes de fontes emissoras e coletadas em receptores de qualidade do ar (estações de monitoramento) existentes nas áreas afetadas pelo EVENTO;
- (ii) estabelecer, por meio de balanço químico de massa (CMB), a contribuição das fontes emissoras caracterizadas na qualidade do ar das áreas afetadas;
- (iii) discutir, à luz das características químicas e das concentrações de partículas nos receptores, o grau de risco à saúde da população.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 16/142
	RTC220103		REV. 2

3. Metodologia

3.1. Coleta e preparação de amostras

3.1.1. Amostras em fontes emissoras

As amostras de PM₁₀ contidas em fontes emissoras foram coletadas diretamente nas fontes mediante amostras compostas (Tabela 3.1 e Figura 3.1).



Os materiais amostrados podem ser resumidos de forma geral em:

- Rejeito, coletado diretamente na Barragem de Fundão;
- Solo natural (*baseline*), não afetado pelos sedimentos provenientes da Barragem de Fundão;
- Partículas contidas na superfície de vias pavimentadas;
- Partículas contidas na superfície de vias não pavimentadas;
- Partículas coletadas nas áreas contendo obras da FUNDAÇÃO.

Cada amostra composta foi constituída pela reunião de várias amostras simples (sub-amostras) coletadas aleatoriamente dentro de área ou gleba uniforme, que são misturadas para representá-la melhor. Em geral, sempre foram coletadas pelo menos 10 (dez) amostras simples para composição de uma amostra composta. Os pontos de coleta das sub-amostras foram distribuídos aleatoriamente em uma pequena área tendo como referência o ponto da amostra simples original. Em todos os locais os materiais foram coletados superficialmente, representando as frações potencialmente erodíveis pela ação do vento.

Após a obtenção das amostras compostas em campo, os materiais passaram por processos físicos de peneiramento em laboratório na sede da EcoSoft para a separação das partículas grosseiras. A preparação final das amostras para as análises PIXE foi realizada de forma que as amostras de material sólido em pó foram preservadas em frascos de material plástico.

Para as fontes emissoras, foram utilizadas 3 campanhas (5, 7 e 8), nas quais o trabalho de coleta e obtenção de amostras foi subdividido. No período da campanha 6 não houve amostragem de fontes nas localidades de Barra Longa (MG) e Gesteira (MG), contudo, optou-se por utilizar as amostras de fontes referentes à campanha 5 em detrimento desta ausência. As campanhas de fontes foram realizadas nas seguintes datas: a Campanha 5 foi realizada no período de dia 01/11/2018 a 23/01/2019, ao passo que a campanha 7 teve início em 16/03/2021 e término em 17/03/2021 e, por fim, a Campanha 8 iniciou no dia 06/08/2021 e finalizou no dia

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 17/142
	RTC220103		REV. 2

09/08/2021. Ao todo, foram coletadas 23 amostras de fontes, sendo 9 referentes à campanha 5, 7 amostras foram coletadas durante a campanha 7 e 7 amostras foram coletadas na campanha 8. As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam as localidades onde foram coletadas as amostras durante as referidas campanhas.

3.1.2. Amostras em pontos receptores

As amostras em pontos receptores foram coletadas nas estações de qualidade do ar localizadas em Barra Longa (Centro e Volta da Capela) e Gesteira (MG) (Tabela 3.1 e Figura 3.1). Em função da técnica analítica PIXE, as amostras de PM₁₀ foram coletadas com auxílio de um monitor automático de concentrações de partículas, modelo *E-Sampler Met One* com ciclone separador de PM₁₀, com vazão de 2 L/min. As amostras foram coletadas em duplicata em filtros especiais de 47 mm de ésteres mistos de celulose (MCE) e nylon. O analisador E-Sampler foi mantido em operação na estação de qualidade do ar em Paracatu em tempo suficiente (geralmente mais de 30 dias) para obtenção da massa de PM₁₀ viável para análise PIXE. A massa de material particulado nos filtros foi determinada por método gravimétrico. A concentração de cada elemento químico nos receptores foi determinada pela diferença entre a concentração do elemento no filtro amostrado e a concentração do elemento no filtro limpo (branco).

$$C_i = C_{ai} - C_{bi}$$

Onde:

C_i : Concentração do elemento i no receptor avaliado.

C_{ai} : Concentração do elemento i medida no filtro amostrado no receptor avaliado.

C_{bi} : Concentração do elemento i medida em um filtro limpo (amostra de branco).

Para os pontos receptores, foram coletadas 7 amostras na campanha 6 (18/03/19 a 13/06/19), 6 amostras na campanha 7 (05/10/20 a 17/03/21) e 5 amostras na campanha 8 (15/06/21 a 18/08/21), totalizando 18 amostras de receptores. A Tabela 3.1 expõe maiores informações sobre cada campanha, apresentando a quantidade de amostras e seus respectivos locais e datas de coleta. As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam as localidades onde foram coletadas as amostras durante as referidas campanhas.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 18/142
		RTC220103	REV. 2

Tabela 3.1 – Amostras de PM₁₀ coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores definidos pelas estações Centro, Volta da Capela e Gesteira em Barra Longa/MG.

CAMP.	CÓDIGO DA AMOSTRA	DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	LOCAL	COORDENADAS (LATº; LONº)	TIPO	CATEGORIA	DATA	ANÁLISE
5	1	Via Pavimentada – Estação Centro	Barra Longa	-20,282525; -43,040299	Sólido em pó	Fonte	01/11/2018	PIXE
5	2	Via Pavimentada – Estação Volta da Capela	Barra Longa	-20,287636; -43,054246	Sólido em pó	Fonte	01/11/2018	PIXE
5	3	Via Não Pavimentada – Margem Esquerda	Barra Longa	-20,280987; -43,042462	Sólido em pó	Fonte	01/11/2018	PIXE
5	4	Via Não Pavimentada – Parque de Exposições	Barra Longa	-20,287273; -43,054856	Sólido em pó	Fonte	01/11/2018	PIXE
5	5	Via Não Pavimentada - Estação Gesteira	Gesteira	-20,258348; -43,124701	Sólido em pó	Fonte	15/11/2018	PIXE
5	8	Solo Intacto - Centro	Barra Longa	-20,28795; -43,03946	Sólido em pó	Fonte	23/01/2019	PIXE
5	9	Solo Intacto – Próximo à ADME ^(a)	Barra Longa	-20,28957; -43,06948	Sólido em pó	Fonte	23/01/2019	PIXE
5	11	Rejeito – Bacia de Fundão (P1)	Barra Longa	-20,208889; -43,461888	Sólido em pó	Fonte	14/11/2018	PIXE
5	12	Rejeito – Bacia de Fundão (P2)	Barra Longa	-20,209709; -43,463026	Sólido em pó	Fonte	14/11/2018	PIXE
6	N26	Estação Volta da Capela	Barra Longa	-20,287768; -43,054921	Filtro de nylon	Receptor	18/03/2019 a 13/06/2019	PIXE
6	C26	Estação Volta da Capela	Barra Longa	-20,287768; -43,054921	Filtro de MCE	Receptor	18/03/2019 a 13/06/2019	PIXE
6	N27	Estação Centro	Barra Longa	-20,282574; -43,040349	Filtro de nylon	Receptor	18/03/2019 a 13/06/2019	PIXE
6	C27	Estação Centro	Barra Longa	-20,282574; -43,040349	Filtro de MCE	Receptor	18/03/2019 a 13/06/2019	PIXE
6	N28	Estação Gesteira	Gesteira	-20,257106; -43,124064	Filtro de nylon	Receptor	18/03/2019 a 13/06/2019	PIXE
6	C28	Estação Gesteira	Gesteira	-20,257106; -43,124064	Filtro de MCE	Receptor	18/03/2019 a 13/06/2019	PIXE
7	N31	Estação Centro	Barra Longa	-20,282574; -43,040349	Filtro de nylon	Receptor	05/10/2020 a 16/03/2021	PIXE
7	C31	Estação Centro	Barra Longa	-20,282574; -43,040349	Filtro de MCE	Receptor	05/10/2020 a 16/03/2021	PIXE

Continuação



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO
EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A
AGOSTO DE 2021

Nº 1

PÁGINA
19/142

RTC220103

REV.
2

CAMP.	CÓDIGO DA AMOSTRA	DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	LOCAL	COORDENADAS (LAT; LONº)	TIPO	CATEGORIA	DATA	ANÁLISE
7	N32	Estação Volta da Capela	Barra Longa	-20,287768; -43,054921	Filtro de nylon	Receptor	05/10/2020 a 16/03/2021	PIXE
7	C32	Estação Volta da Capela	Barra Longa	-20,287768; -43,054921	Filtro de MCE	Receptor	05/10/2020 a 16/03/2021	PIXE
7	N33	Estação Gesteira	Gesteira	-20,257106; -43,124064	Filtro de nylon	Receptor	13/10/2020 a 17/03/2021	PIXE
7	C33	Estação Gesteira	Gesteira	-20,257106; -43,124064	Filtro de MCE	Receptor	13/10/2020 a 17/03/2021	PIXE
7	4	Via não pavimentada - Gesteira	Gesteira	-20,258383; -43,124790	Sólido em pó	Fonte	17/03/2021	PIXE
7	5	Solo Intacto - Gesteira	Gesteira	-20,256021; -43,123414	Sólido em pó	Fonte	17/03/2021	PIXE
7	6	Via pavimentada - Estação Gesteira	Gesteira	-20,257398; -43,124504	Sólido em pó	Fonte	17/03/2021	PIXE
7	7	Via Pavimentada - Estação Centro	Barra Longa	-20,282500; -43,040406	Sólido em pó	Fonte	17/03/2021	PIXE
7	8	Via Pavimentada - Estação V. da Capela	Barra Longa	-20,287829; -43,054967	Sólido em pó	Fonte	16/03/2021	PIXE
7	9	Obra Parque Exposições	Barra Longa	-20,286966; -43,054669	Sólido em pó	Fonte	16/03/2021	PIXE
7	10	Via Não Pavimentada - Margem Esquerda	Barra Longa	-20,285283; -43,051420	Sólido em pó	Fonte	16/03/2021	PIXE
8	N39	Estação Volta da Capela	Barra Longa	-20,287768; -43,054921	Filtro de nylon	Receptor	15/06/2021 a 09/08/2021	PIXE
8	C39	Estação Volta da Capela	Barra Longa	-20,287768; -43,054921	Filtro de MCE	Receptor	15/06/2021 a 09/08/2021	PIXE
8	C43	Estação Centro	Barra Longa	-20,282574; -43,040349	Filtro de nylon	Receptor	15/06/2021 a 09/08/2021	PIXE
8	N43	Estação Centro	Barra Longa	-20,282574; -43,040349	Filtro de MCE	Receptor	15/06/2021 a 09/08/2021	PIXE
8	C44	Estação Gesteira	Gesteira	-20,257106; -43,124064	Filtro de MCE	Receptor	01/07/2021 a 17/08/2021	PIXE

Conclusão



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO
EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A
AGOSTO DE 2021

Nº 1

PÁGINA
20/142

RTC220103

REV.
2

CAMP.	CÓDIGO DA AMOSTRA	DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	LOCAL	COORDENADAS (LAT°; LON°)	TIPO	CATEGORIA	DATA	ANÁLISE
8	4	Via não pavimentada - Gesteira	Gesteira	-20,258383; -43,124790	Sólido em pó	Fonte	06/08/2021	PIXE
8	5	Solo Intacto - Gesteira	Gesteira	-20,256021; -43,123414	Sólido em pó	Fonte	06/08/2021	PIXE
8	6	Via pavimentada - Estação Gesteira	Gesteira	-20,257398; -43,124504	Sólido em pó	Fonte	06/08/2021	PIXE
8	7	Via Pavimentada - Estação Centro	Barra Longa	-20,282500; -43,040406	Sólido em pó	Fonte	09/08/2021	PIXE
8	8	Via Pavimentada - Estação V. da Capela	Barra Longa	-20,287829; -43,054967	Sólido em pó	Fonte	09/08/2021	PIXE
8	9	Obra Parque Exposições	Barra Longa	-20,286966; -43,054669	Sólido em pó	Fonte	09/08/2021	PIXE
8	10	Via Não Pavimentada - Margem Esquerda	Barra Longa	-20,285283; -43,051420	Sólido em pó	Fonte	09/08/2021	PIXE

Nota:

^(a) ADME – Área de Disposição de Material Excedente



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO
EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A
AGOSTO DE 2021

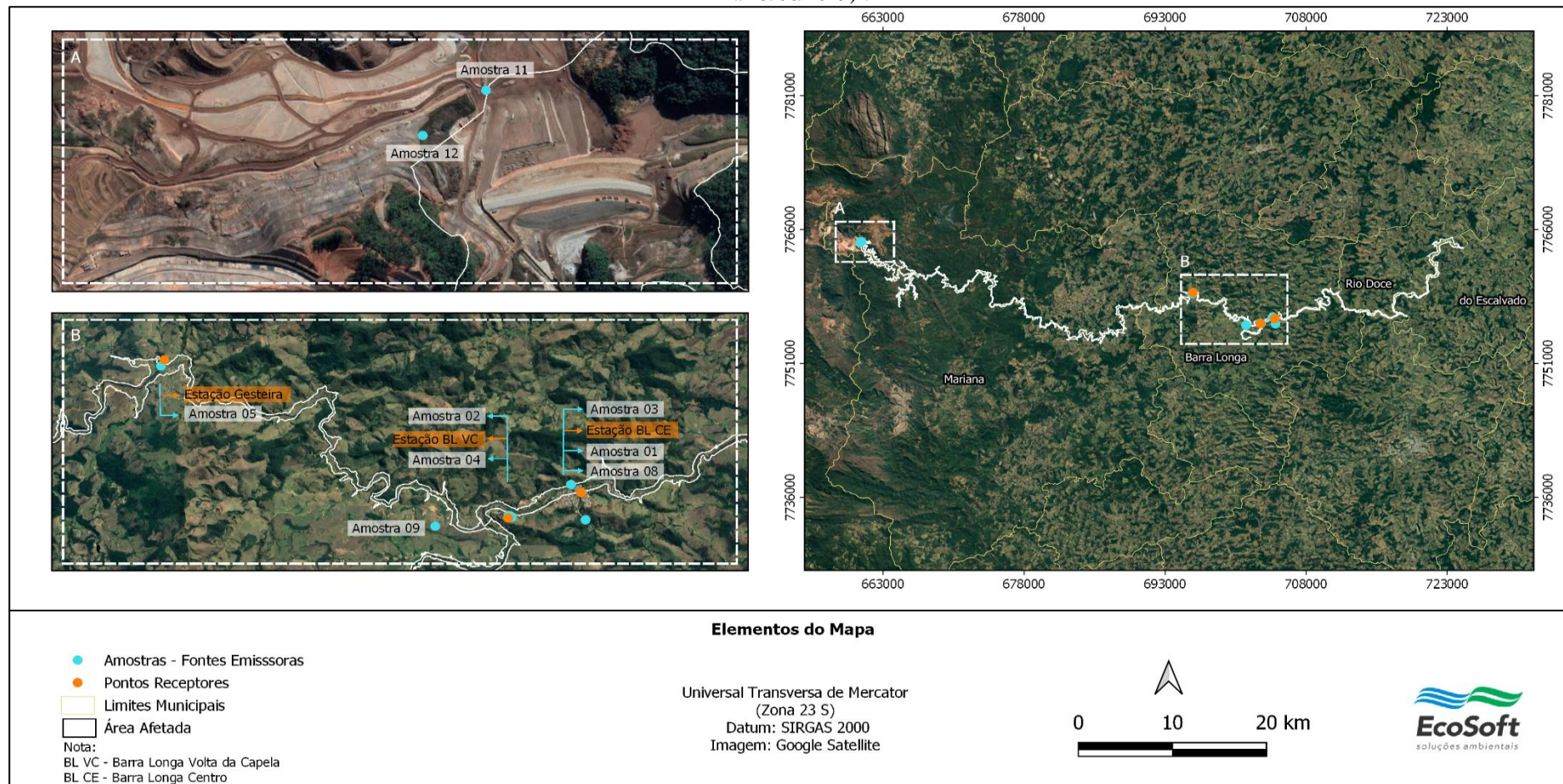
Nº 1

PÁGINA
21/142

RTC220103

REV.
2

Figura 3.1 – Amostras de PM₁₀ coletadas em fontes emissoras e em pontos receptores em Barra Longa/MG – Campanha 5 (01/11/2018 a 23/01/2019) e Campanha 6 (18/03/2019 a 13/06/2019)³.



³ Nota: Os períodos totais de cada campanha são considerados sendo da menor data de coleta das fontes/receptores à maior data de coleta das fontes/receptores



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO
EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A
AGOSTO DE 2021

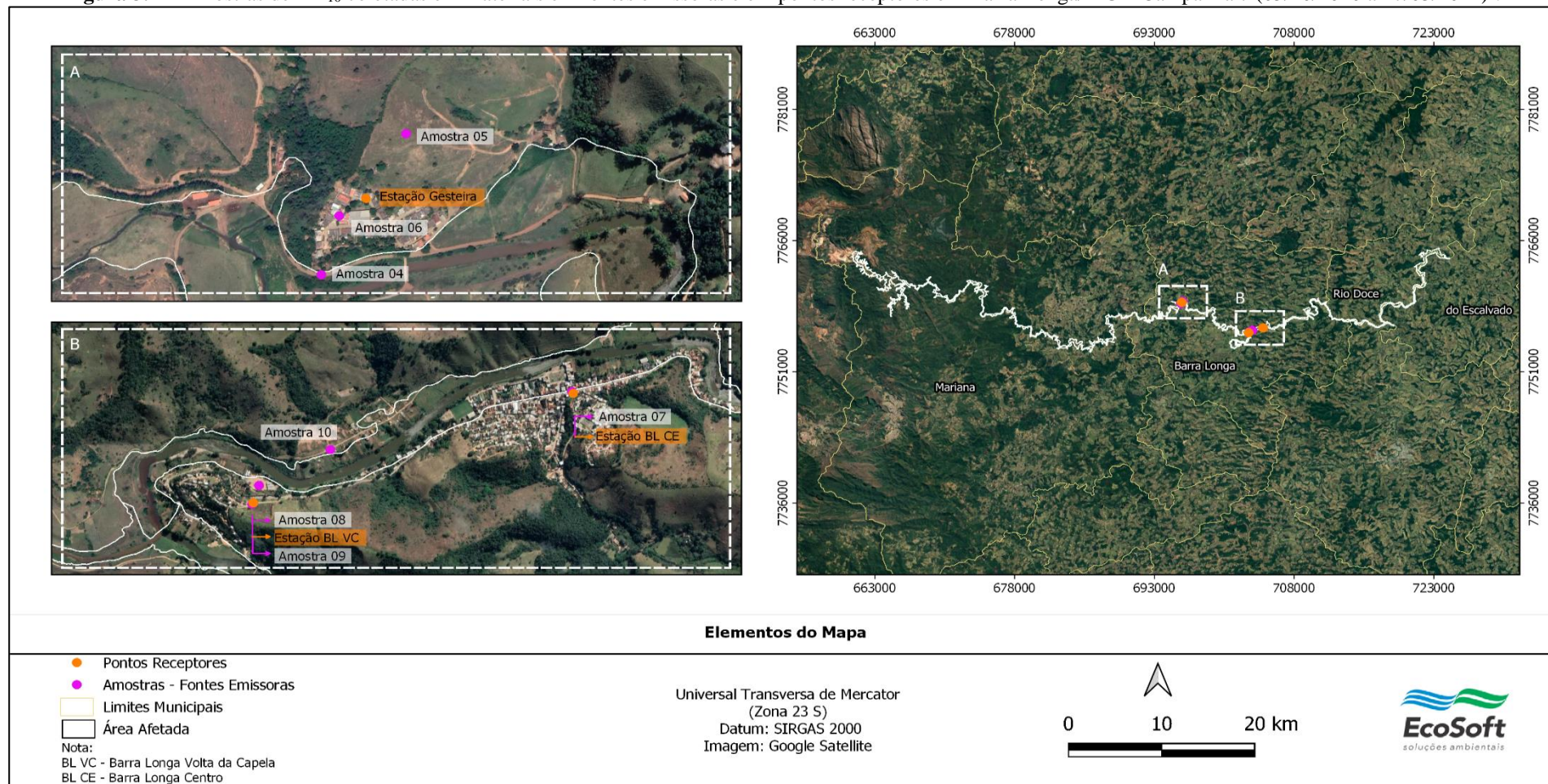
Nº 1

PÁGINA
22/142

RTC220103

REV.
2

Figura 3.2 – Amostras de PM₁₀ coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores em Barra Longa/MG – Campanha 7 (05/10/2020 a 17/03/2021)⁴.



⁴ Nota: Os períodos totais de cada campanha são considerados sendo da menor data de coleta das fontes/receptores à maior data de coleta das fontes/receptores



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO
EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A
AGOSTO DE 2021

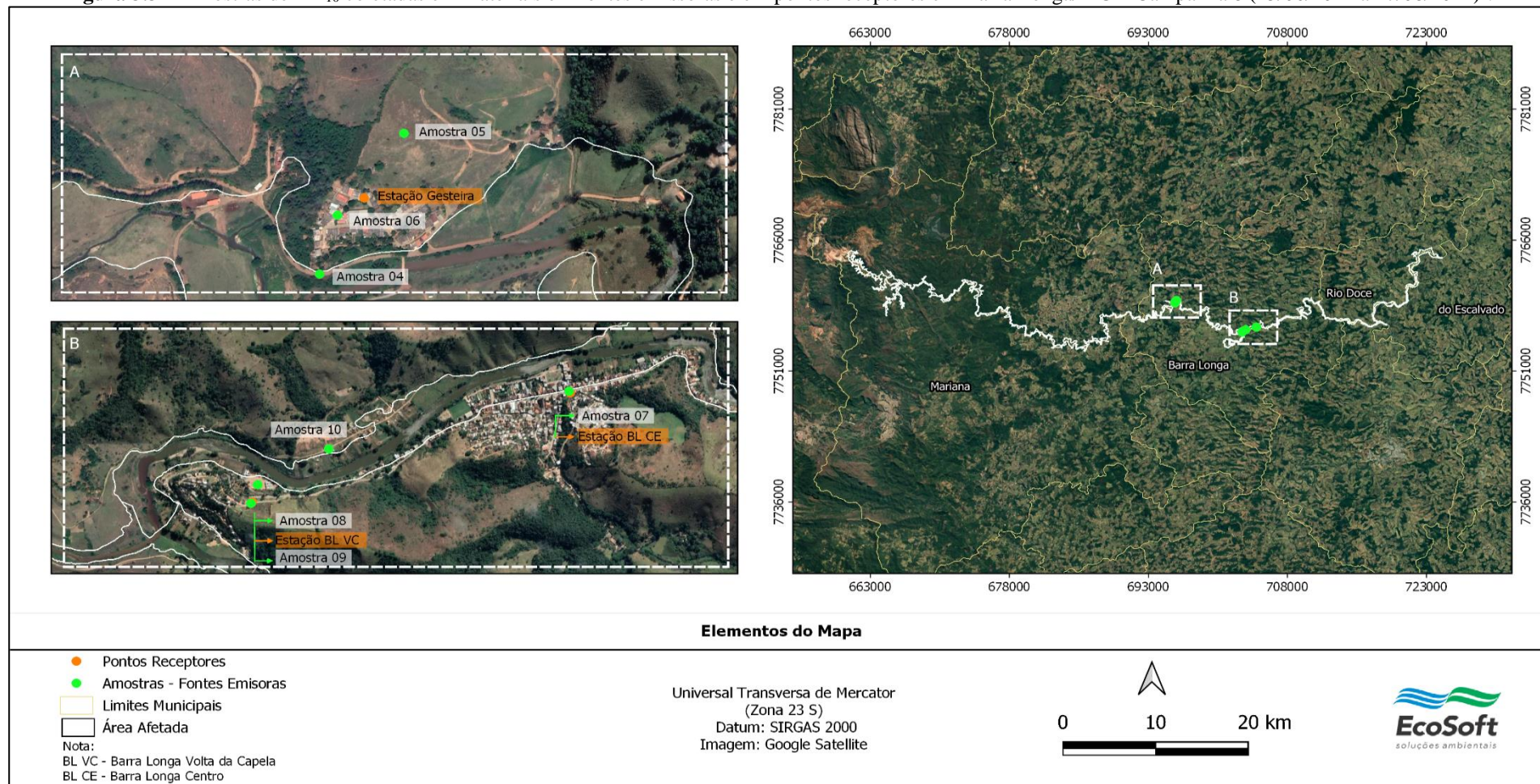
Nº 1

PÁGINA
23/142



RTC220103

REV.
2

Figura 3.3 – Amostras de PM₁₀ coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores em Barra Longa/MG – Campanha 8 (15/06/2021 a 17/08/2021)⁵.



⁵ Nota: Os períodos totais de cada campanha são considerados sendo da menor data de coleta das fontes/receptores à maior data de coleta das fontes/receptores

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 24/144
	RTC220103		REV. 2

3.2. Análises químicas

3.2.1. Métodos analíticos

As análises químicas, feitas pelo método PIXE foram realizadas pela Elemental Analysis Inc., localizada na cidade de Lexington/KY, USA. O método PIXE processa as amostras utilizando um acelerador de partículas General Ionex 4 MV Tandem, analisador modelo CAMAC Crates com resolução de 150eV e detector de raios-X do tipo Si (Li).

3.2.2. Análises de dados



Nos dados gerados por PIXE a unidade amostral é a massa total da amostra, seja em filtro ou sólido em pó, sendo assim, os resultados obtidos em PIXE são, nesse sentido, prontos para a aplicação pretendida: conhecimento sobre a composição química do PM₁₀ e preparação dos perfis de especiação química a serem utilizados no modelo CMB.

4. Caracterização da localidade analisada

O centro do município de Barra Longa (MG), situado a aproximadamente 60 km de Mariana, foi um dos núcleos urbanos mais afetados pelo rompimento da Barragem de Fundão. Gesteira, distrito de Barra Longa localizado à montante do centro, foi outra área afetada pelos rejeitos da barragem e, fica a aproximadamente 48 km distância de Mariana e a 15 km de distância do centro de Barra Longa.

Na área urbana de Barra Longa e em Gesteira foram realizadas diferentes atividades para remoção, transporte e destinação do material sedimentado nas regiões, além de obras de construção civil. Tais ações foram desenvolvidas com o objetivo de recuperar as áreas afetadas propiciando, entretanto, uma modificação da dinâmica das regiões, ocasionando na geração de material particulado proveniente do aumento do fluxo de veículos e decorrente das frentes de trabalho com movimentação de materiais (ECOSOFT, 2017).

As atividades de recuperação realizadas na área urbana de Barra Longa e Gesteira foram mais intensas nos anos de 2015 e 2016, devido às ações emergenciais feitas após o EVENTO. Em 2017, as atividades apresentavam menor magnitude quando comparadas aos anos anteriores. Por conseguinte, em 2018 e início de 2019, a dinâmica das atividades em ambos os locais passou a voltar às condições mais próximas daquelas existentes anteriormente ao EVENTO. Contudo, ainda foram percebidas atividades responsáveis pela alteração da dinâmica

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 25/144
	RTC220103		REV. 2

do cotidiano das localidades, principalmente aquelas relacionadas ao tráfego de veículos prestando serviço para a FUNDAÇÃO, à operação de máquinas e equipamentos e a movimentação de materiais.

Para prover informações contínuas sobre as condições de qualidade do ar nessas localidades, a FUNDAÇÃO mantém três estações automáticas de monitoramento estações Centro, Volta da Capela e Gesteira. As duas primeiras estações são equipadas com analisadores de concentrações de partículas da marca MET ONE, modelos BAM 1020 e BAM, 1022, analisadores que utilizam atenuação de raios beta como princípio de medição e medem continuamente as médias horárias de PTS, PM₁₀ e PM_{2.5}. A Estação Gesteira é equipada com o analisador MET ONE E BAM – PLUS e BAM 1022, que permite medição contínua da média horária de PM₁₀ e PM_{2.5}, respectivamente.

A evolução das concentrações de partículas, assim como as médias diárias e mensais, medidas em Barra Longa (MG) no período da campanha de monitoramento, são apresentadas na Figura 4.1. Para efeitos de comparação da magnitude das concentrações medidas são apresentados os padrões referenciados pela Resolução CONAMA n° 491, de 19 de novembro de 2018, que dispõe sobre padrões de qualidade do ar e critérios para elaboração de planos de controle de emissões atmosféricas, relatórios anuais de qualidade do ar e planos para episódios críticos de poluição do ar com o objetivo de evitar graves e iminentes riscos à saúde da população. A Tabela 4.1 apresenta os padrões de qualidade do ar vigentes para as três frações de material particulado preconizados pela resolução. Nota-se que na Resolução CONAMA n° 491/2018 os padrões foram estabelecidos em 4 níveis sequenciais progressivos, padrões intermediários 1 a 3 (PI) e padrão final (PF). Conforme descrito no Art. 4º a Resolução estabelece a primeira etapa a partir da sua publicação, compreendendo os Padrões de Qualidade do Ar Intermediários 1 (PI-1).



