



**RTC220102-R2**



**FUNDAÇÃO**  
**renova**

**ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO  
MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU**

**JANEIRO DE 2023**

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 2/110
	RTC220102		REV. 2



**ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL  
PARTICULADO EM PARACATU  
NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021  
RTC220102-R2**

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 3/110	
	RTC220102	REV. 2	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Amostras de PM10 coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores em Paracatu/MG – Campanha 5 (14/11/2018 a 12/02/2019) <sup>3</sup> e Campanha 6 (18/03/2019 a 13/06/2019). .....	17
Figura 3.2 – Amostras de PM10 coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores em Paracatu/MG – Campanha 7 (06/10/2020 a 17/03/2021).....	18
Figura 3.3 – Amostras de PM10 coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores em Paracatu/MG – Campanha 8 (11/06/2021 a 09/08/2021).....	19
Figura 4.1 – Concentrações de PM10 medidas na Estação Paracatu no período de agosto de 2018 a agosto de 2021. (a) Médias diárias (b) Médias mensais. ....	23
Figura 5.1 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 5 (14/11/2018 a 12/02/2019).....	27
Figura 5.2 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 7 (02/03/2021 a 15/03/2021).....	28
Figura 5.3 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 8 (05/08/2021 a 06/08/2021).....	29
Figura 5.4 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em ponto receptor (Estação Paracatu) com filtros de nylon – Campanhas 6 (N29) (18/03/2019 a 13/06/2019), Campanha 7 (N36) (06/10/2020 a 17/03/2021) e Campanha 8 (N38) (11/06/2021 a 09/08/2021).....	31
Figura 5.5 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em ponto receptor (Estação Paracatu) com filtros MCE – Campanhas 6 (C29) (18/03/2019 a 13/06/2019), Campanha 7 (C36) (06/10/2020 a 17/03/2021) e Campanha 8 (C38) (11/06/2021 a 09/08/2021).....	32
Figura 6.1– Média entre os perfis químicos dos elementos detectados pelo método PIXE nas amostras coletadas em fontes emissoras de via não pavimentada, material afetado, solo intacto e obra Reassentamento – Média das Campanhas 5, 7 e 8 .....	40
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 Paracatu – Campanha 6 (18/03/2019 a 13/06/2019). ....	43
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 Paracatu – Campanha 7 (06/10/2020 à 17/03/2021). ....	44
Figura 6.4 – Evolução das concentrações diárias de PM10 e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor estação de monitoramento de qualidade do ar Paracatu – Campanha 8 (11/06/2021 à 09/08/2021). ....	45
Figura A.1 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 6 (18/03/2019 a 13/06/2019)	108
Figura A.2 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 7 (06/10/2020 a 17/03/2021)	109
Figura A.3 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 8 (11/06/2021 a 09/08/2021)	110

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 4/110	
	RTC220102	REV. 2	


## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Amostras de PM10 coletadas em materiais em fontes emissoras e em ponto receptor definido pela Estação Paracatu em Paracatu/MG.....	16
Tabela 4.1 – Padrões de Qualidade do Ar - Resolução CONAMA nº 491/2018.....	22
Tabela 5.1 – Concentrações em ordem decrescente dos elementos ferro, silício e alumínio nas amostras de fontes emissoras durante as Campanhas 5, 7 e 8 coletadas em Paracatu/MG.....	26
Tabela 6.1 – Composição química média e incerteza entre as amostras de PM10 em fontes emissoras avaliadas na modelagem CMB – Campanhas 5, 7 e 8.....	38
Tabela 6.2 – Composição química média e incerteza entre as amostras de PM10 no ponto receptor (Estação Paracatu) avaliado na modelagem CMB – Campanhas 6, 7 e 8.....	39
Tabela 6.3 – Contribuição percentual das fontes emissoras nos pontos receptores analisados – Modelagem CMB .....	40
Tabela 7.1 – Concentração de alumínio na Estação Paracatu .....	48
Tabela 7.2 – Concentração de arsênio na Estação Paracatu .....	50
Tabela 7.3 – Concentração de cobre na Estação Paracatu.....	57
Tabela 7.4 – Concentração de ferro na Estação Paracatu.....	59
Tabela 7.5 – Concentração de manganês na Estação Paracatu.....	61
Tabela 7.6 – Concentração de silício na Estação Paracatu.....	64
Tabela 7.7 – Concentração de zinco na Estação Paracatu .....	66
Tabela A.1 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em fontes emissoras – Campanha 5 (14/11/2018 a 12/02/2019) .....	88
Tabela A.2 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em fontes emissoras – Campanha 7 (02/03/2021 a 15/03/2021). .....	91
Tabela A.3 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em fontes emissoras – Campanha 8 (05/08/2021 a 06/08/2021). .....	94
Tabela A.4 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de nylon e filtro de celulose – Campanha 6 (18/03/2019 a 13/06/2019) .....	97
Tabela A.5 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de nylon e filtro de celulose – Campanha 7 (06/10/2020 a 17/03/2021) .....	100
Tabela A.6 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de nylon e filtro de celulose – Campanha 8 (11/06/2021 a 09/08/2021) .....	103