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 26/144
		RTC220103	REV. 2

Tabela 4.1 – Padrões de Qualidade do Ar - Resolução CONAMA nº 491/2018

Poluente Atmosférico	Período de referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	ppm
Material Particulado – MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ^a	40	35	30	20	-
Material Particulado – MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual ^a	20	17	15	10	-
Partículas Totais em Suspensão – PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual ^d	-	-	-	80	-

Notas:

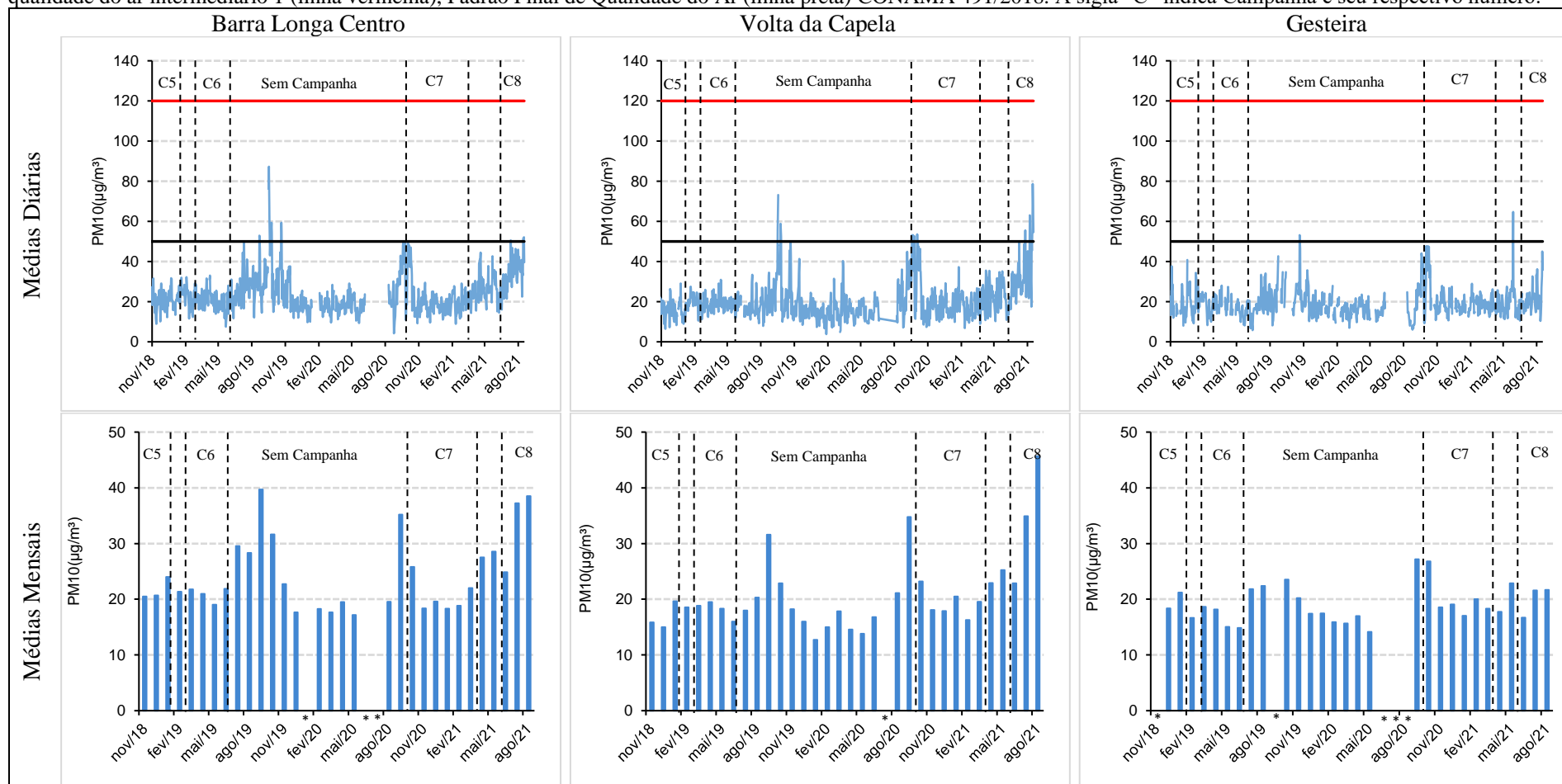
- a) Média aritmética;
- b) Média horária;
- c) Máxima média móvel obtida no dia
- d) Média geométrica.

Verifica-se um comportamento análogo para todas as concentrações analisadas. Primeiramente, nota-se um aumento nas concentrações dos valores medidos nos períodos mais secos do ano, com ambas concentrações atingindo seu pico nos meses compreendidos entre junho e outubro, seguido de reduções das concentrações nos meses compreendidos entre novembro até maio. Estas variações de concentrações não podem ser atribuídas isoladamente às fontes emissoras e atividades antropogênicas em Barra Longa (MG), pois, os fatores meteorológicos, principalmente ocorrência de chuvas, podem contribuir significativamente para a redução das concentrações de partículas. De acordo com padrão sazonal da região, os meses de verão (janeiro a março) são mais chuvosos (INMET, 2019).



Embora ainda ocorram as ações de recuperação promovidas pela FUNDAÇÃO os limites de concentrações definidos pelos padrões finais (PF) de qualidade do ar, referenciados pela resolução CONAMA, foram ultrapassados apenas nas médias de 24 horas de PM₁₀ em todas as estações. Contudo no que tange os limites de concentração definido como padrão de qualidade do ar intermediário (PI) pelo CONAMA 491/2018, nenhuma estação apresenta ultrapassagem dos limites vigentes estabelecidos pela legislação.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 27/144
		RTC220103	REV. 1

Figura 4.1 – Concentrações de PM₁₀ medidas em Barra Longa pelas estações Centro e Volta da Capela e em Gesteira (novembro de 2018 a agosto de 2021). PI-1: Padrão de qualidade do ar intermediário 1 (linha vermelha), Padrão Final de Qualidade do Ar (linha preta) CONAMA 491/2018. A sigla “C” indica Campanha e seu respectivo número.



Nota: * Meses com disponibilidade de dados menor que 75%. Nestes casos, a ausência de dados foi ocasionada devido a oscilação de energia elétrica na estação e de falhas de medição do analisador.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 28/142
	RTC220103		REV. 2

5. Análises químicas pelo método PIXE

O método PIXE (*Proton Induced X-Ray Emission*) é uma técnica analítica de amostras, onde raios-X característicos são emitidos, quando bombardeados com feixes de íons (H^+ , He^+ , etc.) com energia da ordem de poucos MeV. O PIXE destaca-se pela sua alta sensibilidade para detecção dos elementos químicos (ordem ppm, podendo chegar a ppb) e também pela necessidade de pequenas amostras para realização da análise. Aplicações do método PIXE para análise de material particulado têm sido realizadas, como pode ser verificado em estudos realizados por Castanho (1999), Maenhaut *et al.* (2014) e Santos *et al.* (2017).



Os resultados do PIXE para as amostras coletadas nas fontes emissoras e nos pontos receptores referentes a campanha 5, campanha 7 e campanha 8 estão dispostos nas Tabelas de A.1 a A.6 do Apêndice A.

Na Campanha 5, os elementos químicos mais abundantes identificados foram o ferro (Fe), o silício (Si) e o alumínio (Al), respectivamente, como pode ser observado na Figura 5.1. Além dos elementos predominantes identificados, também foram detectados com menor representatividade, os seguintes elementos químicos: potássio (K), magnésio (Mg), titânio (Ti), cálcio (Ca), sódio (Na), cobalto (Co), manganês (Mn), enxofre (S), zircônio (Zr), cloro (Cl), rubídio (Rb), estrôncio (Sr), zinco (Zn), cobre (Cu), arsênio (As), gálio (Ga), níquel (Ni) e vanádio(V).

Dentre as amostras analisadas, os maiores teores de ferro foram registrados nas amostras de rejeito (33,89% e 36,09%). Nas amostras de vias pavimentadas e não pavimentadas o teor de ferro variou entre 15,30% e 28,99%, enquanto as amostras de solo apresentaram teores de ferro em torno de 7,00%.

O Si apresentou suas maiores concentrações nas amostras de rejeito (31,36% e 32,63%) e a menor concentração na amostra de via não pavimentada de Gesteira (14,69%). As outras amostras de vias pavimentadas e não pavimentadas apresentaram teores de silício entre 20,58% e 26,42%, enquanto os teores de silício nas amostras de solo foram 22,71% e 26,44%.

O alumínio foi detectado em maiores concentrações nas amostras de vias, variando entre 14,43% e 19,39%. No solo intacto, o percentual de alumínio encontrado nas duas amostras foi de 14,01% e 9,43%. E por fim, as menores concentrações de alumínio foram registradas nas amostras de rejeito (6,65% e 5,08%).

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 29/142
	RTC220103		REV. 2

Na Campanha 7 foi detectada uma média de 16 elementos para as amostras coletadas. Assim como na campanha 5, os elementos químicos mais abundantes identificados nas amostras também foram o ferro, o silício e o alumínio, como pode ser observado na Figura 5.2. Outros elementos identificados, em menor quantidade, foram: potássio (K), magnésio (Mg), titânio (Ti), cálcio (Ca), sódio (Na), cobalto (Co), fósforo(P), manganês (Mn), enxofre (S), zircônio (Zr), cloro (Cl), rubídio (Rb), estrôncio (Sr), zinco (Zn), cobre (Cu), arsênio (As), gálio (Ga), níquel (Ni), vanádio(V) e cromo (Cr).

A amostra de via não pavimentada Gesteira apresentou o maior teor de ferro (25,71%), enquanto a menor concentração foi registrada na via pavimentada Volta da Capela (8,28%). A amostra de solo apresentou 10,78% de ferro e a amostra de obra apresentou 9,57% de ferro.

O Si apresentou sua maior concentração na amostra de obra (25,36%) e a menor concentração na amostra de solo (19,77%). O teor de silício nas amostras de vias pavimentadas e não pavimentadas variou de 20,43% a 23,20%.



O alumínio foi detectado em maior abundância na amostra de solo (20,19%), enquanto que a menor quantidade foi detectada na amostra de obra (14,59%). As amostras de vias pavimentadas e não pavimentadas apresentaram teores de alumínio entre 15,41% e 19,28%.

Por fim, na Campanha 8 foi detectada uma média de 15 elementos para as amostras coletadas. Os elementos químicos mais abundantes identificados nas amostras também foram o silício, ferro e o alumínio, como pode ser observado na Figura 5.3. Outros elementos identificados, em menor quantidade, foram: Potássio, Magnésio, Titânio, Cadmio, Cloro, Fósforo, Manganês, Enxofre, Zircônio, Cloro, Rubídio, Estrôncio, Zinco, Cobre, Gálio, Níquel, Cromo, Ítrio e Chumbo.

Nesta campanha, o elemento ferro apresentou maiores concentrações nas amostras de vias não pavimentadas (16,31% e 11,05%), seguido das amostras de obra (10,84%), vias pavimentadas (9,16%, 8,65% e 7,29%) e solo (7,11%).

Para o elemento silício, a maior quantidade foi observada na amostra de obra (26,05%), enquanto a amostra de via pavimentada de Gesteira apresentou o menor teor do elemento (20,38%). Na amostra de solo, foi encontrado 22,29% de silício.

Para o alumínio, a amostra de solo apresentou o maior percentual do elemento (18,16%), enquanto a amostra de via pavimentada do Centro de Barra longa apresentou o menor percentual (13,33%). Na amostra de obra, 14,26% da massa foi detectada como alumínio.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 30/142
		RTC220103	REV. 2

A Tabela 5.1 abaixo apresenta as concentrações encontradas para os principais elementos de cada tipologia de fonte emissora nas três campanhas em questão (Campanhas 5,7 e 8).

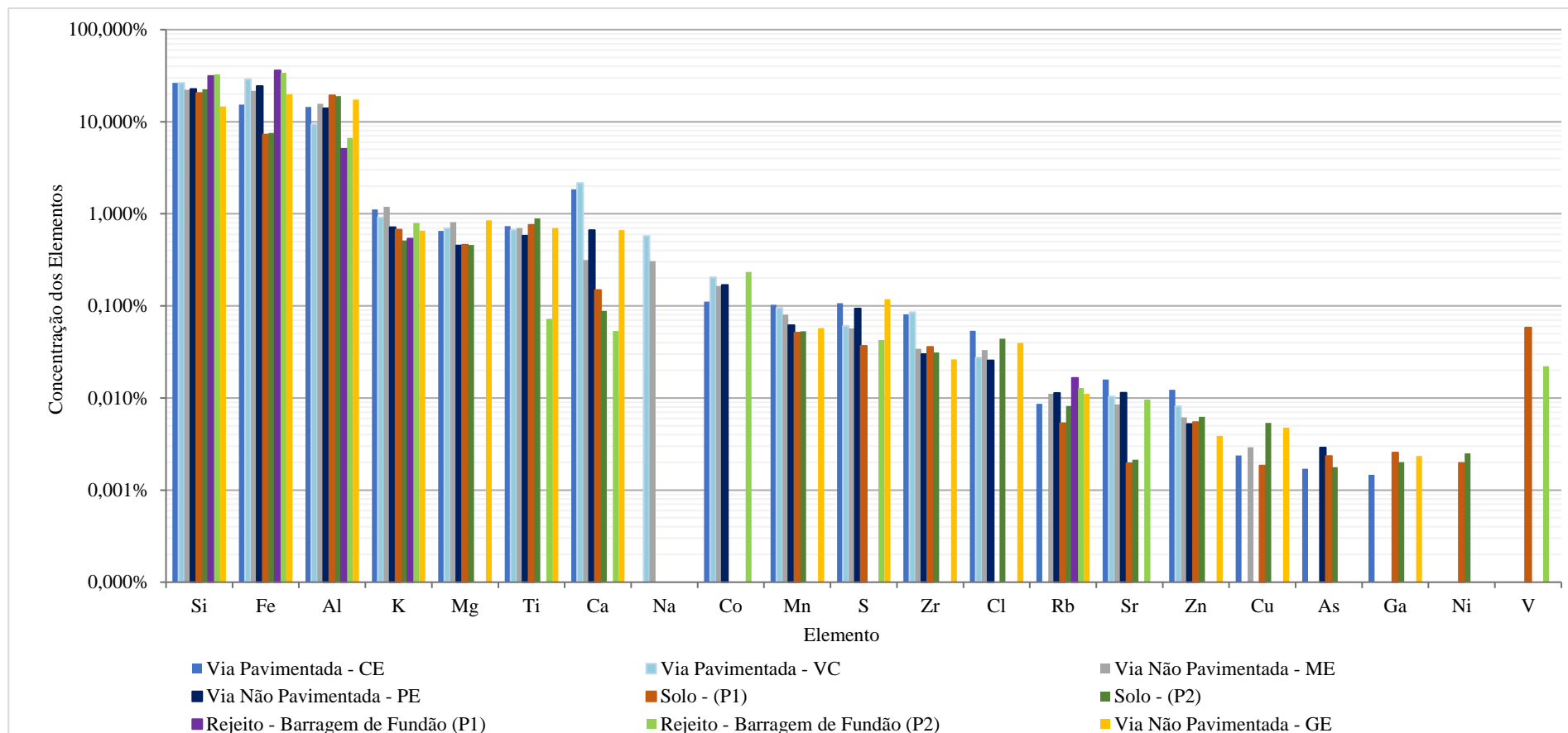
Tabela 5.1 – Concentrações em ordem decrescente dos elementos ferro, silício e alumínio nas amostras de fontes emissoras coletadas durante as Campanhas 5, 7 e 8 localizadas em Barra Longa/MG e Gesteira/MG.

CAMPANHA	PERÍODO	FERRO		SILÍCIO		ALUMÍNIO	
5	01/11/2018 a 23/01/2019	Rejeito 1	36,09%	Rejeito 1	32,63%	VP C	19,39%
		Rejeito 2	33,89%	Rejeito 2	31,36%	VP VC	18,95%
		VP VC	28,99%	Solo 2	26,44%	VNP GE	17,40%
		VNP PE	24,39%	VNP PE	26,42%	VNP ME	15,67%
		VNP ME	21,64%	Solo 1	22,71%	VNP PE	14,43%
		VNP GE	19,86%	VP VC	22,54%	Solo 1	14,01%
		VP C	15,30%	VNP ME	22,27%	Solo 2	9,43%
		Solo P2	7,56%	VP C	20,58%	Rejeito 1	6,65%
		Solo P1	7,26%	VNP GE	14,69%	Rejeito 2	5,08%
7	16/03/2021 a 17/03/2021	VNP GE	25,71%	Obra	25,36%	Solo	20,19%
		VNP ME	16,60%	VP CE	23,20%	VP GE	19,28%
		VP CE	10,85%	VNP GE	22,06%	VNP GE	17,27%
		Solo	10,78%	VP GE	21,08%	VNP ME	17,17%
		Obra	9,57%	VP VC	21,07%	VP VC	16,54%
		VP GE	9,54%	VNP ME	20,43%	VP CE	15,41%
		VP VC	8,28%	Solo	19,77%	Obra	14,59%
8	06/08/2021 a 09/08/2021	VNP GE	16,31%	Obra	26,05%	Solo	18,16%
		VNP ME	11,05%	VP CE	25,97%	VP GE	17,73%
		Obra	10,84%	VNP ME	23,43%	VP VC	17,23%
		VP VC	9,16%	VP VC	22,81%	VNP ME	16,85%
		VP CE	8,65%	Solo	22,29%	VNP GE	15,16%
		VP GE	7,29%	VNP GE	21,55%	Obra	14,26%
		Solo	7,11%	VP GE	20,38%	VP CE	13,33%

Nota: VP – Via Pavimentada VNP – Via Não Pavimentada C: Centro VC: Volta da Capela ME: Margem Esquerda GE: Gesteira

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 31/142
		RTC220103	REV. 2

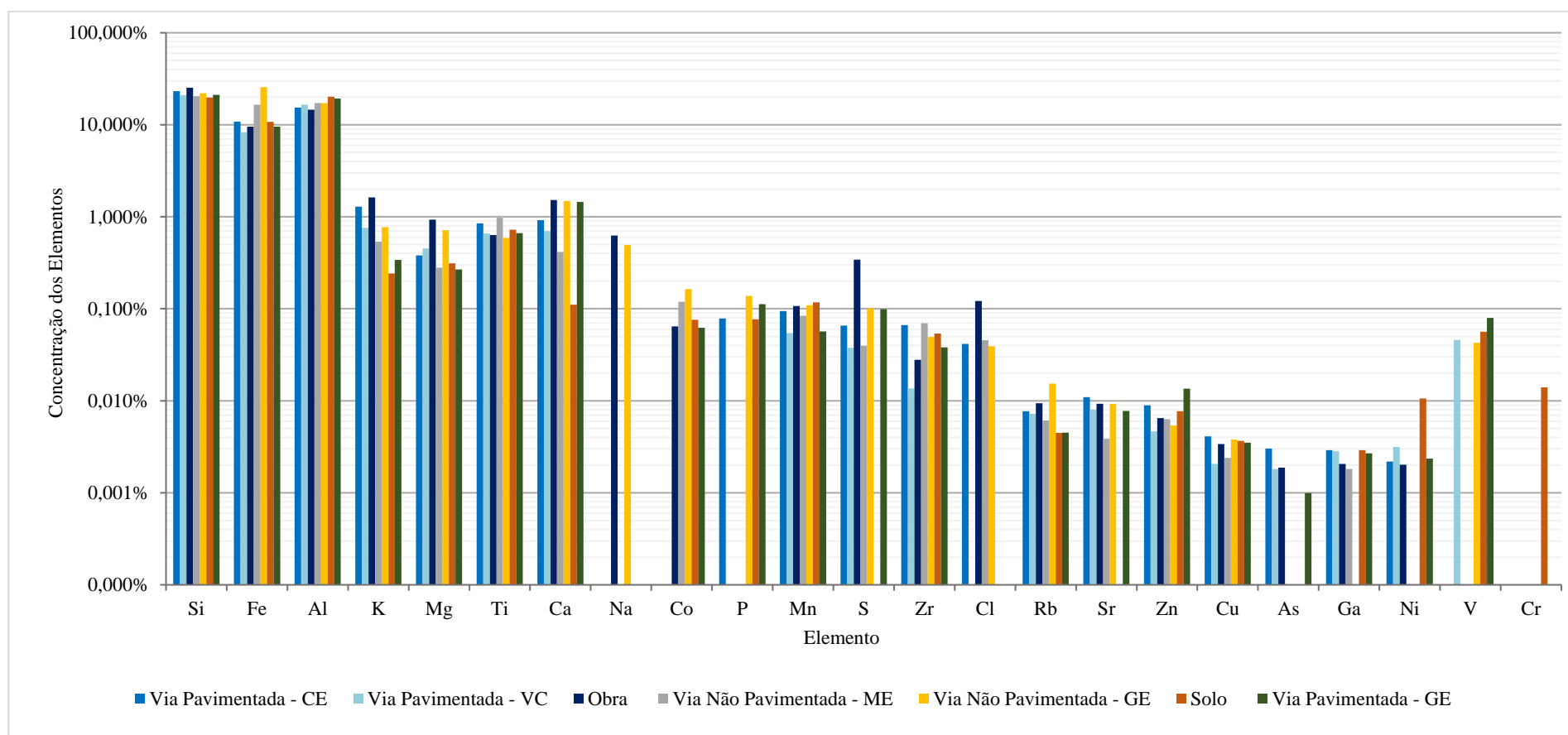
Figura 5.1 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 5 (01/11/2018 a 23/01/2019)



Nota: CE: Centro VC: Volta da Capela ME: Margem Esquerda PE: Parque de Exposições GE: Gesteira

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 32/142
		RTC220103	REV. 2

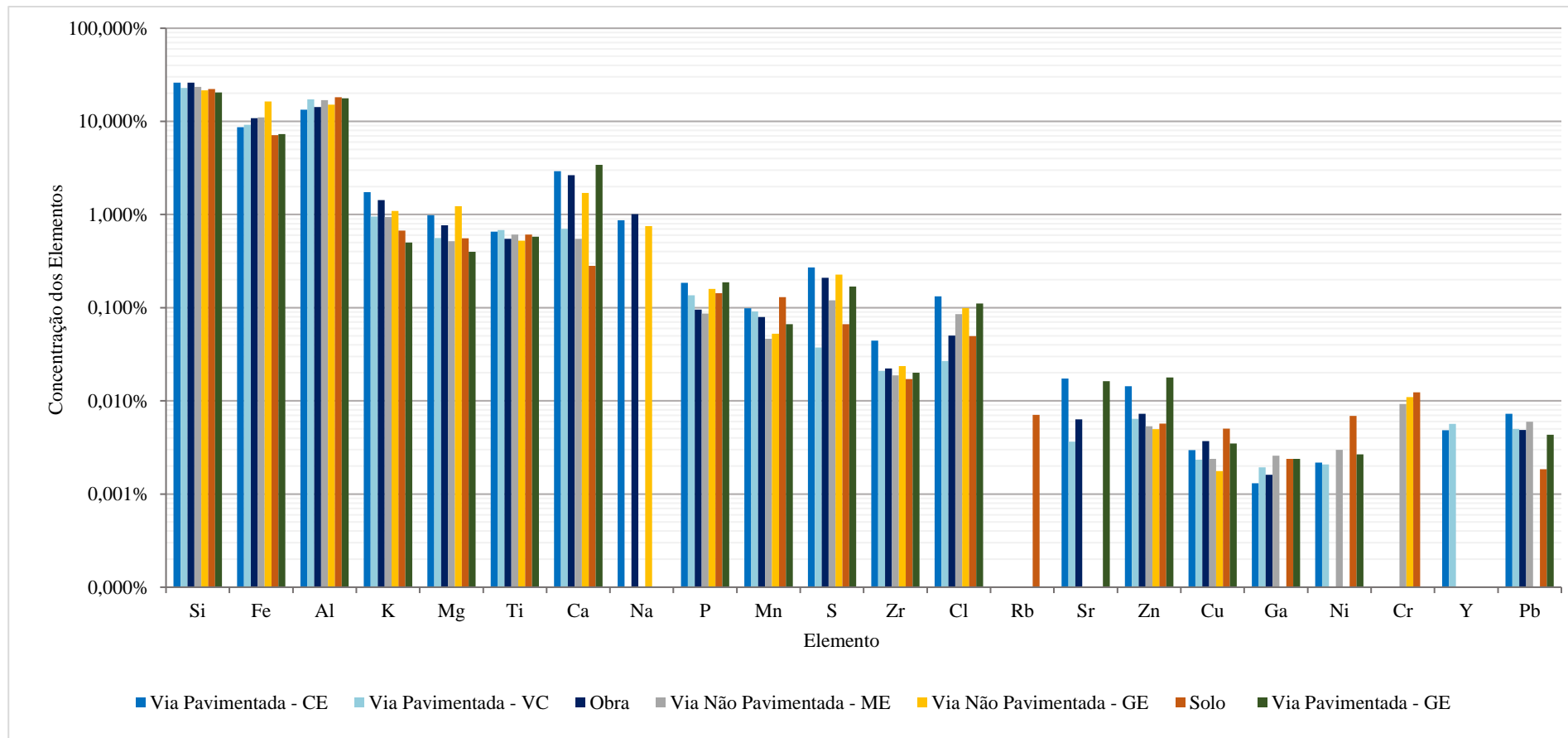
Figura 5.2 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 7 (16/03/2021 a 17/03/2021)



Nota: CE: Centro VC: Volta da Capela ME: Margem Esquerda GE: Gesteira

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 33/142
		RTC220103	REV. 2

Figura 5.3 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 8 (06/08/2021 a 09/08/2021)



Nota: CE: Centro VC: Volta da Capela ME: Margem Esquerda GE: Gesteira

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - AGOSTO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 34/142
	RTC220103		REV. 2

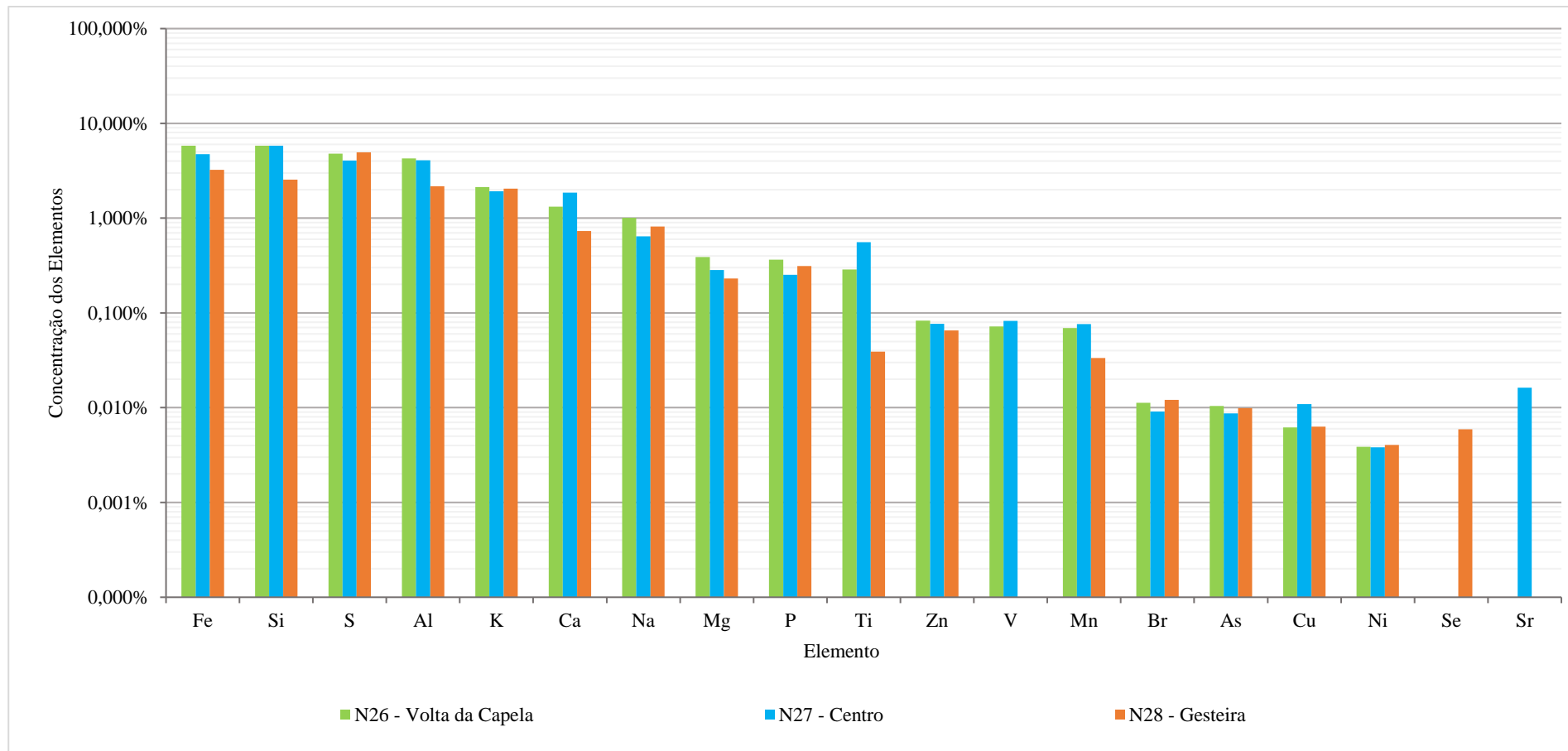
Em relação às amostras de PM₁₀ coletadas em filtros de Nylon e MCE nas Estações Barra Longa Volta da Capela e Centro e Estação Gesteira, nas três campanhas (6, 7 e 8), os elementos ferro (Fe), o alumínio (Al), o silício (Si), o enxofre (S), o potássio (K), o cálcio (Ca) e o sódio (Na) foram os mais abundantes observados em todas as amostras (Figuras 5.4 a 5.9).

Nos filtros da Campanha 6 também foram identificados, com menor representatividade, os seguintes elementos: Mg, P, Ti, Zn, V, Mn, Br, As, Cu, Ni, Rb, Cl, Se, Sr e Cr. Os elementos identificados com menor representatividade na Campanha 7 foram: Mg, P, Ti, Zn, Mn, Cu, As, Cr, Br, Ni e Cl. E por fim, na Campanha 8, os elementos com as menores concentrações foram Mg, Ti, Zn, Mn, Br, Cu, Cl e Pb.

Para estimar quantitativamente a contribuição das diferentes fontes emissoras de material particulado nas concentrações atmosféricas de PM₁₀, foi aplicado o modelo CMB8.2 (*Chemical Mass Balance*), recomendado pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2016), apresentado a seguir.

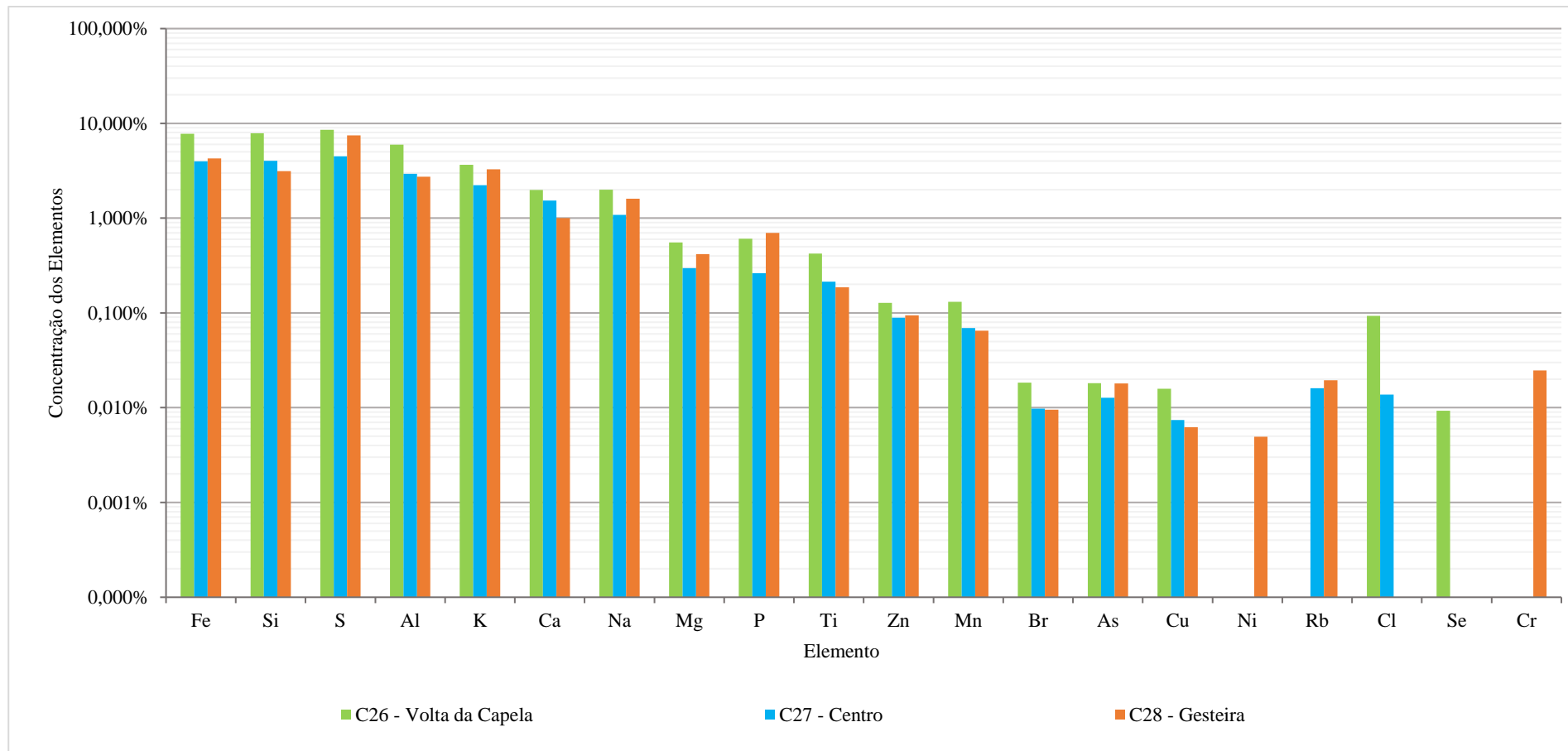
		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 35/142
		RTC220103	REV. 2

Figura 5.4 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros de nylon – Campanha 6 (18/03/19 a 13/06/19).



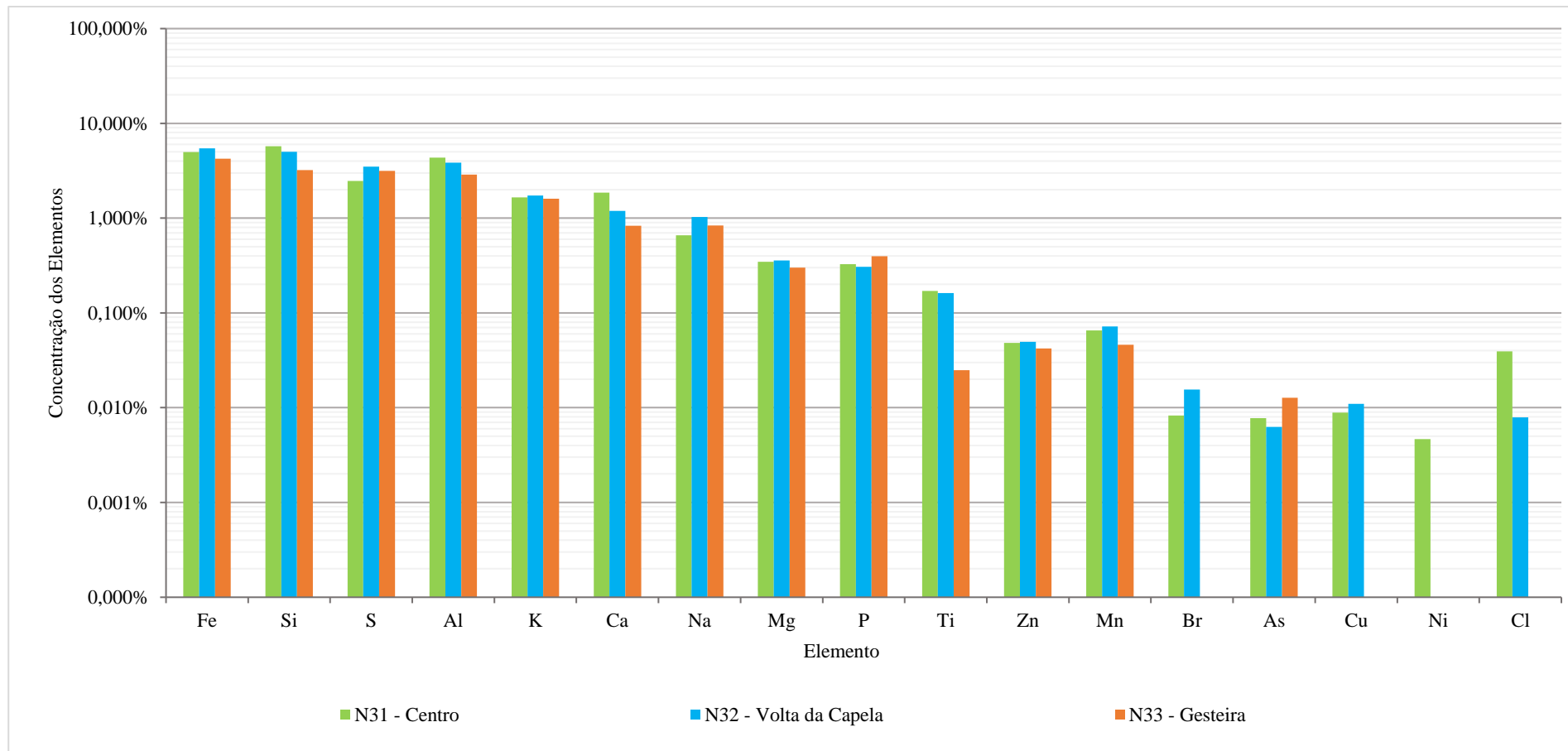
		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 36/142
		RTC220103	REV. 2

Figura 5.5 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros MCE – Campanha 6 (18/03/19 a 13/06/19).



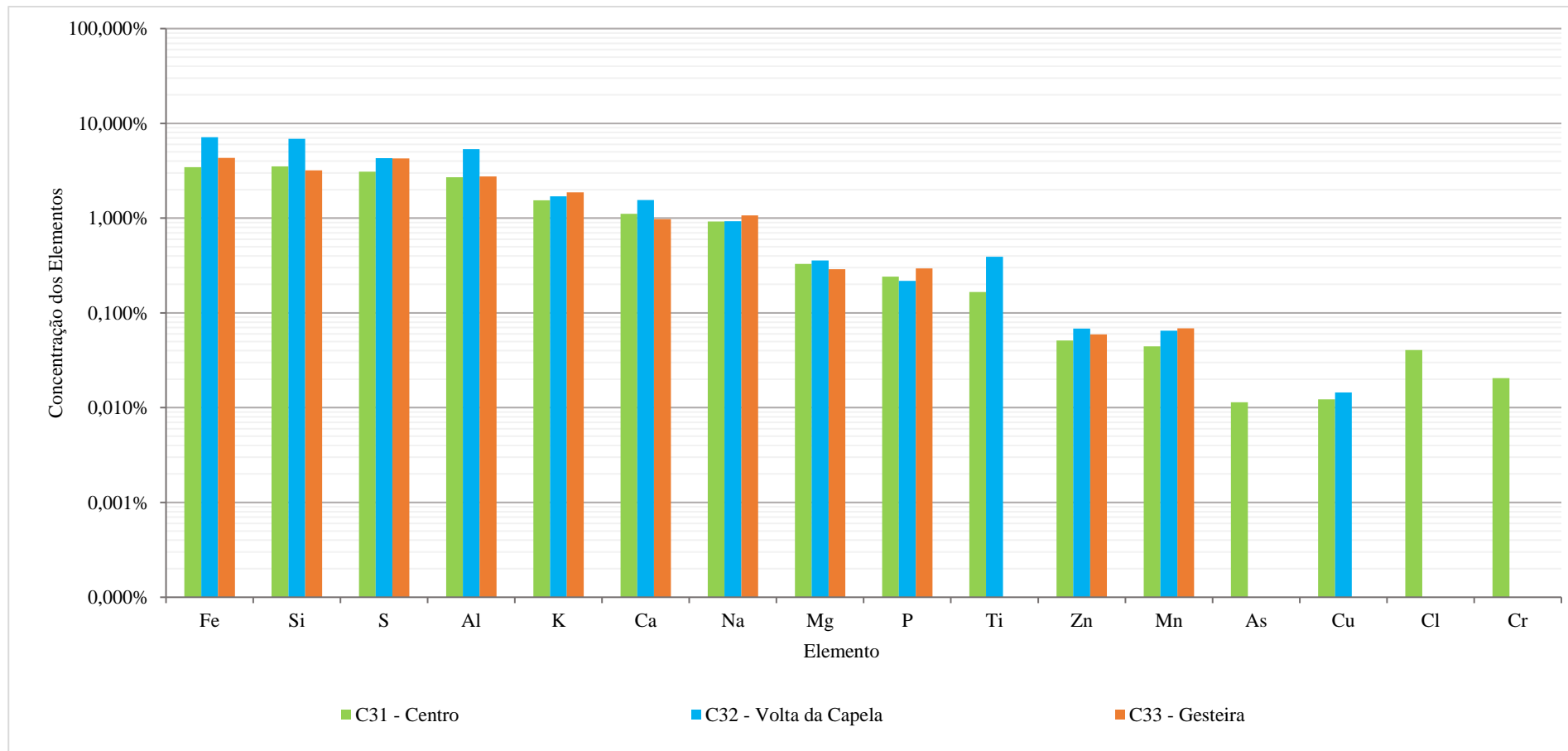
		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 37/142
		RTC220103	REV. 2

Figura 5.6 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros de nylon – Campanha 7 (05/10/20 a 17/03/21).



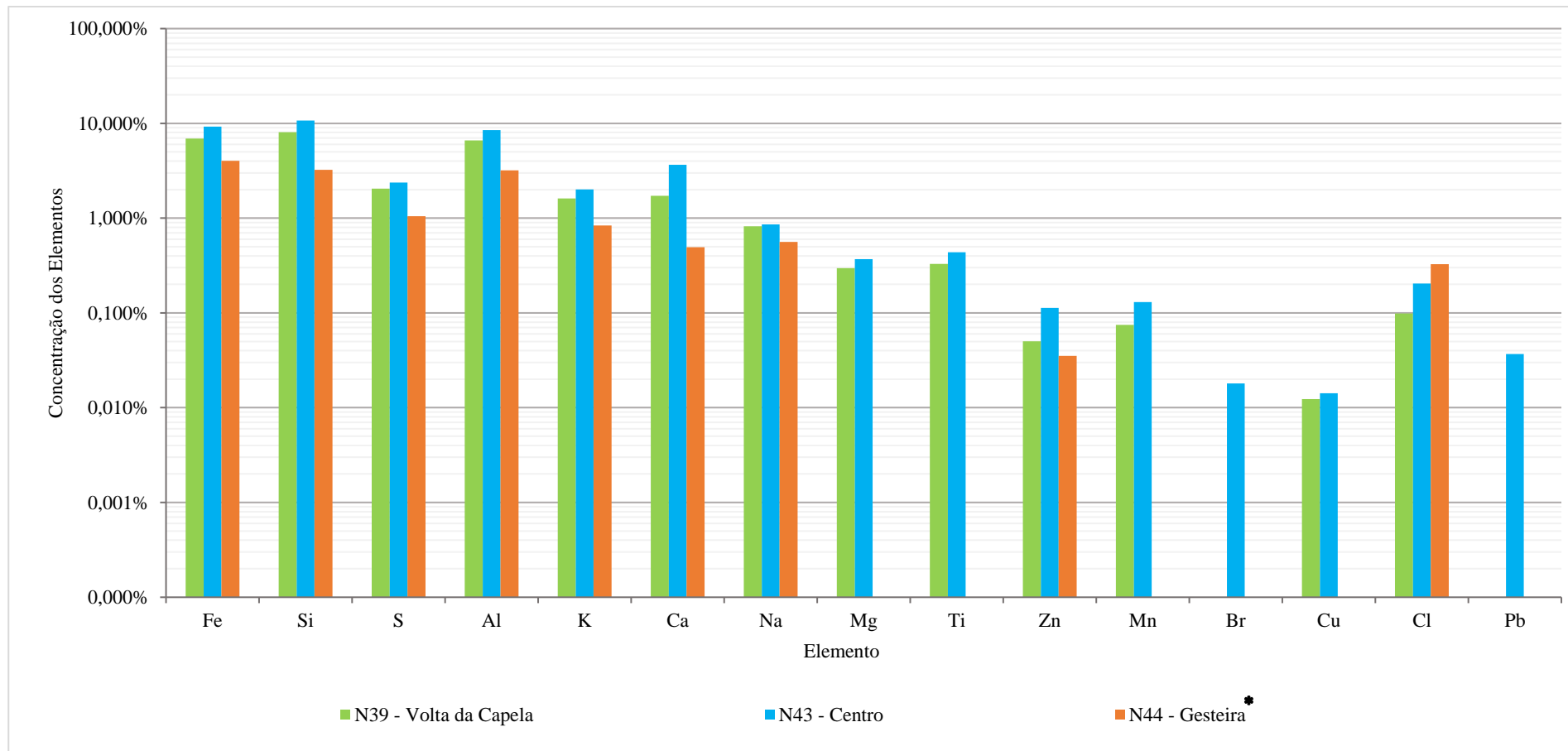
		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 38/142
	RTC220103		REV. 2

Figura 5.7 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros MCE – Campanha 7 (05/10/20 a 17/03/21).



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 39/142
		RTC220103	REV. 2

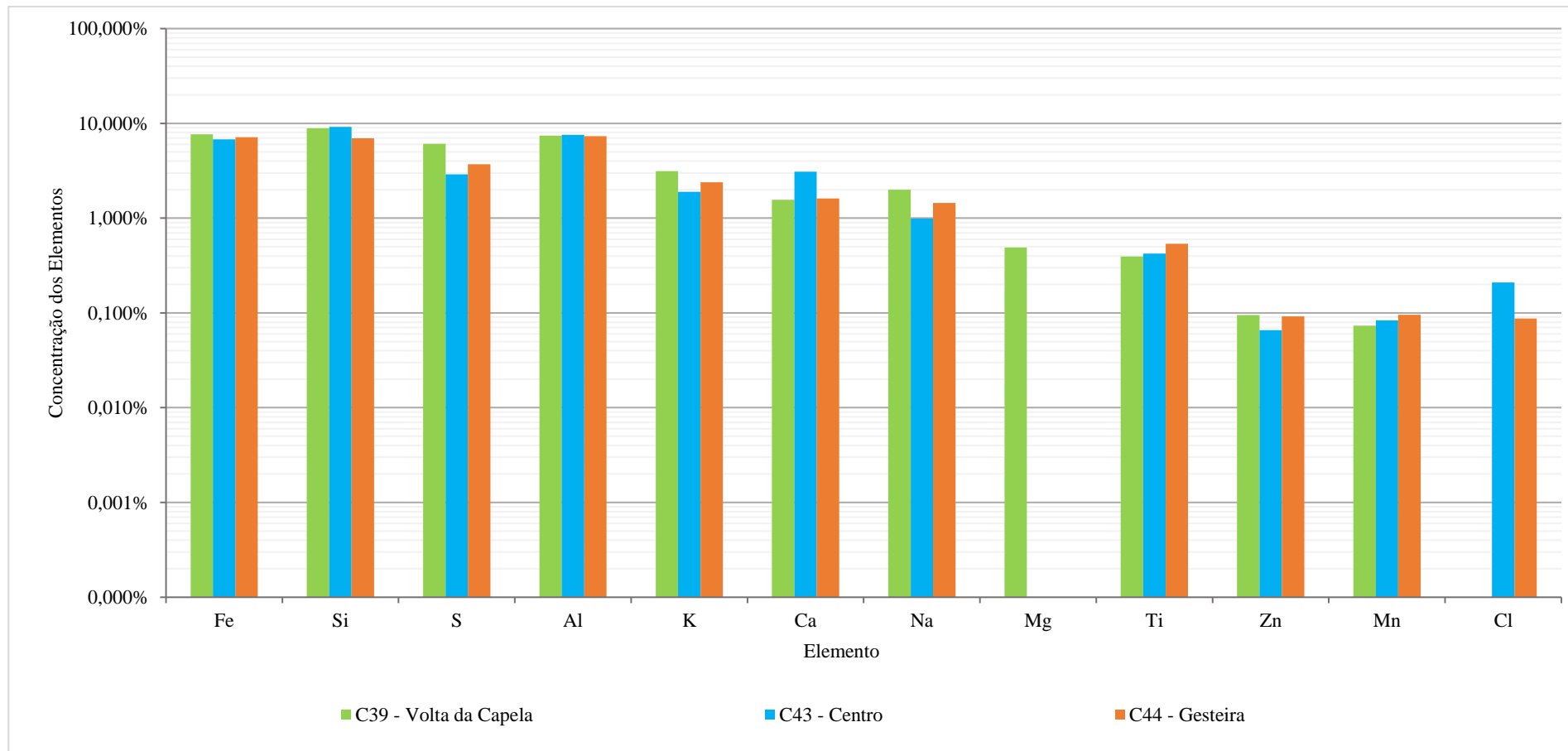
Figura 5.8 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros de nylon – Campanha 8 (15/06/21 a 18/08/21).





* Os resultados referentes ao filtro N44 – Gesteira foram desconsiderados das análises, devido à baixa concentração de massa da amostra.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 40/142
		RTC220103	REV. 2

Figura 5.9 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros MCE – Campanha 8 (15/06/21 a 18/08/21).



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 41/142
	RTC220103		REV. 2

6. Modelagem CMB

6.1. Descrição do modelo CMB

O CMB é um modelo de qualidade do ar classificado como modelo receptor. Segundo Hopke (2016) é um dos modelos mais aplicados para determinação da contribuição de poluentes primários, sendo utilizado extensivamente para determinação da contribuição de PM₁₀. O CMB vem sendo aplicado para avaliação da contribuição de partículas em diversas cidades do mundo (CHOW; WATSON, 2002; GUPTA *et al.*, 2007; CHEN *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2017; DAI *et al.*, 2019).



Os modelos receptores consistem em procedimentos matemáticos ou estatísticos para identificar e quantificar a contribuição das fontes de poluição do ar em um dado local (receptor), com base nas características químicas e físicas dos gases e partículas medidos nas fontes e nos receptores (USEPA, 2004).

O modelo receptor CMB constitui-se de uma solução de equações lineares que expressam cada concentração química no receptor como uma soma linear dos produtos entre as abundâncias das espécies nos perfis de fontes emissoras e as contribuições totais dessas fontes no receptor. Para cada execução do CMB, o modelo ajusta dados especiados de um grupo específico de fontes a dados correspondentes para um determinado receptor (amostra) (USEPA, 2004).

As abundâncias das espécies, representadas pelas frações mássicas dos elementos ou substâncias químicas constituintes das fontes emissoras, e as concentrações dessas espécies no receptor, com as estimativas de incertezas adequadas, servem como dados de entrada para o CMB. A saída do modelo consiste na estimativa da contribuição para cada tipo de fonte, bem como para cada uma das espécies químicas (USEPA, 2004).

A seguir são apresentados os requisitos para o procedimento de modelagem com o CMB:

- Identificação dos tipos de fontes emissoras contribuidoras;
- Seleção das espécies químicas ou outras propriedades a serem incluídas no cálculo;
- Conhecimento da fração de cada uma das espécies químicas que estão contidas em cada tipo de fonte e nas amostras ambientais (perfis de fontes e receptores);

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 42/142
	RTC220103		REV. 2

- Estimativa das incertezas tanto nas concentrações ambientais quanto nos perfis de fontes;
- Solução das equações do balanço químico de massa.



Como toda ferramenta de modelagem, o CMB assume algumas premissas, as quais são descritas abaixo:

- As composições das emissões das fontes são constantes ao longo do período de amostragem;
- As espécies químicas não reagem umas com as outras;
- Todas as fontes com potencial de contribuição para o receptor foram identificadas e tiveram suas emissões caracterizadas;
- O número de fontes ou categoria de fontes é menor ou igual ao número de espécies;
- Os perfis de fontes são linearmente independentes;
- As incertezas de medição são aleatórias, não correlacionadas e normalmente distribuídas.

Deve-se destacar que os pressupostos descritos acima são bastante restritivos e dificilmente serão cumpridos na prática em sua totalidade. No entanto, o CMB pode admitir desvios razoáveis, embora estes desvios aumentem as incertezas determinadas para as estimativas de contribuição de fontes (USEPA, 2004).

Outro ponto a se considerar é que o CMB quantifica as contribuições de tipos de fontes quimicamente distintas, ou seja, fontes com propriedades químicas e físicas semelhantes não podem ser distinguidas umas das outras pelo modelo (USEPA, 2004), isso significa que, não consegue diferenciar perfis químicos de fontes emissoras que são colineares.

As estimativas de contribuição de fontes são calculadas para cada amostra ambiente individualmente, sendo que a combinação dos perfis de fontes que melhor explicam as medições ambientais podem diferir de uma amostra para outra. Tal diferenciação pode se dar devido a variações nas taxas de emissão (por exemplo, ocorrência ou não de queima em fogões a lenha), direção do vento (por exemplo, para uma fonte pontual não se espera que haja contribuição em um local de amostragem localizado a barlavento da mesma) e mudança nas composições das emissões (USEPA, 2004).

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 43/142
		RTC220103	REV. 2

No CMB, a contribuição de fonte emissora (S_j) em um receptor durante um período de amostragem de duração T devido a uma fonte j com taxa de emissão constante (E_j) pode ser descrita por:

$$S_j = D_j \cdot E_j \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

$$D_j = \int_0^T d[\vec{u}(t), \sigma(t), \vec{x}_j] dt \quad (\text{Equação 2})$$

Onde D_j é um fator de dispersão que depende da velocidade do vento (u), estabilidade atmosférica (σ) e localização da fonte j em relação ao receptor (x_j). Todos os parâmetros da Equação 2 variam com o tempo, de modo que o fator de dispersão instantâneo (D_j) deve ser integrado ao longo do período T .

Várias formas para D_j têm sido propostas, mas nenhuma delas é completamente adequada para descrever a natureza complexa e aleatória da dispersão na atmosfera. A vantagem dos modelos receptores é que não é necessário um conhecimento exato do fator D_j (USEPA, 2004).

Dessa forma, considerando um determinado número de fontes p e que não há qualquer interação entre as suas emissões que ocasione remoção de massa, a concentração total (C) medida em um receptor será uma soma linear das contribuições de cada fonte j .

$$C = \sum_{j=1}^p D_j \cdot E_j = \sum_{j=1}^p S_j \quad (\text{Equação 3})$$



Similarmente, a concentração do componente elementar i (C_i), será:

$$C_i = \sum_{j=1}^p a_{ij} \cdot S_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

C_i : concentração no ambiente da espécie i ;

a_{ij} : fração mássica da espécie i nas emissões da fonte j ;

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 44/142
	RTC220103		REV. 2



S_j : contribuição da fonte j em relação à concentração mássica total no receptor;

p : número de fontes;

n : número de espécies (com $n \geq p$).

A Equação 4 representa a equação governante do CMB, a qual consiste em um sistema linear, no qual a concentração de cada espécie química no receptor é expressa como a soma dos produtos entre as frações mássicas das espécies nas fontes e a contribuição dessas fontes no receptor, sendo esta contribuição a variável de interesse.

Para que o sistema apresente uma solução única para estas equações o número de espécies químicas (n) deve ser maior ou igual ao número de fontes (p). Na Equação 4, C_i e a_{ij} são conhecidos – dados de entrada do modelo (perfis das fontes e dos receptores). As contribuições das fontes (S_j) são estimadas pela aplicação do método dos mínimos quadrados, que consiste em uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados, tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças (resíduos) entre os valores estimados e os dados observados.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 45/142
	RTC220103		REV. 2

6.2. Análise do modelo CMB

Na presente análise, o modelo CMB não foi aplicado em toda sua plenitude, mas somente como ferramenta para obtenção de uma aproximação das contribuições de fontes emissoras relacionadas às atividades da FUNDAÇÃO, que potencialmente influenciaram para as concentrações de PM₁₀ em Barra Longa (MG) e Gesteira (MG). Para uma aplicação mais ampla do CMB, seria necessário identificar e caracterizar quimicamente todas as demais fontes emissoras significativas de partículas existentes nas localidades e nos seus arredores, o que não seria de execução viável no presente trabalho contratado.

Para simulação com o CMB, foi considerada uma composição dos perfis químicos dos pontos receptores e fontes emissoras para o contexto da análise, conforme descrito a seguir.

Fontes Emissoras

No presente estudo, foram consideradas as amostras de fontes emissoras referentes as campanhas 5, 7 e 8. No período da campanha 6 não houve amostragem de fontes nas localidades de Barra Longa (MG) e Gesteira (MG), sendo assim, foram utilizadas as amostras de fontes referentes à campanha 5.

Tendo em vista a grande similaridade existente entre alguns perfis químicos para as diferentes tipologias de fontes, optou-se pela adoção de agrupamento de fontes similares, ao invés de trabalhar com cada perfil químico de forma isolada. Essa abordagem é necessária em função da colinearidade entre os perfis das fontes emissoras, uma vez que o modelo CMB não é capaz de diferenciar fontes com assinatura química muito similares entre si. Analisando os perfis químicos das amostras de fontes, os seguintes agrupamentos foram realizados na tentativa de minimizar os efeitos de colinearidade no modelo CMB:

- Barra Longa – Campanha 5

O conjunto de amostras referentes a vias pavimentadas e não pavimentadas possuem muita similaridade, porém com teor de ferro que ainda indica a presença de material afetado pelo rejeito na composição da poeira na superfície das vias. Dessa forma, foram categorizados 2 grupos de fontes emissoras para avaliação do modelo CMB: vias de tráfego e solo intacto.





		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 46/142
	RTC220103		REV. 2

Tabela 6.1 – Composição química e incerteza do perfil médio das amostras de PM₁₀ em fontes emissoras em Barra Longa durante a campanha 5.