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 5/110
		RTC220102	REV. 2

## LISTA DE SIGLAS E/OU SÍMBOLOS

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
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	Irídio
K	Potássio
La	Lantânio
Lu	Lutécio
MeV	Mega elétrons-volt
Mg	Magnésio

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 6/110
		RTC220102	REV. 2

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 <sub>2.5</sub>	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm
PM <sub>10</sub>	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
Tl	Tálio
Tm	Túlio
U	Urânio

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 7/110
		RTC220102	REV. 2



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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 8/110	
	RTC220102	REV. 2	

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO EXECUTIVO.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>13</b>
<b>3. Metodologia.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1. Coleta e preparação de amostras.....</b>	<b>14</b>
3.1.1. Amostras em fontes emissoras .....	14
3.1.2. Amostras em pontos receptores .....	15
<b>3.2. Análises químicas .....</b>	<b>20</b>
3.2.1. Métodos analíticos .....	20
3.2.2. Análises de dados.....	20
<b>4. Caracterização da localidade analisada .....</b>	<b>20</b>
<b>5. Análises químicas pelo método PIXE .....</b>	<b>23</b>
<b>6. Modelagem CMB.....</b>	<b>33</b>
<b>6.1. Descrição do modelo CMB .....</b>	<b>33</b>
<b>6.2. Análise do modelo CMB .....</b>	<b>36</b>
<b>7. Potenciais efeitos para a saúde.....</b>	<b>46</b>
7.1. Alumínio.....	47
7.2. Arsênio .....	49
7.3. Cádmio .....	50
7.4. Chumbo.....	54
7.5. Cobre .....	55
7.6. Ferro.....	57
7.7. Manganês .....	59
7.8. Níquel .....	61
7.9. Silício .....	64
7.10. Zinco .....	65
<b>8. Conclusão .....</b>	<b>68</b>
<b>9. Equipe Técnica .....</b>	<b>71</b>
<b>10. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE A – Resultados das Análises Químicas de PM<sub>10</sub> – Método PIXE .....</b>	<b>88</b>
A.1. Resultados do Método PIXE – Amostras em Fontes Emissoras .....	88
A.2. Resultados do Método PIXE – Amostras em Pontos Receptores.....	97
<b>ANEXO A – Arquivos de Saída do Modelo CMB .....</b>	<b>97</b>



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 9/110	
	RTC220102	REV. 2	

## SUMÁRIO EXECUTIVO



O rompimento da Barragem de Fundão, pertencente ao Complexo Germano da Samarco Mineração 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 ao qual a população da área diretamente afetada está exposta.

De acordo com as ações previstas no Plano de Monitoramento da Qualidade do Ar e Emissões Atmosféricas (ECOSOFT, 2021), o presente trabalho faz uma avaliação dos resultados relacionados às análises químicas em amostras de partículas que são realizadas para auxiliar no entendimento sobre as partículas inaláveis, material particulado menor que 10 µm (PM<sub>10</sub>). 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 para um determinado receptor (qualidade do ar), bem como avaliar os potenciais efeitos que os elementos químicos presentes na poeira podem causar à 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 no ponto receptor (Estação Paracatu), totalizando 18 amostras que foram posteriormente 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, material afetado, obras e solo intacto) no receptor (Estação Paracatu).