ELEMENTO	Agrupamento das Vias de Tráfego		Solo Intacto	
	M [%] ^a	IC [%] ^b	M [%] ^a	IC [%] ^b
Na	0,146	0,311	0,000	0,000
Mg	0,624	0,211	0,462	0,002
Al	14,909	2,386	19,167	0,313
Si	23,846	2,143	21,561	1,387
P	0,090	0,065	0,041	0,058
S	0,120	0,070	0,018	0,026
Cl	0,054	0,037	0,022	0,031
K	1,099	0,341	0,594	0,114
Ca	1,280	0,876	0,119	0,043
Ti	0,691	0,118	0,826	0,093
V	0,004	0,015	0,029	0,041
Cr	0,001	0,003	0,000	0,000
Mn	0,083	0,020	0,052	0,001
Fe	14,609	7,307	7,410	0,218
Co	0,069	0,085	0,000	0,000
Ni	0,001	0,001	0,002	0,000
Cu	0,002	0,001	0,004	0,002
Zn	0,008	0,003	0,006	0,001
Ga	0,002	0,001	0,002	0,000
As	0,001	0,001	0,002	0,000
Rb	0,005	0,005	0,007	0,002
Sr	0,009	0,005	0,002	0,000
Y	0,001	0,002	0,000	0,000
Zr	0,043	0,027	0,034	0,003
Pb	0,002	0,003	0,000	0,000

Nota:

^a M – Percentual em massa do elemento; ^b IC – Incerteza percentual do método na detecção do elemento

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 47/142
	RTC220103		REV. 2

- Barra Longa – Campanhas 7 e 8

A caracterização química das amostras de fontes emissoras realizadas durante as campanhas 7 e 8 indicaram muita similaridade entre os perfis químicos das vias de tráfego (pavimentada e não pavimentada) e o solo intacto. Uma vez cessada a movimentação de rejeito/material afetado na região de Barra Longa (MG), percebe-se que há uma tendência natural de diluição da influência do rejeito na poeira disponível na superfície das vias, tendência essa observada pelo histórico das análises químicas nas fontes emissoras da região. Portanto, para as campanhas 7 e 8, os perfis químicos das vias de tráfego e do solo intacto foram agrupados em um único perfil, não sendo possível distinguir a fonte emissora (vias ou solo intacto), via modelo CMB, que contribui nas concentrações de PM_{10} na região.





		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 48/142
		RTC220103	REV. 2

Tabela 6.2 – Composição química e incerteza do perfil médio das amostras de PM₁₀ em fontes emissoras em Barra Longa durante as campanhas 7 e 8.

ELEMENTO	Agrupamento médio das fontes (vias de tráfego e solo intacto)	
	M [%] ^a	IC [%] ^b
Na	0,313	0,444
Mg	0,609	0,257
Al	15,672	1,489
Si	23,540	2,138
P	0,073	0,069
S	0,140	0,119
Cl	0,063	0,046
K	1,158	0,429
Ca	1,297	0,977
Ti	0,702	0,140
V	0,006	0,016
Cr	0,001	0,003
Mn	0,082	0,021
Fe	10,625	2,635
Co	0,023	0,045
Ni	0,002	0,001
Cu	0,003	0,001
Zn	0,007	0,003
Ga	0,002	0,001
As	0,001	0,001
Rb	0,004	0,004
Sr	0,007	0,005
Y	0,001	0,002
Zr	0,035	0,022
Pb	0,003	0,003

Nota:

^a M – Percentual em massa do elemento; ^b IC – Incerteza percentual do método na detecção do elemento

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 49/142
	RTC220103		REV. 2

- Gesteira – Campanhas 5, 7 e 8

Os perfis químicos das amostras de fontes da localidade de Gesteira (via pavimentada, via não pavimentada e solo) também apresentaram muita semelhança, indicando que todos as amostras possuem a mesma composição, com muita possibilidade de serem colineares. Tendo em vista o teor de ferro nas amostras de vias de tráfego (pavimentada e não pavimentada) e o solo intacto da região, observou-se que as vias não pavimentadas possuem teor de ferro mais elevado do que as amostras de vias pavimentadas e solo intacto. Portanto, na tentativa de que o modelo CMB consiga separar as influências, optou-se por segregar 2 perfis médios para representar as fontes emissoras na região de Gesteira (MG): as vias não pavimentadas e o agrupamento de vias pavimentadas e solo intacto.




		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 50/142
		RTC220103	REV. 2

Tabela 6.3 – Composição química e incerteza do perfil médio das amostras de PM₁₀ em fontes emissoras em Gesteira durante as campanhas 5, 7 e 8.

ELEMENTO	Agrupamento das Vias Pavimentadas e Solo Intacto		Vias Não Pavimentadas	
	M [%] ^a	IC [%] ^b	M [%] ^a	IC [%] ^b
Na	0,000	0,000	0,415	0,383
Mg	0,384	0,128	0,931	0,265
Al	18,839	1,111	16,611	1,258
Si	20,879	1,084	19,432	4,113
P	0,130	0,047	0,133	0,029
S	0,084	0,070	0,148	0,068
Cl	0,040	0,053	0,059	0,035
K	0,439	0,189	0,840	0,226
Ca	1,315	1,521	1,285	0,548
Ti	0,644	0,065	0,606	0,089
V	0,034	0,040	0,014	0,025
Cr	0,007	0,008	0,004	0,006
Mn	0,093	0,037	0,073	0,031
Fe	8,679	1,783	20,624	4,749
Co	0,035	0,040	0,055	0,095
Ni	0,006	0,004	0,000	0,000
Cu	0,004	0,001	0,003	0,002
Zn	0,011	0,006	0,005	0,001
Ga	0,003	0,000	0,001	0,001
As	0,000	0,000	0,000	0,000
Rb	0,004	0,003	0,009	0,008
Sr	0,006	0,008	0,003	0,005
Zr	0,032	0,017	0,033	0,014
Pb	0,002	0,002	0,000	0,000
Pb	0,002	0,002	0,000	0,000

Nota:

^a M – Percentual em massa do elemento; ^b IC – Incerteza percentual do método na detecção do elemento

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 51/142
	RTC220103		REV. 2

Pontos receptores

Foi utilizada a média entre os perfis químicos de PM₁₀ coletados em filtros de Nylon e MCE nos pontos receptores amostrados (Estações Barra Longa Centro e Volta da Capela e Estação Gesteira), apresentados nas Tabelas 6.4 e 6.5.



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - AGOSTO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 52/142
		RTC220103	REV. 2

Tabela 6.4 – Composição química média e incerteza entre as amostras de PM₁₀ no ponto receptor avaliado na modelagem CMB – Campanhas 6,7 e 8 – Barra Longa

ELEMENTO	Campanha 6				Campanha 7				Campanha 8			
	CENTRO		VOLTA DA CAPELA		CENTRO		VOLTA DA CAPELA		CENTRO		VOLTA DA CAPELA	
	M [%] ^a	IC [%] ^b	M [%] ^a	IC [%] ^b	M [%] ^a	IC [%] ^b	M [%] ^a	IC [%] ^b	M [%] ^a	IC [%] ^b	M [%] ^a	IC [%] ^b
Na	0,575	0,222	1,503	0,696	0,790	0,182	0,975	0,071	0,926	0,093	1,411	0,836
Mg	0,194	0,007	0,473	0,117	0,338	0,012	0,358	<0,001	0,185	0,262	0,394	0,136
Al	2,345	0,574	5,114	1,212	3,530	1,163	4,600	1,069	8,036	0,669	7,022	0,583
Si	3,287	0,892	6,848	1,470	4,621	1,573	5,945	1,337	9,948	1,121	8,486	0,598
P	0,172	0,005	0,486	0,173	0,285	0,061	0,262	0,062	0,000	0,000	0,000	0,000
S	2,840	0,220	6,678	2,685	2,783	0,448	3,892	0,575	2,639	0,376	4,062	2,854
Cl	0,005	0,007	0,047	0,066	0,040	0,001	0,004	0,006	0,207	0,004	0,049	0,070
K	1,382	0,148	2,886	1,078	1,598	0,077	1,716	0,017	1,957	0,082	2,373	1,071
Ca	1,132	0,165	1,652	0,470	1,485	0,528	1,375	0,256	3,379	0,408	1,643	0,117
Ti	0,257	0,172	0,356	0,096	0,169	0,003	0,276	0,162	0,430	0,011	0,362	0,046
V	0,027	0,041	0,036	0,051	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,048	0,004	0,100	0,043	0,055	0,015	0,069	0,005	0,107	0,033	0,074	0,001
Fe	2,902	0,376	6,786	1,372	4,217	1,093	6,282	1,193	7,990	1,732	7,282	0,515
Ni	0,001	0,002	0,002	0,003	0,002	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cu	0,006	0,002	0,011	0,007	0,011	0,002	0,013	0,002	0,007	0,010	0,006	0,009
Zn	0,055	0,006	0,105	0,032	0,050	0,002	0,059	0,013	0,089	0,033	0,073	0,032
As	0,007	0,002	0,014	0,005	0,010	0,003	0,003	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
Se	0,000	0,000	0,005	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Br	0,006	<0,001	0,015	0,005	0,004	0,006	0,008	0,011	0,009	0,013	0,000	0,000
Rb	0,005	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sr	0,005	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Pb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,018	0,026	0,000	0,000

Nota:

^a M – Percentual em massa do elemento; ^b IC – Incerteza percentual do método na detecção do elemento



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - AGOSTO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 53/142
		RTC220103	REV. 2

Tabela 6.5 – Composição química média e incerteza entre as amostras de PM₁₀ no ponto receptor avaliado na modelagem CMB – Campanhas 6,7 e 8 - Gesteira

ELEMENTO	Campanha 6		Campanha 7		Campanha 8	
	M [%] ^a	IC [%] ^b	M [%] ^a	IC [%] ^b	M [%] ^a	IC [%] ^b
Na	1,206	0,555	0,954	0,163	1,446	0,145
Mg	0,325	0,132	0,295	0,009	0,000	0,000
Al	2,454	0,408	2,817	0,099	7,319	0,732
Si	2,839	0,408	3,207	0,007	6,978	0,698
P	0,506	0,274	0,347	0,072	0,000	0,000
S	6,219	1,789	3,710	0,794	3,706	0,371
Cl	0,000	0,000	0,000	0,000	0,087	0,009
K	2,659	0,871	1,740	0,187	2,387	0,239
Ca	0,866	0,191	0,904	0,106	1,615	0,161
Ti	0,113	0,105	0,012	0,018	0,535	0,054
Cr	0,012	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,049	0,022	0,057	0,016	0,095	0,010
Fe	3,752	0,746	4,283	0,069	7,138	0,714
Ni	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Cu	0,006	<0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	0,080	0,020	0,051	0,012	0,092	0,009
As	0,014	0,006	0,006	0,009	0,000	0,000
Se	0,003	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
Br	0,011	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
Rb	0,010	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000

Nota:

^a M – Percentual em massa do elemento

^b IC – Desvio padrão entre as amostras realizadas

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - AGOSTO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 54/142	
	RTC220103	REV. 2	

A Tabela 6.6 apresenta os resultados da modelagem CMB, contendo as contribuições de PM₁₀ para os pontos receptores analisados em Barra Longa (MG) e Gesteira (MG). Os arquivos de saída gerados pelo modelo CMB são apresentados no Anexo A.

Tabela 6.6 – Contribuição das fontes emissoras na concentração de PM₁₀ dos pontos receptores analisados durante as campanhas 6, 7 e 8 – Resultados da Modelagem CMB

Campanha	Receptor	Fonte emissora avaliada no modelo CMB	Contribuição no PM ₁₀
6	Centro	Agrupamento das vias de tráfego	11,07%
		Solo intacto	4,25%
		Total	15,32%
	Volta da Capela	Agrupamento das vias de tráfego	23,99%
		Solo intacto	10,86%
		Total	34,85%
	Gesteira	Vias não pavimentadas	16,03%
		Agrupamento das vias pavimentadas e solo intacto	0,00% ^a
		Total	16,03%
7	Centro	Agrupamento médio das fontes (vias e solo intacto)	25,37%
	Volta da Capela	Agrupamento médio das fontes (vias e solo intacto)	33,92%
	Gesteira	Vias não pavimentadas	18,32%
		Agrupamento das vias pavimentadas e solo intacto	0,00% ^a
		Total	18,32%
8	Centro	Agrupamento médio das fontes (vias e solo intacto)	51,11%
	Volta da Capela	Agrupamento médio das fontes (vias e solo intacto)	43,56%
	Gesteira	Vias não pavimentadas	26,86%
		Agrupamento das vias pavimentadas e solo intacto	14,72%
		Total	41,58%

Nota: ^a o modelo CMB indicou colinearidade entre o perfil do agrupamento médio das fontes (vias e solo intacto) e as vias não pavimentadas em Gesteira. O perfil de vias não pavimentadas foi utilizado com o representativo da localidade.

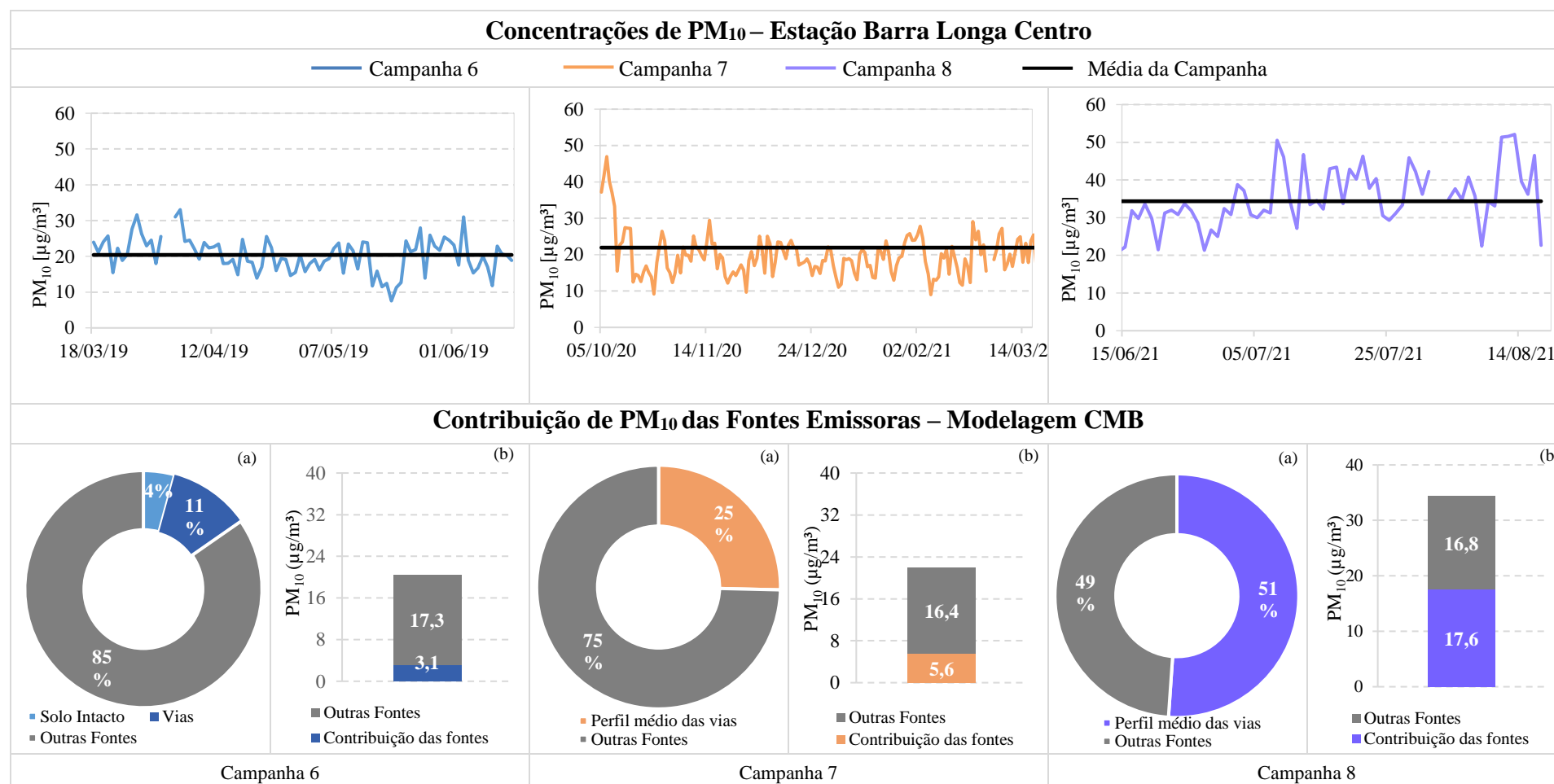
		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - AGOSTO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 55/142
	RTC220103		REV. 2

Pode ser observado que os percentuais totais, em massa, de contribuição das fontes alcançados pelo modelo não atingem 100%. Esse fato indica que há fontes emissoras (naturais e antropogênicas) em Barra Longa (MG) e Gesteira (MG) que contribuem para concentração de PM_{10} que não estão relacionadas às ações da FUNDAÇÃO e não foram mapeadas, sendo representadas a seguir pela nomenclatura “Outros”. Tais emissões podem ser provenientes, inclusive, de outras localidades, visto que o material analisado corresponde a uma fração fina do material particulado (PM_{10}) e, assim, possui maior tempo de residência na atmosfera quando comparada com as partículas totais em suspensão.

Analisando os gráficos referentes as campanhas 6, 7 e 8 em Barra Longa - Centro (Figura 6.1), observa-se que as maiores concentrações médias de 24h de PM_{10} foram de 33, 47 e 52 $\mu g/m^3$, o que representa cerca de 28, 39 e 43% do limite estabelecido na Resolução CONAMA nº 491/2018, respectivamente. As menores concentrações de 24h de PM_{10} foram de 8, 9 e 16 $\mu g/m^3$ para as campanhas 6, 7 e 8, nessa ordem. A concentração média de 24h de PM_{10} durante a campanha 6 foi de 20 $\mu g/m^3$, ao passo que na campanha 7 foi 22 $\mu g/m^3$ e na campanha 8 foi 34 $\mu g/m^3$. Os resultados do modelo CMB indicaram que a contribuição das fontes teve uma influência crescente nas concentrações de PM_{10} com o passar das campanhas, saindo de 15% de contribuição na campanha 6 e alcançando 51% de contribuição na campanha 8.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - AGOSTO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 56/142	
	RTC220103	REV. 2	

Figura 6.1 – Evolução das concentrações diárias de PM₁₀ e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor estação de monitoramento de qualidade do ar Barra Longa Centro



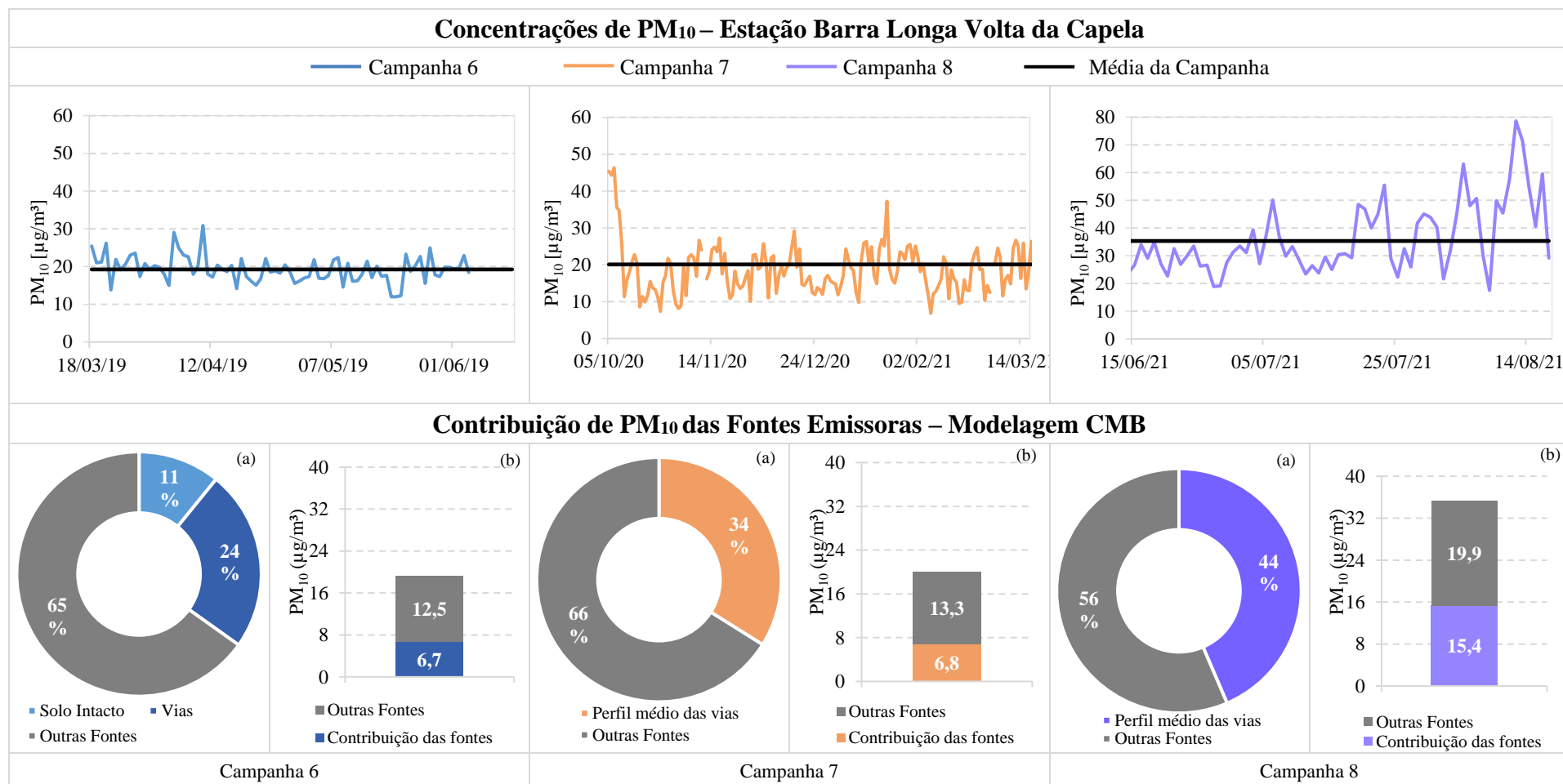
Nota: (a) Contribuição percentual de PM₁₀; (b) Contribuição em termos de concentração de PM₁₀.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - AGOSTO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 57/142
	RTC220103		REV. 2



Na localidade de Barra Longa – Volta da Capela, conforme a Figura 6.2, as maiores concentrações médias de 24h de PM₁₀ foram de 31, 46 e 79 µg/m³, o que representa cerca de 26, 39 e 66% do limite estabelecido na Resolução CONAMA nº 491/2018, respectivamente. Por outro lado, as menores concentrações de 24h de PM₁₀ foram de 12, 7 e 16 µg/m³ para as campanhas 6, 7 e 8, nessa ordem. Com relação a concentração média de 24h de PM₁₀, esta foi de 19 µg/m³ durante a campanha 6, ao passo que na campanha 7 foi 20 µg/m³ e na campanha 8 foi 35 µg/m³. Os resultados do modelo CMB apresentaram contribuições médias das fontes emissoras de 35%, 34% e 44% para as campanhas 6, 7 e 8, respectivamente.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 58/142	
	RTC220103	REV. 2	

Figura 6.2 – Evolução das concentrações diárias de PM₁₀ e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor estação de monitoramento de qualidade do ar Barra Longa Volta da Capela



Nota: (a) Contribuição percentual de PM₁₀; (b) Contribuição em termos de concentração de PM₁₀.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - AGOSTO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 59/142
	RTC220103		REV. 2

Na localidade de Gesteira (MG) (Figura 6.3), foram utilizados os perfis das fontes emissoras das vias não pavimentadas e do Agrupamento das vias pavimentadas e solo intacto, entretanto, para as campanhas 6 e 7 esses dois perfis foram classificados como colineares pelo modelo CMB. Dessa forma, o perfil das vias não pavimentadas foi representativo para indicar a contribuição das fontes durante essas campanhas. Na campanha 8, o modelo CMB conseguiu distinguir a contribuição individual desses dois perfis.

As maiores concentrações médias de 24h de PM_{10} foram de 28, 65 e 45 $\mu g/m^3$, o que representa cerca de 23, 54 e 37% do limite estabelecido na Resolução CONAMA nº 491/2018, respectivamente para as campanhas 6, 7 e 8. Por outro lado, as menores concentrações de 24h de PM_{10} foram de 6, 11 e 10 $\mu g/m^3$ para as campanhas 6, 7 e 8, nessa ordem. Com relação a concentração média de 24h de PM_{10} , esta foi de 16 $\mu g/m^3$ durante a campanha 6, ao passo que na campanha 7 foi 20 $\mu g/m^3$ e na campanha 8 foi 21 $\mu g/m^3$. Os resultados do modelo CMB apresentaram contribuições média das fontes de Gesteira de 16%, 18% e 42% para as campanhas 6, 7 e 8, respectivamente.

Ao longo das campanhas realizadas, observou-se um aumento gradual nas contribuições dos grupos de fontes ao longo das campanhas 6, 7 e 8, exceto na campanha 7 na localidade de Gesteira. De forma similar, foi observado esse mesmo comportamento com a média das concentrações de 24h de PM_{10} , sugerindo que o aumento das contribuições dos grupos de fontes é reflexo do aumento das concentrações de material particulado na localidade em questão. Adicionalmente, observa-se que a maior parte da contribuição para as concentrações de PM_{10} é proveniente das fontes emissoras que não foram mapeadas.


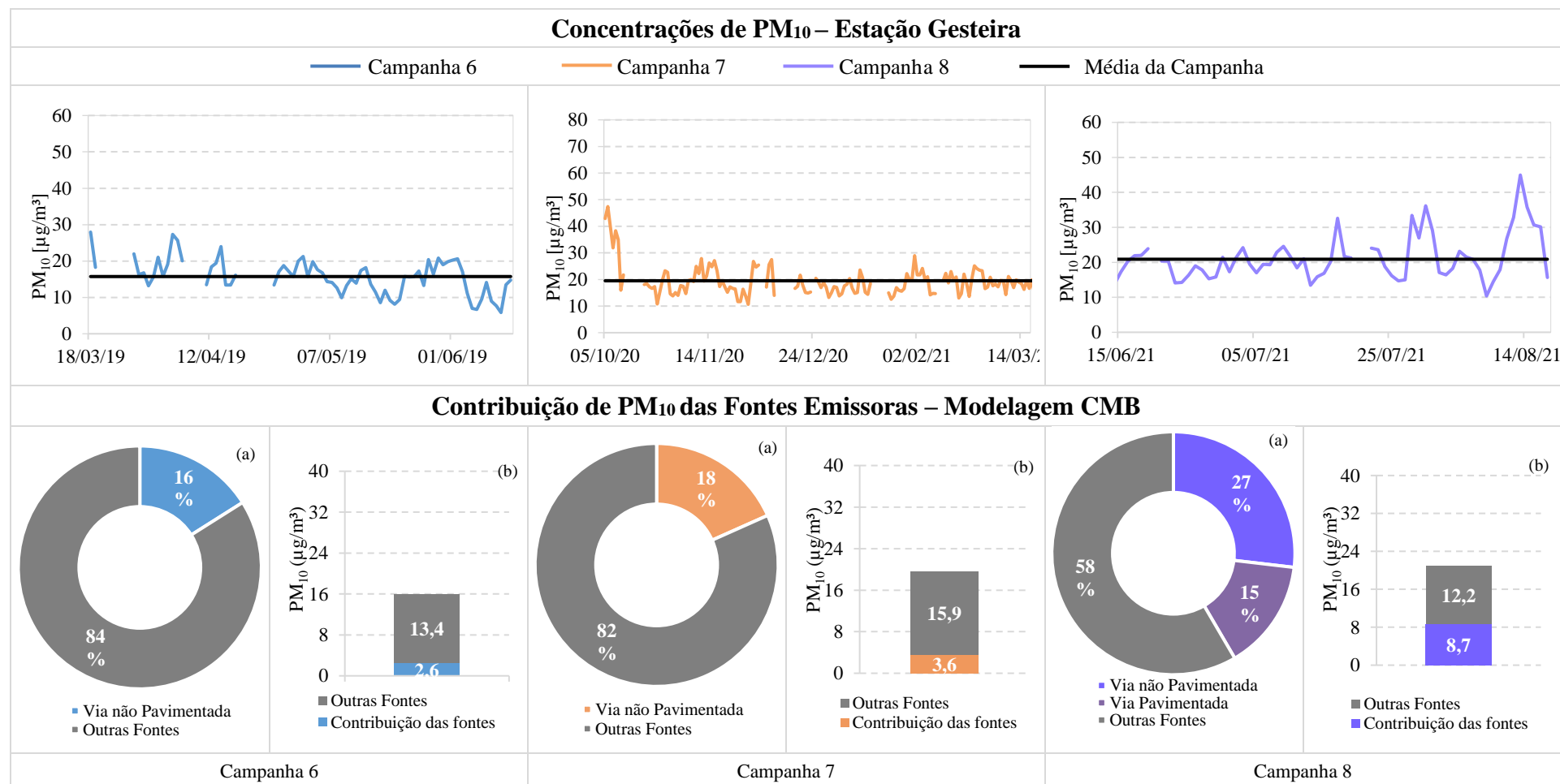

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 60/142	
	RTC220103	REV. 2	

Figura 6.3 – Evolução das concentrações diárias de PM₁₀ e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor estação de monitoramento de qualidade do ar Gesteira



Nota: (a) Contribuição percentual de PM₁₀; (b) Contribuição em termos de concentração de PM₁₀.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 61/142
	RTC220103		REV. 2

6.3. Considerações sobre o modelo CMB

A aplicação do modelo CMB é dependente do atendimento de premissas para a solução dos sistemas lineares que descrevem o balanço de massa químico e possibilita estabelecer uma relação de contribuição das fontes emissoras para os pontos receptores analisados.

Notoriamente, à medida que os perfis químicos que descrevem as fontes emissoras se aproximam entre si, ocorre o aumento da similaridade, descrita em termos do CMB como colinearidade. Assim, progressivamente a aplicação do CMB se torna mais complexa e com menor capacidade de descrever as relações entre fontes emissoras e receptores.

No caso de Barra Longa (MG), com base na caracterização química das fontes emissoras, realizada ao longo do tempo, em diferentes campanhas de amostragem é possível observar um aumento da similaridade entre essas fontes (Figura 6.4). Portanto, a aplicação do modelo CMB vem se tornando um desafio em função da colinearidade entre os perfis das fontes emissoras que potencialmente contribuem na qualidade do ar da região.

A evolução dos teores de ferro (Fe) nas amostras das fontes emissoras de material particulado na região de Barra Longa (MG) indica uma tendência de redução ao longo das campanhas de caracterização química indicou uma tendência de retorno dessas fontes emissoras aos níveis de concentração de ferro similares ao do solo intacto da região. Esse comportamento é esperado, uma vez que as ações mais críticas de remoção e transporte do material afetado pelo rejeito (material com maiores teores de ferro) foram, em grande parte, finalizadas. A Figura 6.4 apresenta a evolução do teor de ferro nas amostras de fontes de Barra Longa, Centro e Volta da Capela.



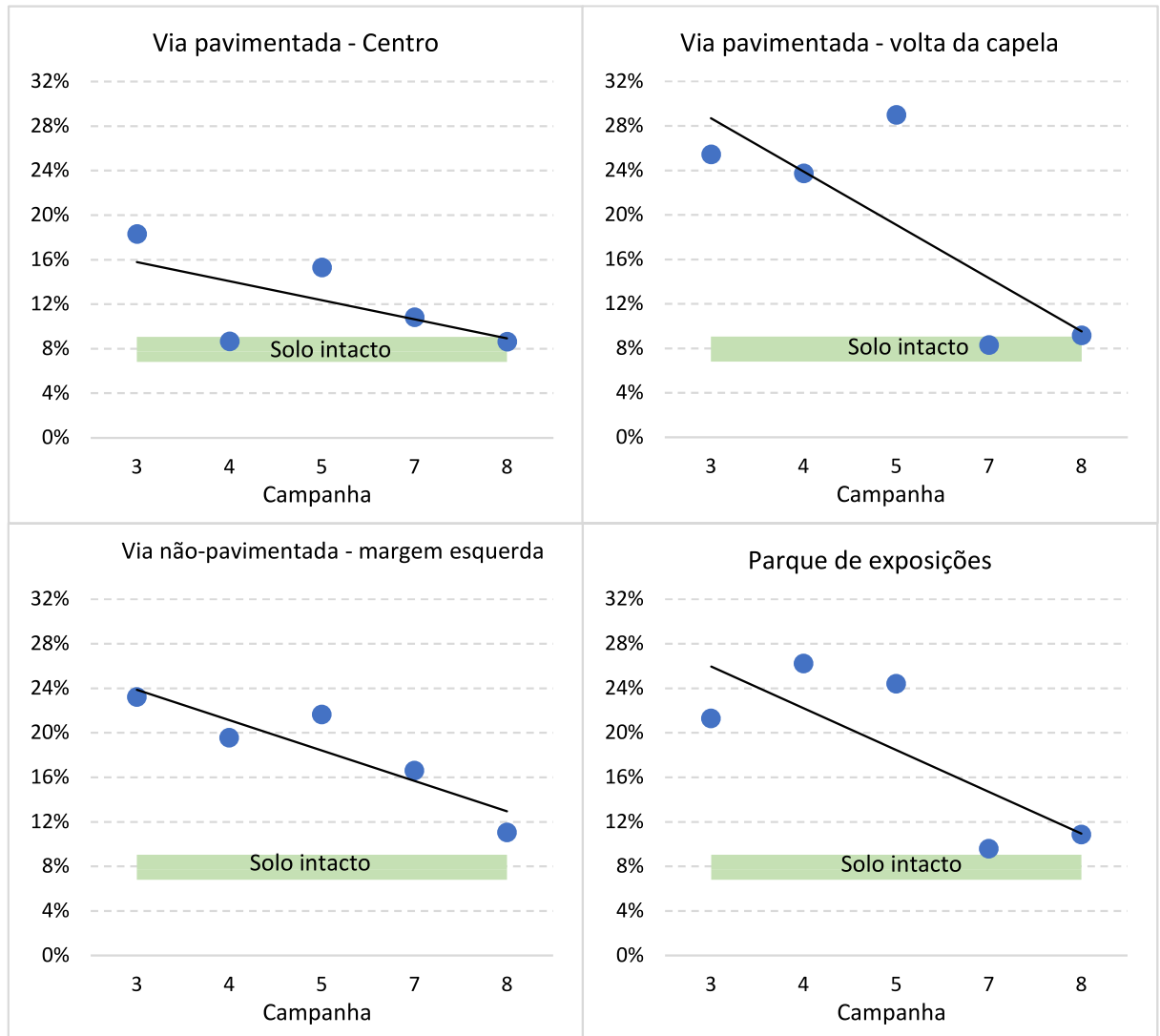


		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 62/142
		RTC220103	REV. 2

Figura 6.4 – Concentração de Ferro (Fe) nas amostras de fontes emissoras em Barra Longa ao longo do histórico de todas as campanhas de caracterização química. A área em verde representa o ter de Ferro nas amostras de solo intacto coletadas na região no mesmo período.



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 63/142
	RTC220103		REV. 2

7. Potenciais efeitos para a saúde

A seleção dos elementos químicos descritos neste capítulo (Al, As, Cd, Pb, Cu, Fe, Mn, Ni, Si e Zn) levou em consideração sua abundância em relação às análises químicas das amostras coletadas nos pontos receptores, realizadas com PIXE, bem como sua relevância em termos de efeitos para a saúde humana. Os elementos Fe, Al e Si são os mais abundantes encontrados nas análises químicas, contudo, a relevância dos demais elementos justifica-se pelo elevado potencial de toxicidade deles.



Para avaliar os possíveis riscos à saúde associados à exposição em decorrência da inalação destes elementos, foi utilizado como documento base o “*Toxicological Profiles*” da Agência de Registro de Substâncias Tóxicas e Doenças (ATSDR). Além disso, estudos adicionais de outros autores foram abordados.

Objetivando a obtenção de resultados que permitissem concluir sobre a existência ou não de efeitos nocivos à saúde foram analisados limites de risco mínimo (minimal risk levels – MRLs). Um MRL é definido como uma estimativa da exposição humana diária a uma substância que provavelmente não tem risco apreciável de efeitos adversos (não-cancerígenos) durante uma duração específica de exposição. MRLs são definidos quando existem dados confiáveis e suficientes para identificar os efeitos de saúde por uma duração específica dentro de uma determinada rota de exposição, baseando-se em efeitos de saúde não cancerígenos, não considerando efeitos cancerígenos. Além disso, podem ser derivados para exposições de duração aguda, intermediária e crônica para inalação.

Na ausência de MRLs, foram utilizados padrões de concentração em esfera federal e de referências internacionais. Através do exposto, tornou-se possível avaliar a possibilidade da ocorrência de impactos negativos à saúde da população, através das concentrações encontradas nas Estações Barra Longa Centro, Volta da Capela e Gesteira.

Os limites de referência identificados foram comparados com as concentrações dos elementos estimadas considerando a maior fração mássica observada dentre as amostras (obtidas pelo método PIXE), com a maior concentração do poluente PM₁₀ obtida pelo monitoramento da qualidade do ar (Estações Barra Longa Centro, Volta da Capela e Gesteira).

A maioria das informações sobre os efeitos na saúde resultantes da inalação são derivadas de estudos em condições ocupacionais. Contudo, alguns desses estudos tem como limitação a exposição simultânea dos trabalhadores a outros metais e elementos químicos, além

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 64/142
	RTC220103		REV. 2

da possível absorção pelas vias oral e dérmica, tornando difícil assegurar quais efeitos são especificamente decorrentes da inalação do elemento. Portanto, para revisão dos potenciais efeitos para a saúde, buscou-se utilizar apenas estudos que realizaram alguma forma de controle dessas variáveis.

7.1. Alumínio



De acordo com o “*Toxicological Profile for Aluminum*” (ATSDR, 2008) o sistema nervoso e os pulmões podem ser os alvos mais sensíveis de toxicidade após exposição por inalação de alumínio. Tais estudos sugerem que a inalação de poeira e fumaça de alumínio podem estar relacionadas com a exposição crônica ao alumínio e efeitos neurológicos subclínicos, prejudicando, por exemplo, testes neurocomportamentais para desempenho psicomotor e cognitivo, além do aumento da incidência de sintomas neurológicos subjetivos. Algumas pesquisas também indicam que possivelmente tais efeitos cognitivos prejudicados possam ser um indicador pré-clínico da doença de Alzheimer (POLIZZI et al. 2002).

Os sintomas de longo prazo provenientes da superexposição a pós finos de alumínio podem incluir dispnéia, tosse e fraqueza (MITCHELL, 1959). Outros efeitos que foram observados em diversos estudos incluem também asma e fibrose pulmonar. Além disso, estudos epidemiológicos em humanos e animais não apresentaram evidências que o alumínio seja potencialmente carcinogênico após a exposição por inalação (HATHAWAY; PROCTOR, 2004).

Waldron-Edward et al. (1971) observaram em um estudo o prolongamento do tempo de protombina em pessoas expostas cronicamente por inalação a poeira de alumínio. Tal fato sugere que o aumento dos níveis séricos de alumínio pode ser usado como efeito antitrombogênico.

Perl e Good (1987) e Zatta et al. (1993) demonstraram que o alumínio pode entrar diretamente no cérebro via o trato olfativo. O alumínio atravessa o epitélio nasal e alcança o cérebro via transporte axonal.

Durante a exposição por inalação ao alumínio e seus compostos, os pulmões distribuem e depositam o material com base no tamanho da partícula (ICRP, 1994). Uma porção das partículas é exalada, algumas ficam presas nas nasofaríngeas e nas áreas respiratórias superiores e são depositadas no trato gastrointestinal por movimento e ação mucociliar, e uma parte das

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 65/142
	RTC220103		REV. 2

pequenas partículas atingem os alvéolos. Nos alvéolos, elas podem ser transferidas para o sangue, ou serem absorvidas por macrófagos alveolares através de fagocitose e transportadas para os gânglios linfáticos pulmonares.

O *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH, 2014) recomenda, para os casos de exposição a alumínio, um limite de 10.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para as partículas totais e 5.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para a fração respirável ($\text{PM}_{2.5}$) considerando a referência temporal de 10 horas. Os valores obtidos para a máxima de 1 hora na Estação Barra Longa Centro para as Campanhas 6, 7 e 8, respectivamente, foram 4,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 7,74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 16,16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 7.1). As máximas de 1 hora para as três campanhas (6,7 e 8) para a Estação Barra Longa Volta da Capela foram de 9,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10,76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 18,58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, nesta ordem (Tabela 7.2). E as máximas de 1 hora para a Estação Gesteira foram de 3,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 11,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 13,47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente para cada uma das campanhas (6, 7 e 8) (Tabela 7.3). Dessa forma, pode-se dizer que as concentrações de alumínio obtidas nas localidades estão muito abaixo do padrão citado anteriormente. Tal análise pode ser realizada com as concentrações máximas de 1 hora, as quais são mais elevadas em comparação com as concentrações para um período de 10 horas. As concentrações não ultrapassam ao valor estabelecido pela NIOSH, e como as médias horárias tendem a ser superiores as médias de 10 horas, esta análise garante um maior nível de segurança. Além disso, os valores obtidos para PM_{10} também foram muito inferiores quando comparados ao padrão do $\text{PM}_{2.5}$ (5.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), o que também representa uma abordagem conservadora em favor da segurança da análise.



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 66/142
		RTC220103	REV. 2

Tabela 7.1 – Concentração de alumínio na Estação de Barra Longa Centro

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	4,05	7,74	16,16
Máxima de 24 horas	1,35	2,04	4,43
Média do Período	0,83	0,95	2,92


Tabela 7.2 – Concentração de alumínio na Estação de Barra Longa Volta da Capela

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	9,07	10,76	18,58
Máxima de 24 horas	1,84	2,48	5,84
Média do Período	1,15	1,07	2,62

Tabela 7.3 – Concentração de alumínio na Estação de Gesteira

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	3,07	11,78	13,47
Máxima de 24 horas	0,76	1,87	3,29
Média do Período	0,43	0,56	1,52

Portanto, pode-se dizer que as concentrações de alumínio obtidas para as Estações Centro, Volta da Capela e Gesteira não apresentam níveis mínimos de riscos à saúde da população quando comparados com a recomendação feita pela NIOSH.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 67/142
	RTC220103		REV. 2

7.2. Arsênio

O arsênio pode ser encontrado no meio ambiente tanto em formas orgânicas quanto inorgânicas. No entanto, a maioria dos casos de intoxicação humana por arsênio está associada a exposição ao arsênio inorgânico. A inalação de arsênio pode provocar diversos efeitos na saúde humana, variando desde manifestações na pele até complicações no sistema respiratório.



O surgimento recorrente de dermatites foi observado em pessoas expostas ao arsênio no ar, com a maior incidência ocorrendo em trabalhadores sujeitos às exposições mais intensas (DUNLAP, 1921; HOLMQVIST, 1951; PINTO; MCGILL, 1953; LAGERKVIST et al., 1986; CÖL et al., 1999). Outros efeitos consequentes da inalação de arsênio são: aumento da pigmentação da pele, queratose, hiperqueratose e surgimento de verrugas (PERRY et al., 1948).

A inalação de poeira de arsênio pode provocar irritações das mucosas do nariz e da garganta, resultando em laringites, bronquites e rinites (DUNLAP, 1921; PINTO e MCGILL, 1953; MORTON e CARON, 1989). Exposições mais intensas, tipicamente ocupacionais, podem causar a perfuração do septo nasal (DUNLAP, 1921; PINTO e MCGILL, 1953; SANDSTROM et al., 1989).

No que tange aos impactos cardiovasculares, a inalação crônica de arsênio está associada à ocorrência do “*Fenômeno de Raynaud*”, (doença vascular periférica caracterizada por espasmos nas artérias e dormência dos dedos) e do aumento das contrações dos vasos sanguíneos (LAGERKVIST et al., 1986). Também são relatados problemas neurológicos associados a inalação crônica de arsênio, como a diminuição da velocidade de condução dos estímulos nervosos (LAGERKVIST e ZETTERLUND, 1994).

Existem diversos estudos que evidenciam que a inalação de arsênio aumenta o risco de câncer de pulmão (ENTERLINE e MARSH, 1982; ENTERLINE et al., 1987, 1995; MAZUMDAR et al., 1989). A *International Agency for Research on Cancer* (IARC) e a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) classificam o arsênio como carcinogênico para humanos (ATSDR, 2007).

Não há registros de caso de morte por inalação de arsênio em períodos de exposição aguda. Isto indica que, mesmo em situações de altas concentrações de arsênio no ambiente de trabalho (de 1 a 100 mg/m³), como constatados em diferentes estudos (ENTERLINE e MARSH, 1982; JÄRUP et al., 1989; LEE-FELDSTEIN, 1986), o arsênio não apresenta risco de morte por inalação aguda.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 68/142
	RTC220103		REV. 2

Visando minimizar os impactos decorrentes da exposição aos poluentes atmosféricos e buscando garantir a saúde da população, a União Europeia determinou padrões de concentração a serem seguidos para diversos poluentes. Para o arsênio, a concentração limite é de 6 mg/m³ (0,006 µg/m³) para a média do período de um ano (EUROPEAN COMISSION, 2019). As Tabelas 7.4, 7.5 e 7.6 indicam os valores de concentração obtidos nas Estações de Monitoramento Barra Longa Centro, Volta da Capela e Gesteira, respectivamente.

Tabela 7.4 – Concentração de arsênio na Estação de Barra Longa Centro

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE ARSÊNIO [µg/m ³]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,012	0,020	< LD
Máxima de 24 horas	0,004	0,005	< LD
Média do Período	0,002	0,002	< LD

Nota: < LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.

Tabela 7.5 – Concentração de arsênio na Estação de Barra Longa Volta da Capela

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE ARSÊNIO [µg/m ³]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,027	0,012	< LD
Máxima de 24 horas	0,005	0,003	< LD
Média do Período	0,003	0,001	< LD

Nota: < LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.


		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 69/142
	RTC220103		REV. 2

Tabela 7.6 – Concentração de arsênio na Estação de Gesteira

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE ARSÊNIO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,020	0,052	< LD
Máxima de 24 horas	0,005	0,008	< LD
Média do Período	0,003	0,002	< LD

Nota: < LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.



Cabe ressaltar que, a média do período de cada Campanha foi obtida com base em diferentes períodos de monitoramento. Foram cerca de 3 meses na Campanha 6, 7 meses na Campanha 7 e 2 meses na Campanha 8, enquanto o padrão adotado pela União Europeia utiliza a média anual. Por ser uma comparação de médias de concentração para intervalos de tempo diferentes, espera-se maiores concentrações nos menores intervalos de tempo. No entanto, verifica-se que as concentrações médias obtidas nas campanhas são inferiores a $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$, atendendo aos padrões estabelecidos pela União Europeia para as três estações, portanto, pode-se concluir que a população não estaria exposta aos efeitos na saúde ocasionados pela inalação do arsênio.

7.3. Cádmio

As propriedades toxicológicas do cádmio são similares para diferentes sais e óxidos de cádmio, apesar das diferenças na absorção e distribuição levarem a diferentes níveis de efeito. Para a exposição por inalação, o tamanho e solubilidade da partícula em fluidos biológicos são fatores determinantes da toxicocinética (movimento do agente tóxico dentro do organismo).

A exposição aguda ao cádmio por inalação, em concentrações acima de $5 \text{ mg}/\text{m}^3$, pode ocasionar a destruição das células epiteliais pulmonares, provocando edema pulmonar, traqueobronquite e pneumonia. Uma única exposição com concentração elevada de cádmio pode comprometer alguma função pulmonar no longo prazo.

Diversos estudos têm mostrado que a exposição aguda ao cádmio pela inalação pode causar morte em humanos. Durante a exposição aguda, todos os sintomas são, em geral, suaves. Contudo, em poucos dias seguidos de exposição, é possível desenvolver um edema pulmonar e

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 70/142
	RTC220103		REV. 2



pneumonia química, conduzindo à morte devido a falência do sistema respiratório (BETON et al., 1966; LUCAS et al., 1980; PATWARDHAN e FINCKH 1976; SEIDAL et al. 1993).

Em resposta aos danos pulmonares, a nível celular, ocorre um decréscimo da catalase, superóxido dismutase, sulfidril não proteica, glicose-6-fosfato desidrogenase e a glutathione peroxidase. Normalmente, existe hiperplasia dos pneumócitos tipo 2, em decorrência dos danos e necrose das células do tipo 1.

A inalação a longo prazo com níveis mais baixos de cádmio está associada ao decréscimo da função dos pulmões e à enfisema pulmonar, o qual pode ser agravado, caso ocorra em fumantes. Além disso, também é possível ocasionar danos à função olfativa e ao epitélio nasal. Contudo, a função respiratória pode ser recuperada após o término da exposição ao cádmio. Adicionalmente, pode ocorrer exposição ao trato gastrointestinal quando a poeira é removida dos pulmões por limpeza mucociliar e na sequência, ingerida.

Estudos não detectaram efeitos cardiovasculares em humanos expostos à inalação de cádmio (ARMSTRONG; KAZANTZIS, 1983; DE KORT et al., 1987; FRIBERG, 1950; KAZANTZIS et al., 1988; SMITH et al., 1980; SORAHAN; WATERHOUSE, 1983; STAESSEN; LAUWERYS, 1993). Adicionalmente, não foram detectados efeitos gastrointestinais, dermais, oculares, no sistema reprodutivo, associados ao peso corporal e ao crescimento e desenvolvimento humano (BARNHART; ROSENSTOCK, 1984; BONNELL, 1955; FRIBERG, 1950; RUSCH et al., 1986), e os efeitos hematológicos não são conclusivos quanto aos possíveis efeitos na saúde (BERNARD et al., 1979; BONNELL, 1955; CHAN et al., 1988; DAVISON et al., 1988; FRIBERG, 1950; KAGAMIMORI et al., 1986). Ainda, doenças no fígado (efeitos hepáticos) não estão diretamente associadas à inalação de cádmio.

Diversos estudos evidenciam que o rim é um dos principais órgãos suscetíveis à toxicidade devido à inalação de cádmio. A exposição ao cádmio e seus compostos pode ocasionar em anormalidade na função renal, indicado pela proteinúria e uma diminuição na taxa de filtração glomerular. Um dos principais sinais de efeitos renais é a disfunção tubular caracterizada por um aumento da excreção urinária de proteínas de baixo peso molecular (β 2-microglobulina, α 1-microglobulina e proteínas de ligação ao retinol) ou enzimas intracelulares, como a N-acetil- β -glucosaminidase (BERNARD et al., 1990; CHEN et al., 2006a, 2006b; CHIA et al., 1992; ELINDER et al., 1985b; FALCK et al., 1983; JAKUBOWSKI et al., 1987, 1992; JÄRUP; ELINDER, 1994; JÄRUP et al., 1988; KAWADA et al., 1989; ROELS et al.,

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 71/142
	RTC220103		REV. 2



1993; SHAIKH et al., 1987; THUN et al., 1989; TOFFOLETTO et al., 1992; VERSCHOOR et al., 1987).

Outro efeito renal ocasionado pela inalação de altas concentrações de cádmio refere-se ao aumento da formação de cálculos renais, o qual é caracterizado como efeito secundário devido à interrupção do metabolismo do cálcio causado pelos danos nos rins (ELINDER et al., 1985a; FALCK et al., 1983; JÄRUP; ELINDER, 1993; KAZANTZIS, 1979; SCOTT et al., 1978; THUN et al., 1989; TREVISAN; GARDIN, 2005). Além disso, a exposição a altas concentrações pode ocasionar danos irreversíveis nos rins (ELINDER et al., 1985b; JÄRUP et al., 1993; MASON et al., 1999; PISCATOR, 1984; ROELS et al., 1989; THUN et al., 1989). Quanto à exposição crônica, existem fortes evidências que a associam a efeitos renais, apesar de não ser detectado um limiar de toxicidade. A exposição crônica a altos níveis de cádmio pode ocasionar na redução da taxa de filtração glomerular (FRIBERG, 1950; JÄRUP et al., 1995; ROELS et al., 1991).

Quanto aos efeitos imunológicos e linforreticulares, estudos identificaram uma leve alteração no sangue, com uma redução de espécies reativas de oxigênio por leucócitos, e ainda, alteração na quantidade de monócitos, estando estes significativamente aumentados (GUILLARD; LAUWERYS, 1989; KARAKAYA et al., 1994). Quanto às exposições com duração intermediária, foi observado por Kutzman et al. (1986) o aumento de peso do baço, com ocorrência de hiperplasia linfóide.

Os efeitos neurológicos identificados em indivíduos consistiram em uma leve diminuição no desempenho ligado à atenção, velocidade psicomotora e memória, como relatado por Hart et al. (1989). Em alguns indivíduos pôde-se observar um significativo comprometimento olfativo (ROSE et al., 1992). Adicionalmente, em alguns casos, para os indivíduos com altos níveis de cádmio urinário e proteinúria tubular, foram observadas disfunções olfativas significantes e defeitos seletivos no limiar de detecção de odor. Quanto aos efeitos musculoesqueléticos, estudos apontam osteoporose, osteomalacia e deficiência de cálcio na ocorrência de exposição a longo prazo (ADAMS et al. 1969; BLAINEY et al., 1980; BONNELL, 1955; KAZANTZIS, 1979; SCOTT et al., 1980).

Estudos quanto a ocorrência ou não de câncer no pulmão pela exposição por inalação do cádmio são inconclusivos. Alguns estudos trazem evidências de efeitos cancerígenos (STAYNER et al., 1992; THUN et al., 1985), enquanto outros não comprovam tais conclusões

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 72/142
	RTC220103		REV. 2

(LAMM et al., 1992, 1994; SORAHAN; LANCASHIRE, 1997). A inconsistência ocorre pelo número pequeno número de casos com câncer no pulmão, como também pela exposição ao cádmio associada a outros compostos, como o arsênio.



Contudo, o DHHS (*Department of Health and Human Services*) estabelece que existem dados suficientes para concluir que o cádmio é carcinogênico em humanos. Da mesma maneira, a IARC (*International Agency for Research on Cancer*) classificou o cádmio como carcinogênico. A USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) classificou o cádmio como possível elemento carcinogênico por inalação, baseado na avaliação de evidências limitadas do aumento do câncer de pulmão em humanos, e em evidências suficientes de câncer do pulmão em ratos (IARC, 1993; IRIS, 2012; NTP, 2011).

O nível de risco mínimo (MRL) estabelecido para a exposição aguda por inalação do cádmio é de 0,03 $\mu\text{g Cd/m}^3$, para um tempo de exposição de 14 dias. Por sua vez, o nível de risco mínimo (MRL) para a exposição crônica ao cádmio por inalação é de 0,01 $\mu\text{g Cd/m}^3$, para um período de 1 (um) ano de exposição. Além disso, a Comissão Europeia estabelece padrão de qualidade do ar do elemento cádmio como 5 ng/m^3 para média do período de 1 ano (EUROPEAN COMMISSION, 2019). Da mesma forma, o Governo de Ontario, no Canadá, estabelece o padrão de qualidade do ar do cádmio de 0,005 $\mu\text{g/m}^3$ para média anual e 0,025 $\mu\text{g/m}^3$ para as concentrações médias de 24 horas (GOVERNMENT OF ONTARIO, 2019).

O elemento cádmio não foi detectado pelo método PIXE nas amostras de pontos receptores, conforme pode ser observado na seção 5 e Apêndice A. Considerando a alta sensibilidade para detecção dos elementos químicos (ordem ppm, podendo chegar a ppb) do método PIXE, e considerando os limites de referência supracitados, pode-se concluir que a população não estaria exposta aos efeitos na saúde ocasionados pela inalação do cádmio.

7.4. Chumbo

Segundo James et al. (1994), o chumbo está contido no ar ambiente na forma de aerossóis de partículas e, quando inalado, pode depositar-se no interior do trato respiratório. Sua absorção pode ser influenciada pela solubilidade e tamanho das partículas, bem como pelo padrão de deposição no interior do trato (BAYLEY; ROY, 1994). Tais partículas quando existentes em menores diâmetros podem ser absorvidas quase em sua totalidade, ao passo que

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 73/142
	RTC220103		REV. 2



as partículas maiores são transportadas por deposição mucociliar. Ao adentrar-se ao corpo humano, o chumbo pode acumular-se no sangue, tecidos e ossos (WHO, 2000).

De acordo com o “*Toxicological Profile for Lead*” (ATSDR, 2019), os estudos realizados concernentes aos efeitos causados pela inalação de chumbo concluíram que todos os sistemas de órgãos corporais sofrem efeitos adversos. Tal fato ocorre, pois, o chumbo é amplamente distribuído pelo corpo e os mecanismos que levam à toxicidade estão presentes em todos os tipos de células. Os principais efeitos negativos à saúde observados ocorreram na faixa de concentração de 5 a 50 microgramas (μg) de chumbo para cada decilitro (dL) de sangue. Estes efeitos ocorrem em adultos e são ainda comumente manifestados em crianças, devido à sua maior ocorrência de exposição e suscetibilidade. Contudo, em estudos posteriores observou-se a ocorrência de efeitos em concentrações menores que 5 μg por dL de sangue, sendo este o valor de referência mais restritivo, para o qual foram percebidos efeitos nocivos à saúde.

Foram observadas alterações neurológicas em crianças, com decréscimos ainda nas funções cognitivas e alterações comportamentais. Em adultos, também foram observados estes efeitos, além de sintomas psiquiátricos e alterações no volume cerebral. Pesquisas detectaram ainda danos renais, alterações cardiovasculares danosas e aumento da pressão sanguínea, aumento do risco de hipertensão e doenças cardíacas, além de aumento da mortalidade por doenças cardiovasculares. Alguns efeitos hematológicos como a redução da hemoglobina e perda de eritrócitos também foram notados. Pesquisas epidemiológicas constataram que a exposição ao chumbo pode causar perturbações ao sistema imunológico de adultos e crianças.

Além disso, notaram-se danos ao sistema reprodutor masculino e feminino, e efeitos prejudiciais ao desenvolvimento em crianças e adolescentes. Alterações nocivas ao trato respiratório, como obstrução e diminuição da função pulmonar e aumento de riscos de asma também foram identificados. Os prejuízos hepáticos dizem respeito ao aumento do fígado e da espessura da vesícula biliar, bem como acréscimos no colesterol e enzimas hepáticas. Complementarmente, foram observadas alterações endócrinas, além de problemas gastrointestinais, musculoesqueléticos, oculares e ocorrências cancerígenas (ATSDR, 2019).

Segundo a Organização Mundial da Saúde, em *Air Quality Guidelines for Europe* (WHO, 2000), para orientar quanto às concentrações de chumbo presentes no ar, são utilizadas comparações baseadas na quantidade de chumbo contido no sangue do indivíduo. Isto posto,

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 74/142	
	RTC220103	REV. 2	

analisando a comparação mais restritiva, o documento considera que a cada 1 µg de chumbo por metro cúbico (m³) de ar seja responsável pela contribuição de 19 µg de chumbo por litro de sangue, aproximadamente. Baseando-se nisso, estipula-se que o valor de 5 µg/dL estudado seja equivalente a concentração de 2,63 µg/m³.