Com as análises PIXE também foi possível comparar as amostras das 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, de modo a compreender se há potencial risco para a saúde da população do subdistrito de Paracatu, município de Mariana/MG.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 10/110	
	RTC220102	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). No trajeto percorrido pelo material liberado, além do distrito de Bento Rodrigues, Barra Longa, entre outros, a região de Paracatu (MG) teve sua área diretamente afetada pelo EVENTO.

Com finalidade de recuperar as áreas atingidas, diversas ações foram e vêm sendo realizadas pela Fundação Renova (FUNDAÇÃO), tais como: remoção de material depositado<sup>1</sup> e sedimento<sup>2</sup> de locais atingidos (ruas, praças, rios, etc); 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, dentre outras.

Tais ações, quando executadas, têm o potencial de emissão de poluentes atmosféricos. 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 (ECOSOFT 2019), as principais fontes emissoras de poluentes atmosféricos estão relacionadas à movimentação de materiais e remoção de sedimento, áreas expostas suscetíveis à erosão eólica, pilhas de materiais, operações no solo (escavação, terraplanagem, etc.), ressuspensão de partículas nas vias de tráfego, escapamento de veículos, máquinas e equipamentos.

<sup>1</sup> Fração estéril produzida pelo beneficiamento do minério.

<sup>2</sup> Material sólido desagregado, transportado pela água e que durante o trajeto, incorporou solos e vegetação, presentes nas calhas, encostas e planícies aluvionares.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 11/110	
	RTC220102	REV. 2	

Em virtude do potencial de emissões atmosféricas relacionados foi elaborado um plano de monitoramento da qualidade do ar e controle de emissões atmosféricas (ECOSOFT 2019) considerando as regiões mais afetadas pelo EVENTO, a montante da UHE Risoleta Neves. O Plano propôs a instalação de uma rede automática de monitoramento da qualidade do ar (RAMQAr), composta por estações de medição contínua. Dentre as localidades, o distrito de Paracatu (MG) foi selecionado como um ponto de interesse para a instalação de uma estação de monitoramento automática de material particulado menor que 10  $\mu\text{m}$  e menor que 2,5  $\mu\text{m}$ .

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 pelas ações de recuperação promovidas pela FUNDAÇÃO.

Portanto, neste relatório são apresentados os resultados relacionados às análises químicas realizadas para a fração de partículas inaláveis, o material particulado menor que 10  $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>). 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 PM<sub>10</sub> em um ponto receptor na região de Paracatu (MG), coletadas durante as campanhas 6, 7 e 8 e também em materiais presentes nas fontes emissoras de material particulado das campanhas 5, 7 e 8. Na campanha 6 não houve coleta de amostras de fontes na localidade, uma vez que as coletas das fontes da Campanha 5 finalizaram em fevereiro de 2019, dessa forma, para representação das fontes emissoras, foram utilizadas as amostras de solo natural não-afetado, partículas depositadas nas superfícies das vias de tráfego não pavimentadas e material afetado coletadas durante a Campanha 5 (14/11/2018 a 12/02/2019), e as amostras de vias de tráfego, material afetado e obras coletadas durante as campanhas 7 (02/03/2021 a 15/03/2021) e 8 (05/08/2021 a 06/08/2021).

A estação de qualidade do ar de Paracatu (MG) foi caracterizada como ponto receptor, da qual foram utilizadas as amostras de partículas das campanhas 6 (18/03/2019 a 13/06/2019), 7 (06/10/2020 a 17/03/2021) e 8 (11/06/2021 a 09/08/2021). Para realizar as análises químicas elementares dos constituintes do PM<sub>10</sub>, foi utilizada a técnica analítica *Proton Induced X-Ray Emission* (PIXE).