Com vistas a minimizar os efeitos nocivos à saúde populacional corroborados pela inalação deste elemento, a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2000) recomenda que não seja ultrapassado o valor de 0,5 µg/m³ ao longo do período de 1 (um) ano. Além disso, a Resolução Conama nº 491 de 19 de novembro de 2018, que estabelece padrões de qualidade do ar, também prevê o valor de 0,5 µg/m³ para a média do período, sendo este menor em relação à concentração de 2,63 µg/m³ para qual foram observados efeitos adversos à saúde e considerado, portanto, mais restritivo.

A Tabela 7.7 indica os valores de concentração de Pb obtidos nas amostras da Estação Barra Longa Centro e, verifica-se que o elemento foi detectado somente na campanha 8. Adicionalmente, ressalta-se que para as outras estações (Volta da Capela e Gesteira) não foram detectados o elemento em questão. Na Campanha 8 da Estação Barra Longa Centro a concentração detectada foi de pelo menos dez vezes menores do que o valor de concentração de 0,5 µg/m³, estabelecido como padrão de qualidade do ar pela Resolução CONAMA 491/2018 e pela Organização Mundial da Saúde. Isto posto, pode-se concluir que a população não estaria exposta aos efeitos na saúde ocasionados pela inalação do chumbo.

Tabela 7.7 – Concentração de chumbo na estação Barra Longa Centro

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE CHUMBO [µg/m ³]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	< LD	< LD	0,069
Máxima de 24 horas	< LD	< LD	0,019
Média do Período	< LD	< LD	0,012

Nota: < LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 75/142
	RTC220103		REV. 2

7.5. Cobre

De acordo com o “*Toxicological Profile for Copper*” (ATSDR, 2004) os estudos acerca da exposição por inalação de cobre não retratam da morte de humanos e animais. Da mesma maneira, tem-se ausência de efeitos cardiovasculares, musculoesqueléticos, renais, dérmicos ou de peso corporal.

A inalação do cobre, ou mesmo compostos contendo cobre, está associada a efeitos respiratórios, gastrointestinais, hematológicos, hepáticos, oculares, neurológicos e reprodutivos. Os efeitos respiratórios referem-se à irritação respiratória, incluindo tosse, espirros, dor torácica, e coriza. Estudos também mostram efeitos como fibrose pulmonar linear, nodulação e aumento da vascularização na mucosa nasal (ASKERGREN e MELLGREN, 1975; SUCIU et al., 1981).



Os efeitos gastrointestinais estão associados a anorexia, náusea e diarreia (SUCIU et al., 1981). Tais efeitos podem ocorrer devido à exposição oral ao cobre. Contudo, a ingestão pode ter sido resultante da depuração mucociliar das partículas de cobre depositadas nas regiões nasofaríngea e traqueobrônquica do trato respiratório. Suciú et al. (1981) também observou disfunções no sistema hepático, associadas à hepatomegalia.

A inalação do elemento cobre também pode ocasionar decréscimo nos níveis de hemoglobina e hemácias. Estudos que comprovaram tais efeitos hematológicos, verificaram que as pessoas também foram expostas aos elementos ferro, chumbo e cádmio (FINELLI et al., 1981).

Efeitos oculares, como irritação nos olhos, também podem estar associados à exposição ao elemento cobre. No caso, a irritação não é devida à inalação (efeito sistêmico), mas ao contato direto com o elemento (ASKERGREN e MELLGREN, 1975). Adicionalmente, efeitos neurológicos, como dor de cabeça, vertigem e sonolência foram detectados em um estudo analisado (SUCIU et al., 1981).

Por sua vez, a carcinogenicidade do cobre não está claramente apresentada nos estudos analisados, uma vez que a inalação do cobre está associada à inalação de arsênio, sílica, ferro, ou exposição à radioatividade e de fumantes.

O ATSRD (2004) não estabelece um nível de risco mínimo (MRL) para o elemento cobre, devido à falta de caracterização específica da exposição nos estudos realizados. Contudo,

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 76/142
	RTC220103		REV. 2

o governo de Ontário, no Canadá, estabelece o padrão de qualidade do ar para o cobre de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para a média de 24 horas (GOVERNMENT OF ONTARIO, 2019).

A partir das concentrações dos elementos nas amostras dos pontos receptores, obtidas pelo método PIXE, e das concentrações de PM_{10} monitoradas nas estações de qualidade do ar de Barra Longa Centro, Volta da Capela e Gesteira, foram calculadas as concentrações do elemento químico para cada uma das campanhas 6, 7 e 8 (Tabelas 7.8, 7.9 e 7.10).



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 77/142
	RTC220103		REV. 2

Tabela 7.8 - Concentração de cobre na Estação de Barra Longa Centro

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE COBRE [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,010	0,022	0,027
Máxima de 24 horas	0,003	0,006	0,007
Média do Período	0,002	0,002	0,005

Tabela 7.9 - Concentração de cobre na Estação de Barra Longa Volta da Capela

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE COBRE [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,024	0,029	0,030
Máxima de 24 horas	0,005	0,007	0,009
Média do Período	0,003	0,003	0,0043

Tabela 7.10 - Concentração de cobre na Estação de Gesteira

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE COBRE [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,007	< LD	< LD
Máxima de 24 horas	0,002	< LD	< LD
Média do Período	0,001	< LD	< LD

Nota: < LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.

Comparando o padrão de qualidade do ar para o cobre estabelecido pelo Governo de Ontário ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e as concentrações obtidas em Barra Longa (Centro e Volta da Capela) e Gesteira nas três campanhas (6, 7 e 8), percebe-se que não houve ultrapassagem dos valores para as concentrações médias de 24 horas. Ainda, de forma conservadora, comparando o padrão de Ontário para concentrações médias de 24 horas com as concentrações máximas de 1 hora

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 78/142
	RTC220103		REV. 2

obtidas na região de Barra Longa (MG) e Gesteira (MG), percebe-se que também não ocorrem ultrapassagens, sendo consideravelmente inferiores ao padrão. Dessa forma, para as concentrações de cobre obtidas nas campanhas abordadas nesse relatório, a inalação de cobre não se encontra em níveis que ocasionariam efeitos à saúde da população.


7.6. Ferro

O ferro é o quarto metal mais abundante na crosta terrestre e o metal de transição mais abundante. Este pode alterar facilmente a valência e formar complexos com o oxigênio (FOWLER; NORDBERG G.; NORDBERG M., 2015). No Brasil, grandes extensões de solos apresentam significativos teores de óxidos de ferro. Os mais comuns são a hematita e a goethita, responsáveis pelas cores vermelha e amarela dos solos (EMBRAPA, 2019). O solo predominante em Barra Longa (MG) é o latossolo vermelho amarelo (EMBRAPA, 2005). Tal classe de solo caracteriza-se por possuir teores de ferro na faixa entre 7% e 11% (EMBRAPA, 2001). As amostras de solo intacto de Barra Longa, analisadas pelo método PIXE, apresentaram concentrações de ferro na faixa entre 7% e 8%.

O ferro é um elemento químico que possui coloração branca prateada quando encontrado no estado puro. Entretanto, quando encontrado em outras formas, tais como sulfeto, siliceto e carbureto de ferro apresenta coloração acizentada. A coloração avermelhada é observada quando o ferro está na forma de óxidos. Diversas ligas metálicas com importantes aplicações nas indústrias em geral utilizam o ferro como elemento base como, por exemplo, o aço-carbono e o aço inox.

Quanto sua relação com a saúde é um elemento essencial para diferentes processos metabólicos no corpo humano, incluindo transporte de oxigênio e atividade enzimática. A principal função do ferro está associada à construção da hemoglobina, que corresponde à molécula do sangue que incorpora o oxigênio do ar inalado (KARAMI, et al., 2009). A regulação do ferro no organismo é controlada pelas proteínas de captação e exportação. Tanto a deficiência, quanto o excesso do ferro são potencialmente tóxicos para a célula. Então esse processo deve ser estritamente controlado (FOWLER; NORDBERG G.; NORDBERG M., 2015).

Os efeitos na saúde humana relacionados à inalação do elemento ferro estão ligados, em sua maioria, a pessoas que vivem e/ou trabalham nas proximidades de mineradoras. A

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 79/142
	RTC220103		REV. 2

exposição prolongada à poeira e vapores de ferro, provenientes do processamento do mineral, podem diminuir a resistência do organismo às infecções respiratórias. A curto prazo, os efeitos são irritação do pulmão e mucosa da garganta. As partículas de ferro são conhecidas por produzir incômodo com efeitos semelhantes à poeira quando inalada (BRODY e OVERBY, 1989).

O dano à saúde mais comum relacionado à inalação em excesso do composto do elemento, óxido de ferro, é o desenvolvimento de siderose, que consiste no acúmulo de ferro nos tecidos humanos. Essa doença em si mostra-se assintomática, porém aumenta o risco de desencadear outras doenças relacionadas como, por exemplo, doença pulmonar obstrutiva crônica e fibrose pulmonar (HATHAWAY, 2014).

Outro composto do ferro, pentacarbonil de ferro, promove uma irritação pulmonar, semelhante à carbonila de níquel. Efeitos da inalação de altas concentrações do produto químico incluem dor de cabeça frontal, vertigem, náuseas, vômitos, além de dor constritiva no peito, sintoma característico do atraso no início dos efeitos pulmonares, seguido de tosse e cianose, levando à fraqueza profunda. Os sintomas se assemelham aos de uma infecção viral ou de uma pneumonia (HATHAWAY, 2014), por isso é importante a etapa do diagnóstico para que o tratamento seja eficaz.

As Tabelas 7.11, 7.12 e 7.13 apresentam os valores de concentração de ferro das Estações de Barra Longa Centro, Volta da Capela e Gesteira na região do estudo, respectivamente, para as três campanhas (6, 7 e 8).



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 80/142
	RTC220103		REV. 2

Tabela 7.11 - Concentração de ferro na Estação de Barra Longa Centro

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE FERRO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	4,68	8,88	17,51
Máxima de 24 horas	1,56	2,34	4,79
Média do Período	0,96	1,09	3,16



Tabela 7.12 - Concentração de ferro na Estação de Barra Longa Volta da Capela

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE FERRO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	11,79	14,32	19,11
Máxima de 24 horas	2,39	3,30	6,01
Média do Período	1,49	1,43	2,70

Tabela 7.13 - Concentração de ferro na Estação de Gesteira

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE FERRO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	4,79	17,67	13,13
Máxima de 24 horas	1,19	2,80	3,20
Média do Período	0,67	0,84	1,49

O elemento ferro não é abordado pela ATSDR, agência que traz as informações toxicológicas sobre substâncias perigosas (*Toxicological Profiles*), e os estudos que abordam a exposição ao ferro estão associados à sua exposição por outros meios que não a inalação. O único limite de referência encontrado, o estabelecido pelo Governo de Ontário para padrões de qualidade do ar, o qual corresponde a $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em uma média de 24 horas (Government of Ontario, 2019). Com base nesse limite, observa-se que os valores resultantes da análise da

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 81/142
	RTC220103		REV. 2

Campanha 8 para a máxima de 24 horas apresentam-se ligeiramente superiores ao limite de risco, para as estações Barra Longa Centro e Volta da Capela, podendo ocasionar efeitos à saúde dependendo do tempo de exposição.



7.7. Manganês

De acordo com o “*Toxicological Profile For Manganese*” (ATSDR, 2012) observou-se possíveis efeitos na saúde ocasionados pela inalação de manganês presente no ar. Após a inalação desse elemento, seus efeitos tóxicos podem demorar meses ou até mesmo anos para se manifestarem no corpo humano (RODIER, 1955).

A metabolização do elemento é realizada no fígado, porém é transportado primeiramente para o cérebro antes de passar por esse processo. Isto facilita a associação dos sintomas neurológicos existentes quando se tem intoxicação por inalação do elemento, como, por exemplo, irritabilidade, agressividade, alucinações, dificuldade de concentração e problemas de memória, chegando a sintomas mais agressivos como distúrbio neurológico permanente (manganismo) que incluem tremores, dificuldade para andar e espasmos musculares faciais (EMARA et al., 1971; MENA et al., 1967; RODIER 1955; SCHULER et al., 1957).

Além dos efeitos neurológicos, a inalação de manganês pode ser responsável por desencadeamento de problemas respiratórios. A toxicidade pulmonar manifesta-se como um aumento da suscetibilidade a infecções, como bronquite, e pode resultar em pneumonia mangânica. Os efeitos respiratórios relacionados à inalação do manganês estão ligados com fontes emissoras de material particulado, sendo esses efeitos causados, em geral, por presença desse poluente nos pulmões.

Mesmo que os efeitos na saúde relacionados à inalação de manganês mais comuns e significativos estejam vinculados com os sistemas respiratório e neurológico, o sistema cardiovascular também apresenta efeitos que alteram a condição de equilíbrio do indivíduo, como, por exemplo, a maior incidência de casos de baixa pressão arterial diastólica. Através de estudos observou-se que esse efeito se mostrava mais comum em pessoas mais jovens, o que levou a concluir que a capacidade do manganês de baixar a pressão arterial diastólica reduz com a idade, à medida que a elasticidade dos vasos sanguíneos se deteriora.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 82/142	
	RTC220103	REV. 2	

A parcela da população mais afetada com efeitos da inalação de manganês é a que vive e/ou trabalha próximo de empresas de soldagem e mineração. Os estudos relacionados à área de efeitos na saúde humana causado pelo manganês são realizados, em geral, com essa população mais suscetível.

Além dos efeitos citados acima, é importante salientar que a bile, normalmente, apresenta-se como responsável pela eliminação do manganês do corpo humano, ou seja, qualquer intervenção no funcionamento natural do fígado ocasiona na redução da capacidade de excreção do elemento, podendo se acumular no sangue e, eventualmente, no cérebro.

A metodologia prevê um Nível de Risco Mínimo (MRL) para manganês inorgânico inalado que atenda a proteção para cenários de exposição de inalação crônica (365 dias ou mais). Sendo assim, o MRL encontrado para inalação do manganês foi de $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. As Tabelas 7.14, 7.15 e 7.16 apresentam os valores de concentração de manganês das Estações de Barra Longa Centro, Volta da Capela e Gesteira, respectivamente, para as três campanhas (6, 7 e 8) abordadas no estudo.

Tabela 7.14 - Concentração de manganês na Estação de Barra Longa Centro

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE MANGANÊS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,075	0,116	0,246
Máxima de 24 horas	0,025	0,030	0,067
Média do Período	0,015	0,014	0,044

Tabela 7.15 - Concentração de manganês na Estação de Barra Longa Volta da Capela

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE MANGANÊS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,198	0,144	0,187
Máxima de 24 horas	0,040	0,033	0,058
Média do Período	0,025	0,014	0,026



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 83/142
	RTC220103		REV. 2

Tabela 7.16 - Concentração de manganês na Estação de Gesteira

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE MANGANÊS [µg/m³]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,072	0,280	0,175
Máxima de 24 horas	0,018	0,044	0,043
Média do Período	0,010	0,013	0,019

Nota-se que em relação à média do período o valor da concentração limite de exposição humana mostra-se superior se comparado as concentrações encontradas nas três estações da área de estudo, sendo assim, todos os valores se enquadram nos limites do Nível de Risco Mínimo. A concentração máxima de 1 hora se apresenta como sendo a mais crítica, por ser o maior valor em um período de tempo curto, mesmo sendo a concentração do cenário mais crítico da estação, ainda assim, inferior ao limite do Nível de Risco Mínimo anual nas três estações analisadas.



Através dessas duas comparações entre os dados analisados e aquele encontrado na literatura (ATSDR, 2012), conclui-se que as concentrações de manganês para as três campanhas se encontram baixas o suficiente para que os danos à população sejam mínimos.

7.8. Níquel

O níquel é um metal muito duro que ocorre naturalmente em solos e poeira de origem vulcânica. O níquel é usado em combinação com outros metais para formar ligas empregadas para moedas, jóias e aço inoxidável. Os compostos de níquel são utilizados para galvanoplastia, coloração de cerâmica e produção de baterias.

De acordo com o “*Toxicological Profile for Nickel*” (ATSDR, 2005a) os principais efeitos relacionados à exposição ao níquel (Ni) estão relacionados às reações alérgicas. Entre 10 - 20% das pessoas são sensíveis à exposição ao níquel. Cerca de 20 a 35% do níquel inalado que é retido nos pulmões é absorvido pelo sangue.

Os efeitos prejudiciais mais sérios à saúde decorrentes da exposição ao níquel, como bronquite crônica, função pulmonar reduzida e cânceres de pulmão e seio nasal, ocorreram em pessoas que respiravam poeira contendo certos compostos de níquel enquanto trabalhavam em



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 84/142
	RTC220103		REV. 2

refinarias de níquel ou em plantas de processamento de níquel. As concentrações de níquel nesses locais de trabalho eram muito mais altas que os níveis normais (de fundo) encontrados em condições ambientais. Os cânceres de pulmão e do seio nasal ocorreram em trabalhadores que foram expostos a mais de 10 mg de níquel/m³ de ar, como compostos de níquel de difícil dissolução (como o subsulfeto de níquel, Ni₃S₂). A exposição a altos níveis de compostos de níquel solúvel (dissolvem facilmente em água) também pode resultar em câncer quando estão presentes juntos a compostos de níquel menos solúveis (difíceis de dissolver) ou quando outros produtos químicos que podem produzir câncer estão presentes. As concentrações de compostos de níquel solúveis e menos solúveis que foram encontrados com potencial produzir cânceres foram de 100.000 a 1 milhão de vezes maior do que o nível usual de níquel no ar nos Estados Unidos.

O *Department of Health and Human Services* (DHHS) dos Estados Unidos determinou que o níquel metálico pode ser razoavelmente previsto como uma substância cancerígena e os compostos de níquel são reconhecidos como carcinogênicos humanos. A *International Agency for Research on Cancer* (IARC, 1993) determinou que alguns compostos de níquel são carcinogênicos para humanos e que o níquel metálico pode possivelmente ser carcinogênico para humanos. A USEPA determinou que o pó de refinarias de níquel e o subsulfeto de níquel são carcinogênicos para humanos. Essas classificações de câncer foram baseadas em estudos com trabalhadores de níquel e animais de laboratório.

É muito importante destacar que as condições em que foram descritos os potenciais carcinogênicos e demais efeitos agudos do níquel metálico e compostos de níquel estão relacionadas às exposições em concentrações muito mais elevadas do que aquelas que ocorrem no ar ambiente.

O níquel é liberado para a atmosfera por poeira expelida pelo vento, vulcões, combustão de óleo combustível, incineração municipal e indústrias envolvidas no refino de níquel, produção de aço e outras produções de ligas de níquel. A forma de níquel emitida para a atmosfera depende da fonte. Óxidos de níquel complexos, sulfato de níquel e níquel metálico estão associados a processos de combustão, incineração e fundição e refinação. As concentrações de níquel no ar ambiente (nos Estados Unidos) variam entre 7 e 12 ng/m³, principalmente na forma de aerossóis e podem ser tão altas quanto 150 ng/m³ perto de fontes pontuais. Com base nos dados de qualidade do ar de 1996, a USEPA relatou a média de 2,2

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 85/142
	RTC220103		REV. 2

ng/m³ nos EUA. Em geral, espera-se que os níveis de ar ambiente do níquel sejam mais altos no ar urbano do que no ar rural. Concentrações de níquel no ar interno são geralmente de 10 ng/m³.



Os níveis de fundo de níquel nos solos variam amplamente dependendo da geologia local e dos insumos antropogênicos, mas as concentrações geralmente variam entre 4 e 80 ppm. Algumas áreas dos Estados Unidos podem conter níveis naturais de até 5.000 ppm. Concentrações de níquel no pó doméstico podem ser altas e, portanto, representam um risco maior para as crianças pequenas que têm maior contato com os pisos.

O aumento da concentração de níquel no interior das casas possivelmente está relacionado à presença de materiais que contém o níquel como elemento em sua composição. Destaca-se ainda que em Barra Longa e Gesteira/MG, não há indústria que opere com o processamento de níquel. Assim, as fontes deste metal para o material particulado estariam associadas à origem geológica, combustão, e desgaste de materiais contendo níquel em sua composição.

Efeitos respiratórios adversos têm sido relatados em humanos e animais expostos a compostos de níquel em concentrações muito mais altas do que as tipicamente encontradas no meio ambiente. Os dados disponíveis sobre os efeitos respiratórios não cancerosos em humanos são limitados. Nos trabalhadores de níquel, a exposição ao níquel não resultou em aumento do risco de morte por doença não maligna do sistema respiratório. Estudos que examinam potenciais efeitos respiratórios não-letais não encontraram resultados consistentes. Dados em humanos e animais fornecem fortes evidências de que a exposição por inalação a alguns compostos de níquel pode induzir câncer de pulmão. Como descrito em maior detalhe mais adiante nesta seção, respostas carcinogênicas foram observadas após a exposição por inalação ao subsulfeto de níquel e óxido de níquel; na ausência de exposição a outros agentes carcinogênicos, o sulfato de níquel não parece ser carcinogênico após a exposição por inalação.

Estimativas de níveis de exposição que representam risco mínimo para os seres humanos (minimal risk levels, MRLs) foram feitas para o níquel, sendo eles:

- Um MRL de 0,0002 mg Ni/m³ de ar (0,2 µg/m³, 200 ng/m³) foi derivado para exposição de duração intermediária ao níquel (ATSDR, 2005a);
- Um MRL de 0,00009 mg Ni/m³ de ar (0,09 µg/m³, 90 ng/m³) foi derivado para exposição de duração crônica ao níquel (ATSDR, 2005a).

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 86/142	
	RTC220103	REV. 2	

Considerando os efeitos para a proteção à saúde, bem-estar da população e proteção ambiental a Comissão Europeia (CE) estabelece o limite de 20 ng/m³ como padrão de qualidade do ar para o níquel, expresso como média anual (EUROPEAN COMMISSION, 2019). O valor descrito para concentração média anual, determinado pela Comissão Europeia, é referente a concentrações de níquel contido na fração menor que 10 µm do material particulado (PM₁₀). O mesmo valor é aplicado como padrão de qualidade do ar na Índia e no Canadá (Estado de Ontario).

As Tabelas 7.17, 7.18 e 7.19 apresentam os valores de concentração de níquel encontradas nas Estações de Barra Longa Centro, Volta da Capela e Gesteira, respectivamente, para as três campanhas (6,7 e 8) abordadas no estudo.

Tabela 7.17 - Concentração de Níquel na Estação de Barra Longa Centro

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE NÍQUEL [µg/m ³]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,0037	0,0083	< LD
Máxima de 24 horas	0,0012	0,0021	< LD
Média do Período	0,0007	0,0010	< LD

Nota: < LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 87/142
	RTC220103		REV. 2

Tabela 7.18 - Concentração de Níquel na Estação de Barra Longa Volta da Capela

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE NÍQUEL [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,0058	< LD	< LD
Máxima de 24 horas	0,0011	< LD	< LD
Média do Período	0,0007	< LD	< LD

Nota: < LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.



Tabela 7.19 - Concentração de Níquel na Estação de Gesteira

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE NÍQUEL [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,0055	< LD	< LD
Máxima de 24 horas	0,0014	< LD	< LD
Média do Período	0,0007	< LD	< LD

Nota: < LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.

Nota-se que em relação à média do período, as concentrações nas estações se enquadram no limite determinado pela Comissão Europeia. Considerando as concentrações máximas de 1h, abordagem conservadora, ainda assim é atendido o limite do Nível de Risco Mínimo anual nas três estações analisadas. Na campanha 7, não foram detectadas concentrações de níquel nas estações Barra Longa Volta da Capela e Gesteira. Não foram detectadas concentrações de níquel nas três estações durante o período da campanha 8.

Através dessas duas comparações entre os dados analisados e aquele encontrado na literatura, conclui-se que as concentrações de níquel para as três campanhas se encontram baixas o suficiente para que os danos à população sejam mínimos.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 88/142
	RTC220103		REV. 2

7.9. Silício

O silício é um material inerte e parece não possuir propriedades capazes de causar fibrose no tecido pulmonar. Porém, existe pouca informação disponível sobre a toxicologia do silício elementar puro ACGIH (1991).

Alguns estudos realizados em animais observaram que o contato com a poeira de silício não acarreta nenhum efeito (MCCORD, FREDRICK e STOLZ, 1937). Entretanto, também se constatou que em níveis mais altos de poeira foram observadas pequenas lesões pulmonares (SCHEPERS, 1971).

Nas Tabelas 7.20, 7.21 e 7.22 abaixo estão expostas as concentrações de silício encontradas para as Estações de Barra Longa Centro, Volta da Capela e Gesteira para as três campanhas analisadas (6, 7 e 8).

Tabela 7.20 - Concentração de silício na Estação de Barra Longa Centro

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE SILÍCIO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	5,76	10,20	20,40
Máxima de 24 horas	1,92	2,69	5,59
Média do Período	1,18	1,25	3,69

Tabela 7.21 - Concentração de silício na Estação de Barra Longa Volta da Capela

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE SILÍCIO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	11,98	13,84	22,27
Máxima de 24 horas	2,43	3,19	7,00
Média do Período	1,51	1,38	3,14



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 89/142	
	RTC220103	REV. 2	

Tabela 7.22 - Concentração de silício na Estação de Gesteira

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE SILÍCIO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	3,50	13,10	12,83
Máxima de 24 horas	0,84	2,07	3,13
Média do Período	0,49	0,62	1,45



Devido à falta de regulamentações que indiquem os limites de exposição à inalação para o silício e, também falta de estudos em humanos que indiquem riscos potenciais a saúde, torna-se inviável discorrer acerca dos riscos existentes nas localidades de Barra Longa (MG) e Gesteira (MG) por conta das presentes concentrações do elemento silício.

7.10. Zinco

O zinco é um elemento essencial para o funcionamento do corpo humano, estando presente no ar, na água, no solo e nos alimentos.

No entanto, sua absorção em grandes quantidades, na maioria das vezes associada a condições ocupacionais, pode resultar em impactos na saúde. Os efeitos decorrentes da inalação de zinco e de seus compostos variam de acordo com a fórmula química de cada composto, contudo, a maioria dos efeitos se manifestam no sistema respiratório. Os principais compostos de zinco que apresentam efeitos tóxicos no organismo humano são o cloreto de zinco, o óxido de zinco, o sulfato de zinco e o sulfeto de zinco.

O principal efeito resultante da inalação de zinco e seus compostos, especialmente o óxido de zinco, é o desenvolvimento da “*Febre dos Fumos Metálicos*”. Trata-se uma doença aguda desenvolvida devido a intensa inalação de óxidos de metais, prejudicando a função pulmonar, contudo, raramente progride para uma doença pulmonar crônica (DRINKER e DRINKER, 1928; BROWN, 1988; MALO et al., 1990). Seus sintomas incluem: dor no peito, tosse, dispneia, redução do volume pulmonar, náuseas, calafrios, mal-estar e leucocitose (ROHRS, 1957; VOGELMEIER et al., 1987; MALO et al., 1990). Estes geralmente aparecem

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 90/142
	RTC220103		REV. 2

algumas horas após a exposição e são reversíveis de um a quatro dias após o fim da exposição ao poluente (STURGIS et al., 1927; DRINKER et al., 1927; BROWN, 1988).



Devido ao seu caráter corrosivo, o cloreto de zinco é mais danoso às mucosas do sistema respiratório do que o óxido de zinco. Diversos estudos relatam a dispneia, tosse, dor torácica pleurítica, pneumotórax e pneumonia aguda como os principais efeitos associados à sua inalação aguda (JOHNSON e STONEHILL, 1961; MATARESE e MATTHEWS, 1966; SCHENKER et al., 1981; ZERAHN et al., 1999).

Embora os efeitos gastrointestinais estejam mais relacionados a ingestão de zinco, a inalação de seus compostos também é passível de implicações danosas devido à proximidade e interligação dos sistemas respiratório e digestivo. Estudos de McCord et al. (1926) indicaram uma maior incidência de problemas gastrointestinais em pessoas expostas à inalação crônica de óxido de zinco. Dentre os efeitos gastrointestinais destacam-se: dores abdominais, náuseas, vômitos e constipações (MCCORD et al., 1926).

Estudos epidemiológicos não encontraram relações entre a exposição ocupacional ao zinco com o aumento na incidência de câncer dos trabalhadores (LOGUE et al., 1982; NEUBERGER; HOLLOWELL, 1982). ATSDR (2005b), cita que o zinco e seus compostos são definidos pela USEPA como “não classificáveis quanto à carcinogenicidade humana”, ou seja, ainda não há evidências que o zinco cause câncer em humanos. Além disso, até então, não existem casos de morte relatados por inalação exclusiva de compostos de zinco, apenas casos decorrentes de inalação de fumaça contendo diversas substâncias.

Segundo ATSDR (2005b), ainda não há uma metodologia sólida para determinação dos níveis de risco mínimo para a inalação de zinco, não existindo no momento evidências que o zinco cause câncer em humanos (ATSDR, 2005b). A Resolução CONAMA nº 491/2018, que dispõe sobre os padrões de qualidade do ar, não estabelece um padrão para a concentração de zinco na atmosfera (CONAMA, 2018). De forma semelhante, a União Europeia não contempla o zinco em sua lista de poluentes que possuem padrões de concentração estabelecidos com intuito de assegurar a saúde da população (EUROPEAN COMMISSION, 2019).

Contudo, o governo de Ontario, no Canadá, estabelece 100 µg/m³ como padrão de concentração para meia hora e 120 µg/m³ para 24 (vinte e quatro) horas (Government of Ontario, 2019). As Tabelas 7.23, 7.24 e 7.25 indicam os valores de concentração obtidos nas

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 91/142
	RTC220103		REV. 2

proximidades das Estações de monitoramento Barra Longa Centro, Volta da Capela e Gesteira, para as três campanhas abordadas no estudo (6, 7 e 8).

Tabela 7.23 - Concentração de zinco na Estação de Barra Longa Centro

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE ZINCO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,088	0,091	0,214
Máxima de 24 horas	0,029	0,024	0,058
Média do Período	0,018	0,011	0,038



Tabela 7.24 - Concentração de zinco na Estação de Barra Longa Volta da Capela

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE ZINCO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,194	0,137	0,237
Máxima de 24 horas	0,039	0,031	0,074
Média do Período	0,024	0,013	0,033

Tabela 7.25 - Concentração de zinco na Estação de Gesteira

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE ZINCO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,105	0,241	0,169
Máxima de 24 horas	0,026	0,038	0,041
Média do Período	0,014	0,011	0,019

No que tange aos padrões de qualidade do ar existentes, todas as concentrações obtidas pelas estações de monitoramento são substancialmente inferiores aos $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ estabelecidos como valor limite para qualidade do ar em Ontario, Canadá. Mesmo analisando o cenário mais

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 92/142
	RTC220103		REV. 2

crítico (máxima de uma hora), verificam-se concentrações significativamente inferiores ao valor limite. De fato, a maior concentração obtida no estudo (máxima de uma hora para Estação Gesteira – Campanha 7) representa apenas 0,24 % do padrão de qualidade do ar estabelecido por Ontário para o zinco. Portanto, com base nos resultados obtidos, esperam-se riscos mínimos ou nulos à saúde.

8. Conclusão



O presente trabalho teve como objetivos caracterizar quimicamente o material particulado menor que 10 µm (PM₁₀), estabelecer relação entre fontes emissoras e receptores, bem como discutir o risco à saúde da população pela exposição aos elementos e concentrações identificadas em Barra Longa (MG), incluindo o distrito de Gesteira (MG).

A partir dos dados obtidos das estações de monitoramento da qualidade do ar de Barra Longa (Centro, Volta da Capela e Gesteira), para o período de novembro de 2018 a agosto de 2021, foi possível perceber que, não houve ultrapassagem do padrão intermediário I, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 491/2018, para nenhum dos poluentes monitorados no período do estudo.

As análises químicas foram realizadas para as amostras dos materiais contidos nas fontes emissoras (rejeito, solo intacto, vias pavimentadas e vias não pavimentadas) e receptores (Estações Barra Longa Centro, Volta da Capela e Gesteira) utilizando o método PIXE.



Pelo método PIXE, os elementos químicos mais abundantes nas amostras de fontes emissoras formam o Fe, Si e Al. Contudo, também foram detectados, em menor quantidade, os elementos: K, Ca, Ti, Mg, Na, Co, P, S, Mn, Zr, Cl, Rb, V, Sr, Zn, Cu, As, Ga e Ni. Para as amostras dos pontos receptores, os elementos com maior relevância foram Si, S, Fe, Al, K. Também foram identificados, com menor representatividade, os elementos Ca, Na, Mg, P, Mn, Zn, Ti, Br, As, Cu, Cl, Sr, Rb, Se, Pb, Ga, Cr, V, Ni, Zr. Ainda, pelo método PIXE foi possível perceber que as amostras de fontes emissoras analisadas apresentam um perfil similar quanto aos principais elementos detectados (Fe, Al e Si).

A caracterização das fontes emissoras e pontos receptores obtida pelo método PIXE subsidiou a aplicação do modelo receptor CMB. Tal modelo foi utilizado como ferramenta para obtenção de uma aproximação das contribuições de fontes emissoras relacionadas às atividades realizadas pela FUNDAÇÃO nas concentrações de PM₁₀, em Barra Longa (MG) e Gesteira

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 93/142
	RTC220103		REV. 2

(MG). Nos três pontos receptores analisados, as contribuições provenientes das fontes emissoras mapeadas (vias pavimentadas, vias não pavimentadas e solo intacto) variaram entre 15% e 51%. Assim, grande parte dos acréscimos nas concentrações de PM₁₀ foi proveniente de fontes emissoras não mapeadas, as quais não estão relacionadas às atividades da FUNDAÇÃO.

O resultado das análises químicas subsidiou a discussão dos potenciais efeitos dos elementos detectados nas amostras coletadas em Barra Longa (MG) e Gesteira (MG), na saúde da população exposta ao ar ambiente. Os elementos químicos foram selecionados devido a abundância encontrada nas análises químicas, como Fe, Al e Si, e aqueles que também são relevantes em termos de efeitos para a saúde (As, Cd, Pb, Cu, Mn, Ni e Zn), mesmo que tenha sido verificada uma baixa concentração nos resultados obtidos. Para grande parte destes elementos, considerando os valores de referência analisados e as concentrações observadas, não há indícios de potencial risco à saúde da população. Entretanto, para o elemento Fe, que naturalmente é um dos mais abundantes na área de estudo, as concentrações observadas tendem a ultrapassar ao único limite de referência identificado (Government of Ontario, 2019). É importante observar que as concentrações dos elementos foram estimadas considerando a maior fração mássica observada dentre as amostras em conjunto com a maior concentração obtida pelo monitoramento da qualidade do ar. Dessa forma, tal abordagem é conservadora ao utilizar os valores máximos das duas variáveis consideradas.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 94/142
		RTC220103	REV. 2

9. Equipe Técnica

Luiz Cláudio D. Santolim

Coordenador Técnico
Mestre em Engenharia Ambiental
Engenheiro Mecânico
CREA: ES-4.531/D
IBAMA: 579.921

Julius César Zamprogno Mergulhão

Engenheiro Ambiental
CREA: ES-26.913/D
IBAMA 5.433.813

Flávio Curbani



Doutor em Ecologia de Ecossistemas
Mestre em Engenharia Ambiental
Engenheiro Mecânico
Engenheiro de Segurança do Trabalho
CREA: ES-7.864/D
IBAMA 531.651

Gabriel Miller de Oliveira

Meteorologista
CREA: MG-209352/D
IBAMA: 6.808.339

Victória Venturini Marques

Engenheira Ambiental

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 95/142
	RTC220103		REV. 2

10. Referências Bibliográficas

ACGIH – AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS. *Silicon*. Documentation of the TLVs and BEIs, 6th ed, pp 1387–88. Cincinnati, OH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1991.

ADAMS, R. G.; HARRISON, J. F.; SCOTT P. *The development of cadmium-induced proteinuria, impaired renal function, and osteomalacia in alkaline battery workers*. Q J Med. 1969.



ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. *Toxicological profile for aluminum*. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Atlanta, Georgia. 2008.

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. *Toxicological profile for arsenic*. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Atlanta, Georgia. 2007.

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. *Toxicological profile for cadmium*. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta, Georgia. 2012.

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. *Toxicological profile for copper*. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta, Georgia. 2004.

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. *Toxicological Profile for lead*. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta, Georgia. 2019.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 96/142
	RTC220103		REV. 2

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY.
Toxicological profile for manganese. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta, Georgia. 2012.

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY.
Toxicological profile for nickel. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Atlanta, Georgia. 2005.

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY.
Toxicological profile for zinc. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Atlanta, Georgia. 2005.

ARMSTRONG, B. G.; KAZANTZIS, G. *The mortality of cadmium workers*. Lancet. 1983.

ASKERGREN, A.; MELLGREN, M. *Changes in the nasal mucosa after exposure to copper salt dust. A preliminary report*. Scand J Work Environ Health. 1975.



BAILEY, M. R.; ROY, M. *Clearance of particles from the respiratory tract*. In: Human respiratory tract model for radiological protection: A report of a task group of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, UK: Pergamon Press. 1994.

BARNHART, S.; ROSENSTOCK, L. *Cadmium chemical pneumonitis*. Chest. 1984.

BELL et al. *Hospital Admissions and Chemical Composition of Fine Particle Air Pollution*. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. Vol. 179, nº 12. 2009.

BERNARD, A.; BUCHET, J. P.; ROELS, H.; et al. *Renal excretion of proteins and enzymes in workers exposed to cadmium*. Eur J Clin Invest. 1979.

BERNARD, A. M.; ROELS, H.; CARDENAS, A.; et al. *Assessment of urinary protein 1 and transferrin as early markers of cadmium nephrotoxicity*. Br J Ind Med. 1990.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 97/142
		RTC220103	REV. 2

BETON, D. C.; ANDREWS, G. S.; DAVIES, H. J.; et al. *Acute cadmium fume poisoning; five cases with one death from renal necrosis*. Br J Ind Med. 1966.

BLAINEY, J. D.; ADAMS, R. G.; BREWER, D. B.; et al. *Cadmium-induced osteomalacia*. Br J Ind Med. 1980.

BONNELL, J. A. *Emphysema and proteinuria in men casting copper-cadmium alloys*. Br J Ind Med. 1955.

BRODY, A. R.; AND OVERBY, L. H. *Incorporation of tritiated thymidine by epithelial and interstitial cells in bronchiolar-alveolar regions of asbestos-exposed rats*. Amer. J. Pathol. 1989.

BROWN, J. J. Zinc fume fever. Br J Radiol. 1988.



CASTANHO, A. D. A. *A determinação quantitativa de fontes de material particulado na atmosfera da cidade de São Paulo*. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CAWSE, P.A. *A survey of atmospheric trace elements in the U.K. (1972-73)*. Harwell, United Kingdom Atomic Energy Authority, 84 pp (Report No. AERE-R 7669). 1974.

CHAN, O. Y.; POH, S. C.; LEE, H. S.; et al. *Respiratory function in cadmium battery workers: A follow-up study*. Ann Acad Med Singapore. 1988.

CHEN, L.; JIN, T.; HUANG, B.; et al. *Plasma metallothionein antibody and cadmium-induced renal dysfunction in an occupation population in China*. Toxicol Sci. 2006a.

CHEN, L.; JIN, T.; HUANG, B.; et al. *Critical exposure level of cadmium for elevated urinary metallothionein: An occupational population study in China*. Toxicol Appl Pharmacol. 2006b.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 98/142
		RTC220103	REV. 2

CHEN, L. C.; LIPPMANN, M. *Effects of Metals within Ambient Air Particulate Matter (PM) on Human Health*. Inhalation Toxicology, 21:1–31, 2009.

CHEN, P. et al. *Chemical mass balance source apportionment of size-fractionated particulate matter in Nanjing, China*. Aerosol and Air Quality Research, v. 15, p. 1855-1867, 2015.

CHIA, K. S.; TAN, A. L.; CHIA, S. E.; et al. Renal tubular function of cadmium exposed workers. Ann Acad Med Singapore. 1992.

CHOW, J. C.; WATSON, J. G. *Review of PM_{2.5} and PM₁₀ apportionment for fossil fuel combustion and other sources by the chemical mass balance receptor model*. Energy & Fuels, v. 16, n. 2, p. 222-260, 2002.

CH2M. Plano de Manejo de Rejeito – Revisão 1. São Paulo. 2017. 239 p.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. *Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 nov. 2018. p. 155-156.

DAI, Q. et al. *A size-resolved chemical mass balance (SR-CMB) approach for source apportionment of ambient particulate matter by single element analysis*. Atmospheric environment, v. 197, p. 45-52, 2019.

DAVISON, A. G.; FAYERS, P. M.; TAYLOR, A. J.; et al. *Cadmium fume inhalation and emphysema*. Lancet 1. 1988.

DE KORT, W. L.; VERSCHOOR, M. A.; WIBOWO, A. A.; et al. Occupational exposure to lead and blood pressure: A study in 105 workers. Am J Ind Med. 1987.

DRINKER, K.; DRINKER, P. *Metal fume fever: V. Results of the inhalation by animals of zinc and magnesium oxide fumes*. J Ind Hyg. 1928.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 99/142
		RTC220103	REV. 2

DRINKER, P.; THOMSON, R. M.; FINN, J. L. *Metal fume fever: IV. Threshold doses of zinc oxide, preventive measures, and the chronic effects of repeated exposures*. J Ind Hyg. 1927b.

DUNLAP, L. G. *Perforations of the nasal septum due to inhalation of arsenous oxide*. JAMA. 1921.

ECOSOFT – ECOSOFT CONSULTORIA E SOFTWARES AMBIENTAIS. *Inventário de Emissões Atmosféricas de Áreas Afetadas pelo Rompimento da Barragem de Fundão, MG - Janeiro/2017 a Dezembro/2017 (RTC190097)*. Vitória, 2019.



ECOSOFT – ECOSOFT CONSULTORIA E SOFTWARES AMBIENTAIS. *Plano de Monitoramento da Qualidade do Ar e Controle de Emissões Atmosféricas (RTC170173-R2)*. Vitória, 2017.

ECOSOFT – ECOSOFT CONSULTORIA E SOFTWARES AMBIENTAIS. *Plano de Monitoramento da Qualidade do Ar e Controle de Emissões Atmosféricas (RTC180416-R4)*. Vitória, 2019.

ELINDER, C. G.; EDLING, C.; LINDBERG, E.; et al. *Assessment of renal function in workers previously exposed to cadmium*. Br J Ind Med. 1985a.

ELINDER CG. *Normal values for cadmium in human tissue, blood and urine in different countries*. In: Friberg L, Elinder CG, Kjellström T, et al., eds. *Cadmium and health: A toxicological and epidemiological appraisal*. Vol. I. Exposure, dose, and metabolism. Effects and response. Boca Raton, FL: CRC Press, 1985b.

EMARA, A. M.; EL- GHAWABI, S. H.; MADKOUR, O. I.; et al. *Chronic manganese poisoning in the dry battery industry*. Br J Ind Med. 1971.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 100/142
		RTC220103	REV. 2

ENTERLINE, P. E.; DAY, R.; MARSH, G. M. *Cancers related to exposure to arsenic at a copper smelter*. Occup Environ Med. 1995.

ENTERLINE, P. E.; MARSH, G. M. *Cancer among workers exposed to arsenic and other substances in a copper smelter*. Am J Epidemiol. 1982.

ENTERLINE, P. E.; HENDERSON, V. L.; MARSH, G. M. *Exposure to arsenic and respiratory cancer: A reanalysis*. Am J Epidemiol. 1987a.

EUROPEAN COMMISSION - EC. *Air Quality Standards*. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>>. Acesso em: 15 de agosto de 2019.

FALCK, F. Y.; FINE, L. J.; SMITH, R. G.; et al. *Occupational cadmium exposure and renal status*. Am J Ind Med. 1983.



FINELLI, V. N.; BOSCOLO, P.; SALIMEI, E.; et al. *Anemia in men occupationally exposed to low levels of copper*. Heavy Met Environ Int Conf 4th, 1981.

FRIBERG, L. *Health hazards in the manufacture of alkaline accumulators with special reference to chronic cadmium poisoning*. Acta Med Scand, 1950.

FUNDAÇÃO RENOVA. *O que é o rejeito?* Disponível em: <<http://www.fundacaorenova.org/manejo-de-rejeitos/>>. Acesso em: 08 de março de 2019.

GOVERNMENT OF ONTARIO - O. Reg. 419/05: *Air Pollution - Local Air Quality*. Disponível em: <<https://www.ontario.ca/laws/regulation/050419#BK75>>. Acesso em: 21 de agosto de 2019.

GUILLARD, O.; LAUWERYS, R. *In vitro and in vivo effect of mercury, lead, and cadmium on the generation of chemiluminescence by human whole blood*. Biochem Pharmacol. 1989.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 101/142
		RTC220103	REV. 2

GUPTA, A. K.; KARAR, K.; SRIVASTAVA, A. *Chemical mass balance source apportionment of PM10 and TSP in residential and industrial sites of an urban region of Kolkata, India*. Journal of Hazardous Materials, v. 142, n. 1-2, p. 279-287, 2007.

HART, R. P.; ROSE, C. S.; HAMER, R. M. *Neuropsychological effects of occupational exposure to cadmium*. J Clin Exper Neuropsychol. 1989b.

HATHAWAY, G. J.; PROCTOR, N. H. *Proctor and Hughes' chemical hazards of the workplace*. John Wiley & Sons, 2014.



HOLMQVIST, I. 1951. *Occupational arsenical dermatitis: A study among employees at a copper ore smelting work including investigations of skin reactions to contact with arsenic compounds*. Acta Derm Venerol 31. 1951.

HOPKE, P. K. Review of receptor modeling methods for source apportionment. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 66, n. 3, p. 237-259, 2016.

IARC - INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. *Cadmium and certain cadmium compounds*. In: *IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans*. Beryllium, cadmium, mercury and exposures in the glass manufacturing industry. IARC monographs, Vol. 58. Lyon, France: World Health Organization. 1993.

ICRP – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Human respiratory tract model for radiological protection*. ICRP publication 66. Oxford: Pergamon Press, 1994.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Gráficos Climatológicos. *Brasil, 2019*. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2019.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 102/142
		RTC220103	REV. 2

IRIS – INTEGRATED RISK INFORMATION SYSTEM. *Cadmium*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency. February 22, 2012. Disponível em: <<http://www.epa.gov/iris/subst/index.html>>. Acesso em: 19 de agosto de 2019.

INDIA MINISTRY OF ENVIRONMENT, FOREST AND CLIMATE CHANGE. Ambient Air Quality Standards in India. Disponível em: <<https://cpcb.nic.in/air-quality-standard/>>. Acesso em: 15 de agosto de 2019.

JAKUBOWSKI, M. et al. *Occupational exposure to cadmium and kidney dysfunction*. Int Arch Occup Environ Health. 1987.

JAMES, A.C. et al. *Deposition of inhaled particles*. Ann ICRP 24(1- 3):231-299. 1994.

JÄRUP, L.; ELINDER, C. G. *Dose-response relations between urinary cadmium and tubular proteinuria in cadmium-exposed workers*. Am J Ind Med. 1994.



JÄRUP, L.; ELINDER, C. G. *Incidence of renal stones among cadmium exposed battery workers*. Br J Ind Med. 1993.

JÄRUP, L.; ELINDER, C. G.; SPANG, G. *Cumulative blood-cadmium and tubular proteinuria: A doseresponse relationship*. Int Arch Occup Environ Health. 1988.

JÄRUP, L.; PERSHAGEN, G.; WALL, S. *Cumulative arsenic exposure and lung cancer in smelter workers: A dose-response study*. Am J Ind Med. 1989.

JÄRUP, L.; PERSSON, B.; ELINDER, C. G. *Decreased glomerular filtration rate in solderers exposed to cadmium*. Occup Environ Med. 1995B.

JONES, K. C.; BENNETT, B. G. *Exposure commitment assessments of environmental pollutants*. London, University of London, King's College, Monitoring and Assessment Research Centre, 33 pp (MARC Technical Report 33). 1985.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 103/142
	RTC220103		REV. 2

JOHNSON, F. A.; STONEHILL, R.B. *Chemical pneumonitis from inhalation of zinc chloride*. Dis Chest.1961.

KAGAMIMORI, S. et al. *Case-control study on cardiovascular function in females with a history of heavy exposure to cadmium*. Bull Environ Contam Toxicol. 1986.

KARAKAYA, A.; YUCESoy, B.; SARDAS, O. S. *An immunological study on workers occupationally exposed to cadmium*. Human Exp Toxicol. 1994.

KAWADA, T.; KOYAMA, H.; SUZUKI, S. *Cadmium, NAG activity, and B2-microglobulin in the urine of cadmium pigment workers*. Br J Ind Med. 1989.

KAZANTZIS, G. *Renal tubular dysfunction and abnormalities of calcium metabolism in cadmium workers*. Environ Health Perspect. 1979



KAZANTZIS, G.; LAM, T.H.; SULLIVAN, K. R. *Mortality of cadmium-exposed workers. A five-year update*. Scand J Work Environ Health. 1988.

KUTZMAN, R.S. et al. *Pulmonary changes resulting from subchronic exposure to cadmium chloride aerosol*. J Toxicol Environ Health. 1986.

LAGERKVIST, B.; LINDERHOLM, H.; NORDBERG, G. F. *Vasospastic tendency and Raynaud's phenomenon in smelter workers exposed to arsenic*. Environ Res. 1986.

LAGERKVIST, B. J.; ZETTERLUND, B. *Assessment of exposure to arsenic among smelter workers: A fiveyear follow-up*. Am J Ind Med. 1994.

LAMM, S. H.; HALL T. A.; KUTCHER J. S. *Particulate exposure among cadmium workers: Is the risk due to cigarette, cadmium or arsenic particulates?* Ann Occup Hyg. 1994.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 104/142
		RTC220103	REV. 2

LAMM, S. H. et al. *Determinants of lung cancer risk among cadmiumexposed workers*. Ann Epidemiol. 1992.

LEE-FELDSTEIN, A. *Cumulative exposure to arsenic and its relationship to respiratory cancer among copper smelter employees*. J Occup Med. 1986.

LLOYD, T. B.; SHOWAK, W. *Zinc and zinc alloys*. In: Grayson M, ed. Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. 3rd ed. v 24. New York, NY: John Wiley and Sons. 1984.

LIOY, P. J.; WOLFF, G. T.; KNEIP, T. J. *Toxic airborne elements in the New York metropolitan area*. J Air Pollut Control Assoc. 1978.

LOGUE, J. N.; KOONTZ, M. D.; HATTWICK, M. A. W. *A historical prospective mortality study of workers in copper and zinc refineries*. J Occup Med. 1982.



LUCAS, P. A. et al. *Fatal cadmium fume inhalation*. Lancet. 1980.

MAENHAUT, W.; KARNIELI, A.; ANDREAE, M. O. Ten-year study of fine aerosol at Sde Boker, Israel, using PIXE: Time trends, seasonal variation, correlations, and source areas for anthropogenic elements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, v. 318, p. 119-124, 2014.

MALO, J. L. et al. Acute lung reaction due to zinc inhalation. Eur Res J. 1990.

MASON, H. J. et al. *Intra-individual variability in markers of proteinuria for normal subjects and those with cadmium-induced renal dysfunction: Interpretation of results from untimed, random urine samples*. Biomarkers. 1999.

MASON, H. J. et al. *Follow up of workers previously exposed to silver solder containing cadmium*. Occup Environ Med. 1999.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 105/142
	RTC220103		REV. 2

MATARESE, S. L.; MATTHEWS, J. I. *Zinc chloride (smoke bomb) inhalational lung injury*. Chest. 1966.

MAZUMDAR, S. et al. *Multistage modeling of lung cancer mortality among arsenic-exposed copper-smelter workers*. Risk Anal. 1989.

MCCORD, C. P.; FREDRICK, W.G.; STOLZ, S. *The toxicity of silicon*. J Lab Clin Med. 1937.

MCCORD, C. P. et al. *An occupational disease among zinc workers*. Arch Intern Med. 1926.

MENA, I. et al. *Chronic manganese poisoning: Clinical picture and manganese turnover*. Neurology. 1967.



MIGUEL, A.H. et al. *Characterization of indoor air quality in the cities of Sao Paulo and Rio De Janeiro, Brazil*. Environ Sci Technol 1995.

MITCHELL, J. *Pulmonary fibrosis in an aluminum worker*. Br J Ind Med. 1959.

MORTON, W. E.; CARON, G. A. *Encephalopathy: An uncommon manifestation of workplace arsenic poisoning?* Am J Ind Med. 1989.

MOYERS, J. L. et al. *Evaluation of particulate trace species in Southwest desert atmosphere*. Environ Sci Technol. 1977.

NIOSH - NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. Manual of Analytical Methods (NMAM®). Elements by ICP Microwave Digestion: Method 7304. 5th ed. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS 2014.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 106/142
		RTC220103	REV. 2

NEUBERGER, J. S.; HOLLOWELL, J. G. *Lung cancer excess in an abandoned lead-zinc mining and smelting area*. Sci Total Environ. 1982

NTP – NATIONAL TOXICOLOGY PROGRAM. Report on carcinogens. Twelfth edition. National Toxicology Program. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health. 2011. Disponível em: <<http://ntp-server.niehs.nih.gov/ntp/roc/twelfth/roc12.pdf>>. Acesso em: 12 de agosto de 2019.

ONTARIO MINISTRY OF THE ENVIRONMENT AND CLIMATE CHANGE. Ontario's Ambient Air Quality Criteria. Disponível em: <<https://www.ontario.ca/page/ontarios-ambient-air-quality-criteria-sorted-contaminant-name>>. Acesso em: 15 de agosto de 2019.

PATWARDHAN, J. R.; FINCKH, E. S. *Fatal cadmium-fume pneumonitis*. Med J Aust. 1976.

PERL, D. P.; GOOD, P. F. *Uptake of aluminum into central nervous system along nasal-olfactory pathways*. Lancet. 1987.



PINTO, S. S.; MCGILL, C. M. *Arsenic trioxide exposure in industry*. Ind Med Surg. 1953.

PISCATOR, M. *Long-term observations on tubular and glomerula function in cadmium-exposed persons*. Environ Health Perspect. 1984.

POLIZZI, S. et al. *Neurotoxic effects of aluminum among foundry workers and Alzheimer's disease*. Neurotoxicology. 2002.

RODIER, J. *Manganese poisoning in Moroccan miners*. Br J Ind Med. 1955.

ROELS, H. et al. *Markers of early renal changes induced by industrial pollutants. III. Application to workers exposed to cadmium*. Brit J Ind Med. 1993.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 107/142
	RTC220103		REV. 2

ROELS, H. A. et al. *Assessment of the filtration reserve capacity of the kidney in workers exposed to cadmium*. Br J Ind Med. 1991.

ROELS, H. A. et al. *Health significance of cadmium induced renal dysfunction: A five year follow-up*. Br J Ind Med. 1989.

ROHRS, L. C. *Metal-fume fever from inhaling zinc oxide*. Arch Ind Health. 1957.

ROSE, C. S.; HEYWOOD, P. G.; COSTANZO, R. M. *Olfactory impairment after chronic occupational cadmium exposure*. J Occup Med. 1992.

RUSCH, G. M.; O'GRODNICK, J. S.; RINEHART, W. E. *Acute inhalation study in rat of comparative uptake, distribution and excretion of different cadmium containing materials*. Am Ind Hyg Assoc. 1986.



SALTZMAN, B.E. ET al. *Concentrations of six metals in the air of eight cities*. Environ Sci Technol. 1985.

SANDSTROM A. I. M.; WALL, S. G. I.; TAUBE, A. *Cancer incidence and mortality among Swedish smelter workers*. Br J Ind Med. 1989.

SANTOS, J. M.; REIS, N. C.; GALVÃO, E. S.; SILVEIRA, A.; GOULART, E. V.; LIMA, A. T. *Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil*. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, n. 27, p. 22026-22039, 2017.

SCHENKER, M. B.; SPEIZER, F. E.; TAYLOR, J. O. *Acute upper respiratory symptoms resulting from exposure to zinc chloride aerosol*. Environ Res. 1981

SCHEPERS, G. W. H. *Lung tumors of primates and rodents*. Ind Med Surg. 1971.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 108/142
	RTC220103		REV. 2

SCHULER, P. et al. *Manganese poisoning: Environmental and medical study at a Chilean mine*. Ind Med Surg 26:167-173. 1957.

SCOTT, R. et al. *Whole body calcium deficit in cadmium-exposed workers with hypercalciuria*. Urology. 1980.

SCOTT, R. et al. *Hypercalciuria related to cadmium exposure*. Urology. 1978.

SEIDAL, K.; JÖRGENSEN, N.; ELINDER, C. *Fatal cadmium induced pneumonitis*. Scand J Work Environ Health. 1993.

SHAIKH, Z. A.; TOHYAMA, C.; NOLAND, C. V. *Occupational exposure to cadmium: Effect on metallothionein and other biological indices of exposure and renal function*. Arch Toxicol. 1987.


SMITH, T. J.; ANDERSON, R. J.; READING, J. C. *Chronic cadmium exposures associated with kidney function effects*. Am J Ind Med. 1980.

SORAHAN, T.; LANCASHIRE, R. J. *Lung cancer mortality in a cohort of workers employed at a cadmium recovery plant in the United States: An analysis with detailed job histories*. Occup Environ Med. 1997.

SORAHAN, T.; WATERHOUSE, J. A. H. *Mortality study of nickel-cadmium battery workers by the method of regression models in life tables*. Br J Ind Med. 1983.

STAESSEN, J.; LAUWERYS, R. *Health effects of environmental exposure to cadmium in a population study*. J Hum Hypertens. 1993.

STAYNER, L. et al. *A dose-response analysis and quantitative assessment of lung cancer risk and occupational cadmium exposure*. Ann Epidemiol. 1992a.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 109/142
	RTC220103		REV. 2

STURGIS, C. C.; DRINKER, P.; THOMSON, R. M. *Metal fume fever: I. Clinical observations on the effect of the experimental inhalation of zinc oxide by two apparently normal persons*. J Ind Hyg. 1927.

SUCIU, I. et al. *Research on copper poisoning*. Med Lav. 1981.

THUN, M. J. et al. *Nephropathy in cadmium workers: Assessment of risk from airborne occupational exposure to cadmium*. Br J Ind Med. 1989.

THUN, M. J. et al. *Mortality among a cohort of U.S. cadmium production workers--an update*. J Natl Cancer Inst. 1985.



TOFFOLETTO, F. et al. *Ten-year follow-up of biological monitoring of cadmiumexposed workers*. In: Nordgerg GF, Herber RFM, Alessio L, eds. *Cadmium in the human environment: Toxicity and carcinogenicity*. Geneva: International Agency for Research on Cancer, 107-111. 1992.

TREVISAN, A.; GARDIN, C. *Nephrolithiasis in a worker with cadmium exposure in the past*. Int Arch Occup Environ Health. 2005.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Chemical Mass Balance (CMB) Model. *United States*, 2016. Disponível em: <https://www3.epa.gov/scram001/receptor_cmb.htm>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2019.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA CMB8.2 Users Manual. Draft Report, nº. EPA-452/R-04-011, *United States*, Dec. 2004. Disponível em: <<http://www3.epa.gov/ttn/scram/models/receptor/EPA-CMB82Manual.pdf>>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2019.

VERSCHOOR, M. et al. *Renal function of workers with low-level cadmium exposure*. Scand J Work Environ Health. 1987.

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 110/142
	RTC220103		REV. 2

VOGELMEIER, C. et al. *Pulmonary involvement in zinc fume fever*. Chest. 1987.

WALDRON-EDWARD, D.; CHAN, P.; SKORYNA, S. C. *Increased prothrombin time and metabolic changes with high serum aluminum levels following long-term exposure to Bayer-process alumina*. Can Med Assoc. 1971.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. Air Quality Guidelines for Europe. Second Edition, 2000. Disponível em:
<http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/>. Acesso em: 01 de março de 2019.

ZATTA, P.; FAVARATO, M.; NICOLINI, M. *Deposition of aluminum in brain tissues of rats exposed to inhalation of aluminum acetylacetonate*. NeuroReport. 1993.

ZERAHN, B.; KOFOED-ENEVOLDSEN, A.; JENSEN, B. V.; et al. *Pulmonary damage after modest exposure to zinc chloride smoke*. Respiratory Medicine. 1999.

A.1. Resultados do Método PIXE – Amostras em Fontes Emissoras

[illegible][illegible]

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 112/142	
	RTC220103	REV. 2	

**FUNDAÇÃO RENOVA**

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E
CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM
BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A
AGOSTO DE 2021

Nº 1

PÁGINA
112/142

RTC220103

REV.
2

Continuação

[illegible]

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 114/142	
	RTC220103	REV. 2	

**FUNDAÇÃO RENOVA**

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E
CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM
BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A
AGOSTO DE 2021

Nº 1

PÁGINA
114/142

RTC220103

REV.
2

Continuação

[illegible]

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 115/142
		RTC220103	REV. 2

Conclusão

CONCENTRAÇÃO [%]*									
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 8	Amostra 9	Amostra 11	Amostra 12
	01/11/18	01/11/18	01/11/18	01/11/18	15/11/2018	23/01/19	23/01/19	14/11/18	14/11/18
ELEMENTO	VIA PAV. CENTRO	VIA PAV. VOLTA CAPELA	VIA N. PAV. MARG. ESQUERDA	VIA N. PAV. PQ. EXP.	VIA N. PAV. EST. GESTEIRA	SOLO INTACTO CENTRO	SOLO INTACTO ADME	REJEITO BAR. FUNDÃO - P1	REJEITO BAR. FUNDÃO - P2
Pt	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Au	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Hg	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tl	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Bi	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Th	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
U	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

Nota:

< LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.

VIA PAV.: Via pavimentada

VIA N. PAV.: Via não pavimentada

PQ. EXP.: Parque de exposições

MARG. ESQUERDA: Margem esquerda

ADME: Área de Disposição de Material Excedente

BAR. FUNDÃO: Barragem de Fundão

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 116/142
		RTC220103	REV. 2

Tabela A.2 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM₁₀ – Amostras em fontes emissoras – Campanha 7 (16/03/2021 a 17/03/2021)

CONCENTRAÇÃO [%] *							
ELEMENTO	Amostra 4 17/03/21	Amostra 5 17/03/21	Amostra 10 16/03/21	Amostra 9 16/03/21	Amostra 6 17/03/21	Amostra 7 17/03/21	Amostra 8 16/03/21
	VIA N. PAV. GESTEIRA	SOLO INTACTO GESTEIRA	VIA N. PAV. MARG. ESQUERDA	VIA N. PAV. PQ. EXP.	VIA PAV. ESTAÇÃO GESTEIRA	VIA PAV. ESTAÇÃO CENTRO	VIA PAV. ESTAÇÃO VOLTA DA CAPELA
Na	0,491	< LD	< LD	0,627	< LD	< LD	< LD
Mg	0,714	0,312	0,281	0,933	0,267	0,381	0,453
Al	17,273	20,186	17,168	14,592	19,281	15,412	16,539
Si	22,057	19,765	20,429	25,362	21,082	23,203	21,065
P	0,138	0,077	< LD	< LD	0,112	0,078	< LD
S	0,101	< LD	0,040	0,343	0,099	0,066	0,038
Cl	0,039	< LD	0,045	0,122	< LD	0,042	< LD
K	0,773	0,242	0,536	1,626	0,339	1,290	0,757
Ca	1,481	0,111	0,415	1,523	1,455	0,917	0,702
Sc	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ti	0,589	0,724	0,975	0,634	0,666	0,848	0,661
V	0,043	0,057	< LD	< LD	0,080	< LD	0,046
Cr	< LD	0,014	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 117/142	
	RTC220103	REV. 2	

**FUNDAÇÃO RENOVA**

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E
CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM
BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A
AGOSTO DE 2021

Nº 1

PÁGINA
117/142

RTC220103

REV.
2

Continuação

[illegible]

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 119/142	
	RTC220103	REV. 2	

**FUNDAÇÃO RENOVA**

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E
CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM
BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A
AGOSTO DE 2021

Nº 1

PÁGINA
119/142

RTC220103

REV.
2

Continuação

[illegible]

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 120/142
		RTC220103	REV. 2

Conclusão

CONCENTRAÇÃO [%]*							
ELEMENTO	Amostra 4 17/03/21 VIA N. PAV. GESTEIRA	Amostra 5 17/03/21 SOLO INTACTO GESTEIRA	Amostra 10 16/03/21 VIA N. PAV. MARG. ESQUERDA	Amostra 9 16/03/21 VIA N. PAV. PQ. EXP.	Amostra 6 17/03/21 VIA PAV. ESTAÇÃO GESTEIRA	Amostra 7 17/03/21 VIA PAV. ESTAÇÃO CENTRO	Amostra 8 16/03/21 VIA PAV. ESTAÇÃO VOLTA DA CAPELA
Pt	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Au	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Hg	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tl	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Bi	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Th	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
U	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

Nota:

< LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.

VIA N. PAV.: Via não pavimentada

PQ. EXP.: Parque de exposições


MARG. ESQUERDA: Margem esquerda

VIA PAV.: Via Pavimentada

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 121/142
		RTC220103	REV. 2

Tabela A.3 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM₁₀ – Amostras em fontes emissoras – Campanha 8 (06/08/2021 a 09/08/2021)

CONCENTRAÇÃO [%] *							
ELEMENTO	Amostra 4 06/08/21	Amostra 5 06/08/21	Amostra 10 09/08/21	Amostra 9 09/08/21	Amostra 6 06/08/21	Amostra 7 09/08/21	Amostra 8 09/08/21
	VIA N. PAV. GESTEIRA	SOLO INTACTO GESTEIRA	VIA N. PAV. MARG. ESQUERDA	VIA N. PAV. PQ. EXP.	VIA PAV. ESTAÇÃO GESTEIRA	VIA PAV. ESTAÇÃO CENTRO	VIA PAV. ESTAÇÃO VOLTA DA CAPELA
Na	0,754	< LD	< LD	1,009	< LD	0,868	< LD
Mg	1,227	0,558	0,518	0,766	0,399	0,982	0,561
Al	15,161	18,155	16,850	14,259	17,733	13,329	17,230
Si	21,547	22,290	23,431	26,054	20,379	25,968	22,806
P	0,159	0,143	0,086	0,095	0,188	0,185	0,136
S	0,226	0,067	0,120	0,209	0,169	0,270	0,037
Cl	0,099	0,050	0,086	0,050	0,111	0,132	0,027
K	1,092	0,671	0,937	1,427	0,502	1,738	0,949
Ca	1,709	0,281	0,549	2,648	3,412	2,916	0,704
Sc	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ti	0,526	0,609	0,611	0,548	0,577	0,657	0,681
V	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cr	0,011	0,012	0,009	< LD	< LD	< LD	< LD

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 122/142	
	RTC220103	REV. 2	

**FUNDAÇÃO RENOVA**

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E
CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM
BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A
AGOSTO DE 2021

Nº 1

PÁGINA
122/142

RTC220103

REV.
2

Continuação


[illegible]

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 123/142
		RTC220103	REV. 2

Continuação

CONCENTRAÇÃO [%] *							
ELEMENTO	Amostra 4 06/08/21 VIA N. PAV. GESTEIRA	Amostra 5 06/08/21 SOLO INTACTO GESTEIRA	Amostra 10 09/08/21 VIA N. PAV. MARG. ESQUERDA	Amostra 9 09/08/21 VIA N. PAV. PQ. EXP.	Amostra 6 06/08/21 VIA PAV. ESTAÇÃO GESTEIRA	Amostra 7 09/08/21 VIA PAV. ESTAÇÃO CENTRO	Amostra 8 09/08/21 VIA PAV. ESTAÇÃO VOLTA DA CAPELA
Tc	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ru	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Rh	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ag	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
In	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Sn	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Sb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Te	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
I	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cs	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ba	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
La	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ce	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pr	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Nd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

Continuação

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 124/142
		RTC220103	REV. 2

CONCENTRAÇÃO [%] *							
ELEMENTO	Amostra 4 06/08/21	Amostra 5 06/08/21	Amostra 10 09/08/21	Amostra 9 09/08/21	Amostra 6 06/08/21	Amostra 7 09/08/21	Amostra 8 09/08/21
	VIA N. PAV. GESTEIRA	SOLO INTACTO GESTEIRA	VIA N. PAV. MARG. ESQUERDA	VIA N. PAV. PQ. EXP.	VIA PAV. ESTAÇÃO GESTEIRA	VIA PAV. ESTAÇÃO CENTRO	VIA PAV. ESTAÇÃO VOLTA DA CAPELA
Pm	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Sm	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Eu	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Gd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Dy	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ho	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Er	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tm	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Yb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Lu	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Hf	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ta	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
W	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Re	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Os	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ir	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

Conclusão

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 125/142
		RTC220103	REV. 2

CONCENTRAÇÃO [%]*

ELEMENTO	Amostra 4 06/08/21 VIA N. PAV. GESTEIRA	Amostra 5 06/08/21 SOLO INTACTO GESTEIRA	Amostra 10 09/08/21 VIA N. PAV. MARG. ESQUERDA	Amostra 9 09/08/21 VIA N. PAV. PQ. EXP.	Amostra 6 06/08/21 VIA PAV. ESTAÇÃO GESTEIRA	Amostra 7 09/08/21 VIA PAV. ESTAÇÃO CENTRO	Amostra 8 09/08/21 VIA PAV. ESTAÇÃO VOLTA DA CAPELA
Pt	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Au	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Hg	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tl	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pb	< LD	0,002	0,006	0,005	0,004	0,007	0,005
Bi	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Th	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
U	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

Nota:



< LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.

VIA N. PAV.: Via não pavimentada

PQ. EXP.: Parque de exposições

MARG. ESQUERDA: Margem esquerda



VIA PAV.: Via Pavimentada

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 126/142
		RTC220103	REV. 2

A.2. Resultados do Método PIXE – Amostras em Pontos Receptores



Tabela A.4 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM₁₀ – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de nylon

CONCENTRAÇÃO [%]*						
FILTRO DE NYLON						
	Amostra N31	Amostra N32	Amostra N33	Amostra N39	Amostra N43	Amostra N44
	05/10/2020 a 17/03/2021	05/10/2020 a 17/03/2021	05/10/2020 a 17/03/2021	11/06/2021 a 17/08/2021	11/06/2021 a 17/08/2021	11/06/2021 a 17/08/2021
ELEMENTO	CENTRO	VOLTA DA CAPELA	GESTEIRA	VOLTA DA CAPELA	CENTRO	GESTEIRA
Na	0,661	1,025	0,839	0,819	0,860	0,559
Mg	0,347	0,358	0,301	0,297	0,370	< LD
Al	4,352	3,844	2,887	6,609	8,509	3,196
Si	5,733	4,999	3,212	8,063	10,740	3,245
P	0,328	0,306	0,397	< LD	< LD	< LD
S	2,465	3,485	3,148	2,043	2,372	1,045
Cl	0,039	0,008	< LD	0,098	0,204	0,326
K	1,652	1,728	1,608	1,615	2,014	0,839
Ca	1,859	1,194	0,829	1,725	3,667	0,494
Sc	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ti	0,170	0,162	0,025	0,329	0,437	< LD
V	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cr	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Mn	0,065	0,072	0,046	0,074	0,129	< LD
Fe	4,990	5,438	4,234	6,918	9,214	4,029
Co	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ni	0,005	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cu	0,009	0,011	< LD	0,012	0,014	< LD
Zn	0,048	0,049	0,042	0,050	0,112	0,035
Ga	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ge	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
As	0,008	0,006	0,012	< LD	< LD	< LD
Se	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Br	0,008	0,015	< LD	< LD	0,018	< LD
Rb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Sr	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Y	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Zr	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 127/142
		RTC220103	REV. 2

Continuação

CONCENTRAÇÃO [%] *						
FILTRO DE NYLON						
ELEMENTO	Amostra N31	Amostra N32	Amostra N33	Amostra N39	Amostra N43	Amostra N44
	05/10/2020 a 17/03/2021	05/10/2020 a 17/03/2021	05/10/2020 a 17/03/2021	11/06/2021 a 17/08/2021	11/06/2021 a 17/08/2021	11/06/2021 a 17/08/2021
	CENTRO	VOLTA DA CAPELA	GESTEIRA	VOLTA DA CAPELA	CENTRO	GESTEIRA
Nb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Mo	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tc	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ru	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Rh	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ag	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
In	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Sn	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Sb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Te	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
I	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cs	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ba	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
La	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ce	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pr	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Nd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pm	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Sm	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Eu	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Gd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Dy	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ho	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Er	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tm	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Yb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Lu	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Hf	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 128/142
		RTC220103	REV. 2

Conclusão

CONCENTRAÇÃO [%]*						
FILTRO DE NYLON						
ELEMENTO	Amostra N31	Amostra N32	Amostra N33	Amostra N39	Amostra N43	Amostra N44
	05/10/2020 a 17/03/2021	05/10/2020 a 17/03/2021	05/10/2020 a 17/03/2021	11/06/2021 a 17/08/2021	11/06/2021 a 17/08/2021	11/06/2021 a 17/08/2021
	CENTRO	VOLTA DA CAPELA	GESTEIRA	VOLTA DA CAPELA	CENTRO	GESTEIRA
Os	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ir	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pt	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Au	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Hg	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tl	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pb	< LD	< LD	< LD	< LD	0,037	< LD
Bi	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Th	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
U	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

Nota:

< LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.





		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 129/142
		RTC220103	REV. 2



Tabela A.5 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM₁₀ – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de MCE

CONCENTRAÇÃO [%]*						
FILTRO DE MCE						
ELEMENTO	Amostra C31 05/10/2020 a 17/03/2021	Amostra C32 05/10/2020 a 17/03/2021	Amostra C33 05/10/2020 a 17/03/2021	Amostra C39 11/06/2021 a 17/08/2021	Amostra C43 11/06/2021 a 17/08/2021	Amostra C44 11/06/2021 a 17/08/2021
	CENTRO	VOLTA DA CAPELA	GESTEIRA	VOLTA DA CAPELA	CENTRO	GESTEIRA
Na	0,919	0,925	1,069	2,002	0,991	1,446
Mg	0,329	0,358	0,288	0,490	< LD	< LD
Al	2,707	5,355	2,747	7,434	7,563	7,319
Si	3,508	6,890	3,202	8,908	9,155	6,977
P	0,241	0,217	0,295	< LD	< LD	< LD
S	3,099	4,298	4,271	6,079	2,904	3,706
Cl	0,040	< LD	< LD	< LD	0,210	0,087
K	1,543	1,703	1,872	3,130	1,898	2,387
Ca	1,112	1,556	0,979	1,560	3,090	1,615
Sc	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ti	0,166	0,390	< LD	0,395	0,422	0,535
V	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cr	0,020	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Mn	0,044	0,065	0,068	0,073	0,083	0,095
Fe	3,444	7,125	4,332	7,646	6,765	7,137
Co	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ni	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cu	0,012	0,014	< LD	< LD	< LD	< LD
Zn	0,051	0,068	0,059	0,095	0,065	0,092
Ga	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ge	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
As	0,011	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Se	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Br	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Rb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Sr	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Y	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Zr	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Nb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Mo	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tc	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 130/142
		RTC220103	REV. 2

Continuação

CONCENTRAÇÃO [%]*						
FILTRO DE MCE						
ELEMENTO	Amostra C31 05/10/2020 a 17/03/2021	Amostra C32 05/10/2020 a 17/03/2021	Amostra C33 05/10/2020 a 17/03/2021	Amostra C39 11/06/2021 a 17/08/2021	Amostra C43 11/06/2021 a 17/08/2021	Amostra C44 11/06/2021 a 17/08/2021
	CENTRO	VOLTA DA CAPELA	GESTEIRA	VOLTA DA CAPELA	CENTRO	GESTEIRA
Ru	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Rh	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ag	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
In	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Sn	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Sb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Te	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
I	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cs	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ba	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
La	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ce	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pr	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Nd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pm	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Sm	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Eu	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Gd	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Dy	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ho	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Er	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tm	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Yb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Lu	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Hf	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ta	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
W	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Re	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 131/142
		RTC220103	REV. 2

Conclusão

CONCENTRAÇÃO [%]*						
FILTRO DE MCE						
ELEMENTO	Amostra C31 05/10/2020 a 17/03/2021	Amostra C32 05/10/2020 a 17/03/2021	Amostra C33 05/10/2020 a 17/03/2021	Amostra C39 11/06/2021 a 17/08/2021	Amostra C43 11/06/2021 a 17/08/2021	Amostra C44 11/06/2021 a 17/08/2021
	CENTRO	VOLTA DA CAPELA	GESTEIRA	VOLTA DA CAPELA	CENTRO	GESTEIRA
Os	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ir	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pt	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Au	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Hg	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Tl	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Bi	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Th	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
U	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

Nota:

< LD – Fração mássica menor que o limite de detecção para o elemento.



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - AGOSTO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 132/142
	RTC220103		REV. 2

ANEXO A – Arquivos de Saída do Modelo CMB

O presente anexo mostra os arquivos de saída contendo os resultados do modelo CMB. As Figuras A.1 a A.6 apresentam os arquivos de saída para cada ponto receptor correspondente ao período analisado.

Abaixo encontra-se a descrição das principais variáveis, parâmetros estatísticos e medidas de desempenho do modelo.

- **BEST FIT** – esta função do CMB permite que todos os arranjos de pares das espécies químicas correspondentes entre as amostras e as fontes emissoras sejam percorridos na matriz até que a melhor composição seja alcançada.
- **R-SQUARE** – mostra o coeficiente de correlação do ajuste entre os valores encontrados pelo programa e os valores medidos. Ela é determinada por uma regressão linear dos valores medidos versus valores calculados pelo modelo para as espécies. Os valores de R-Square variam de 0 a 1,0, sendo que quanto mais próximo de 1,0, melhor são as estimativas de contribuição das fontes e melhor é a explicação das concentrações medidas;
- **% MASS** – percentual de massa que o programa conseguiu explicar. Esse percentual é a soma dos percentuais das fontes calculadas pelo modelo, deve ser igual a 100%, porém são aceitáveis valores entre 80 e 120% devido às incertezas apresentadas pelo modelo;
- **CHI SQUARE** – é a soma ponderada dos quadrados das diferenças entre as concentrações das espécies calculadas e medidas. Valores altos de qui-quadrado ($> 4,0$) indicam que uma ou mais das concentrações das espécies calculadas diferem das concentrações medidas por vários intervalos de incerteza;
- **DEGREES FREEDOM** – os graus de liberdade são o resultado da subtração entre o número de espécies químicas empregadas no ajuste e o número de fontes utilizadas. São considerados aceitáveis soluções com graus de liberdade maior que 5;
- **FIT MEASURE** – é o coeficiente que corresponde à um peso obtido através de uma ponderação entre as variáveis de desempenho do CMB (qui-quadrado, R^2 , percentual de massa e a fração de fontes selecionadas). Os valores obtidos devem ser positivos, podendo variar de 0 a 1 como valor de entrada na tela inicial do

		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - AGOSTO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 133/142
	RTC220103		REV. 2

CMB, sendo 1 aplicado como valor padrão (*default*). Após o processamento do arranjo das espécies pelo CMB através do “*Best Fit*”, quanto maior for o valor do “*Fit Measure*”, há um indicativo que o melhor arranjo foi obtido.

- **SOURCE** – mostra se as fontes envolvidas são aceitas, isto é, se entraram ou não no ajuste dos mínimos quadrados, seguidos do código e nome da fonte;
- **SCE** – indica o percentual (%) de contribuição de massa de PM₁₀ para cada fonte. A soma desses percentuais aproxima-se do percentual de massa total. Estimativas de contribuição negativas de fontes podem ocorrer quando um perfil é colinear com outro perfil ou quando a contribuição da fonte está próxima de zero;
- **STD ERROR** – a incerteza da contribuição de uma fonte é expressa como um desvio padrão do valor de contribuição mais provável. Este é um indicador de precisão ou certeza da contribuição de uma fonte. O valor do Erro Padrão é calculado por meio da propagação das incertezas das medições das espécies nas fontes e receptores. Desta forma, existe aproximadamente 66% de probabilidade que a verdadeira contribuição das fontes esteja dentro de um erro padrão e aproximadamente 95% de probabilidade de estar dentro de dois erros padrão.
- **Tstat** – é a razão entre a estimativa de contribuição da fonte e o erro padrão. Um Tstat inferior a 2,0 indica que a estimativa da contribuição da fonte é igual ou inferior a um limite de detecção. Valores de Tstat muito baixo podem ser causados por colinearidade entre perfis;
- **SPECIES** – mostra as espécies químicas medidas e que fizeram parte da matriz de entrada do programa;
- **MEASURED** – indica a concentração medida com seus respectivos erros;
- **CALCULATED** – indica a concentração obtida pelo modelo com seus respectivos erros;
- **RATIO CALCULATED/MEASURED** – indica a razão entre os elementos calculados pelo programa e medidos experimentalmente;
- **RATIO RESIDUAL/UNCERTAINTY** – indica a incerteza residual da razão entre os elementos calculados pelo programa e medidos experimentalmente.



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - AGOSTO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 141/142	
	RTC220103	REV. 2	

Figura A.8 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 8 (Volta da Capela)

FITTING STATISTICS:									
R SQUARE		0.92		% MASS		43.6			
CHI SQUARE		1.74		DEGREES FREEDOM		9			
SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:									
SOURCE									
EST CODE	NAME	SCE(%)	Std Err	Tstat					
YES MED78	0	0.43560	0.03254	13.38748					
		0.43560							
MEASURED CONCENTRATION FOR SIZE: PM10									
1.0+-		0.1							
Eligible Space Collinearity Display									
ELIGIBLE SPACE DIM. = 1 FOR MAX. UNC. = 0.20000 (20.% OF TOTAL MEAS. MASS)									
1 / Singular Value									
0.03254									
NUMBER ESTIMABLE SOURCES = 1 FOR MIN. PROJ. = 0.95									
PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE					
1.0000	MED78								
ESTIMABLE LINEAR COMBINATIONS OF INESTIMABLE SOURCES									
COEFF. SOURCE	COEFF. SOURCE	COEFF. SOURCE	COEFF. SOURCE	SCE	Std Err				
SPECIES CONCENTRATIONS:									
SPECIES		FIT	MEASURED	CALCULATED	CALCULATED	MEASURED	RESIDUAL	UNCERTAINTY	
TOTAL	IC		1.00000+-	0.10000	0.43560+-	0.03254	0.44+-	0.05	-5.4
Na	IC1	*	0.01411+-	0.00836	0.00136+-	0.00193	0.10+-	0.15	-1.5
Mg	IC2	*	0.00394+-	0.00136	0.00265+-	0.00112	0.67+-	0.37	-0.7
Al	IC3	*	0.07022+-	0.00583	0.06827+-	0.00649	0.97+-	0.12	-0.2
Si	IC4	*	0.08486+-	0.00598	0.10254+-	0.00931	1.21+-	0.14	1.6
P	IC5		0.00000+-	0.00000	0.00032+-	0.00030	0.00+-	0.00	1.1
S	IC6	*	0.04062+-	0.02854	0.00061+-	0.00052	0.02+-	0.02	-1.4
Cl	IC7	*	0.00049<	0.00070	0.00027<	0.00020	0.56<	0.88	-0.3
K	IC8	*	0.02373+-	0.01071	0.00504+-	0.00187	0.21+-	0.12	-1.7
Ca	IC9		0.01643+-	0.00117	0.00565+-	0.00426	0.34+-	0.26	-2.4
Ti	IC10	*	0.00362+-	0.00046	0.00306+-	0.00061	0.84+-	0.20	-0.7
V	IC11		0.00000+-	0.00000	0.00003+-	0.00007	0.00+-	0.00	0.4
Cr	IC12		0.00000+-	0.00000	0.00001+-	0.00001	0.00+-	0.00	0.4
Mn	IC13		0.00074+-	0.00001	0.00036+-	0.00009	0.48+-	0.13	-4.1
Fe	IC14	*	0.07282+-	0.00515	0.04628+-	0.01148	0.64+-	0.16	-2.1
Ni	IC15		0.00000+-	0.00000	0.00001+-	0.00001	0.00+-	0.00	1.5
Cu	IC16	*	0.00006<	0.00009	0.00001<	0.00000	0.21<	0.30	-0.6
Zn	IC17		0.00073+-	0.00032	0.00003+-	0.00001	0.04+-	0.03	-2.2
As	IC18		0.00000+-	0.00000	0.00000+-	0.00001	0.00+-	0.00	0.7
Rb	IC21		0.00000+-	0.00000	0.00002+-	0.00002	0.00+-	0.00	0.9
Sr	IC22		0.00000+-	0.00000	0.00003+-	0.00002	0.00+-	0.00	1.4
Pb	IC23		0.00000+-	0.00000	0.00001+-	0.00001	0.00+-	0.00	0.9



		FUNDAÇÃO RENOVA	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM BARRA LONGA E GESTEIRA - AGOSTO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 142/142
		RTC220103	REV. 2

Figura A.9 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 8 (Gesteira)

FITTING STATISTICS:									
R SQUARE		0.97		% MASS		41.6			
CHI SQUARE		2.00		DEGREES FREEDOM		5			
SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:									
SOURCE									
EST CODE	NAME	SCE(%)		Std Err		Tstat			

YES VNP	0	0.26869		0.10634		2.52661			
YES VPS	0	0.14720		0.09990		1.47351			

0.41588									
MEASURED CONCENTRATION FOR SIZE: PM10									
1.0+- 0.1									
Eligible Space Collinearity Display									
=====									
ELIGIBLE SPACE DIM. = 2 FOR MAX. UNC. = 0.20000 (20.% OF TOTAL MEAS. MASS)									
1 / Singular Value									

0.01590 0.14503									

NUMBER ESTIMABLE SOURCES = 2 FOR MIN. PROJ. = 0.95									
PROJ. SOURCE		PROJ. SOURCE		PROJ. SOURCE		PROJ. SOURCE		PROJ. SOURCE	

1.0000 VNP		1.0000 VPS							

ESTIMABLE LINEAR COMBINATIONS OF INESTIMABLE SOURCES									
COEFF. SOURCE		COEFF. SOURCE		COEFF. SOURCE		COEFF. SOURCE		SCE Std Err	
=====									
SPECIES CONCENTRATIONS:									
						CALCULATED		RESIDUAL	
SPECIES		FIT		MEASURED		CALCULATED		MEASURED UNCERTAINTY	

TOTAL	IC	1.00000+- 0.10000		0.41588+- 0.02342		0.42+- 0.05		-5.7	
Na	IC1	0.01446+- 0.00359		0.00112+- 0.00103		0.08+- 0.07		-3.6	
Mg	IC2	0.00000< 0.00071		0.00307< 0.00074		0.00< 0.00		3.0	
Al	IC3	*	0.07319+- 0.00253	0.07236+- 0.00375		0.99+- 0.06		-0.2	
Si	IC4	*	0.06978+- 0.00207	0.08294+- 0.01117		1.19+- 0.16		1.2	
P	IC5	*	0.00000< 0.00173	0.00055< 0.00011		0.00< 0.00		0.3	
S	IC6	0.03706+- 0.01292		0.00052+- 0.00021		0.01+- 0.01		-2.8	
Cl	IC7	0.00087+- 0.00000		0.00022+- 0.00012		0.25+- 0.14		-5.4	
K	IC8	0.02387+- 0.00529		0.00290+- 0.00067		0.12+- 0.04		-3.9	
Ca	IC9	0.01615+- 0.00148		0.00539+- 0.00268		0.33+- 0.17		-3.5	
Ti	IC10	0.00535+- 0.00061		0.00258+- 0.00026		0.48+- 0.07		-4.2	
Cr	IC11	*	0.00000< 0.00009	0.00002< 0.00002		0.00< 0.00		0.2	
Mn	IC12	*	0.00095+- 0.00019	0.00033+- 0.00010		0.35+- 0.13		-2.9	
Fe	IC13	*	0.07138+- 0.00408	0.06819+- 0.01303		0.96+- 0.19		-0.2	
Ni	IC14	0.00000< 0.00000		0.00001< 0.00001		0.00< 0.00		1.3	
Cu	IC15	0.00000+- 0.00000		0.00001+- 0.00000		0.00+- 0.00		3.6	