		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 12/110
	RTC220102		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 o receptor em Paracatu (*source apportionment*). Neste estudo, as análises de composição química de fontes emissoras e receptor, realizadas por PIXE, foram utilizadas para a definição dos perfis de especiação utilizados no modelo receptor *Chemical Mass Balance* (CMB), aplicados para o cálculo da contribuição das diferentes fontes para as concentrações de  $PM_{10}$  medidas na Estação Paracatu.

Ressalta-se que os resultados apresentados devem ser analisados considerando as limitações impostas pelos métodos utilizados, das quais se destacam:

- 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 Paracatu (MG).

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 13/110
	RTC220102		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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 14/110	
	RTC220102	REV. 2	

### 3. Metodologia

#### 3.1. Coleta e preparação de amostras

##### 3.1.1. Amostras em fontes emissoras

As amostras de PM<sub>10</sub> contidas em fontes emissoras foram coletadas diretamente nas fontes mediante amostras compostas (Tabela 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;
- Material afetado pelos sedimentos provenientes da Barragem de Fundão, como os que compõem a área das ruínas;
- 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.

Ao todo, foram coletadas 12 amostras, sendo 6 referentes à campanha 5, 3 amostras foram coletadas durante a campanha 7 e 3 amostras foram coletadas na campanha 8. 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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU – NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 15/110	
	RTC220102	REV. 2	

### 3.1.2. Amostras em pontos receptores

As amostras em ponto receptor foram coletadas na estação de qualidade do ar de Paracatu (Tabela 3.1) durante 3 períodos (campanhas 6, 7 e 8). Em função da técnica analítica PIXE, as amostras de PM<sub>10</sub> foram coletadas com auxílio de um monitor automático de concentrações de partículas, modelo *E-Sampler Met One* com ciclone separador de PM<sub>10</sub>, 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 PM<sub>10</sub> 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 2 amostras na campanha 6, 2 amostras na campanha 7 e mais 1 amostras na campanha 8, totalizando 6 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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 16/110
		RTC220102	REV. 2

**Tabela 3.1** – Amostras de PM<sub>10</sub> coletadas em materiais em fontes emissoras e em ponto receptor definido pela Estação Paracatu em Paracatu/MG

CAMP.	CÓDIGO	DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	LOCAL	COORD. (LAT; LON)	TIPO	CATEGORIA	DATA	ANÁLISE
5	10	Via Não Pavimentada	Paracatu de Baixo	-20,306510; -43,230050	Sólido em pó	Fonte	23/01/2019	PIXE
5	11	Rejeito - Bacia de Fundão (P1)	Mariana	-20,208889; -43,461888	Sólido em pó	Fonte	14/11/2018	PIXE
5	12	Rejeito - Bacia de Fundão (P2)	Mariana	-20,209709; -43,463026	Sólido em pó	Fonte	14/11/2018	PIXE
5	16	Material Afetado (P1)	Paracatu de Baixo	-20,306421; -43,229770	Sólido em pó	Fonte	12/02/2019	PIXE
5	17	Solo Intacto	Paracatu de Baixo	-20,307311; -43,227510	Sólido em pó	Fonte	12/02/2019	PIXE
5	18	Material Afetado (P2)	Paracatu de Baixo	-20,304063; -43,229625	Sólido em pó	Fonte	12/02/2019	PIXE
6	N29	Estação Paracatu	Paracatu	-20,306425; -43,229816	Filtro de nylon	Receptor	18/03/2019 a 13/06/2019	PIXE
6	C29	Estação Paracatu	Paracatu	-20,306425; -43,229816	Filtro de MCE	Receptor	18/03/2019 a 13/06/2019	PIXE
7	N36	Estação Paracatu	Paracatu	-20,306425; -43,229816	Filtro de nylon	Receptor	06/10/2020 a 17/03/2021	PIXE
7	C36	Estação Paracatu	Paracatu	-20,306425; -43,229816	Filtro de MCE	Receptor	06/10/2020 a 17/03/2021	PIXE
7	1	Via Não pavimentada	Paracatu	-20,306344°; -43,230132°	Sólido em pó	Fonte	02/03/2021	PIXE
7	2	Obra Reassentamento	Paracatu	-20,327022°; -43,237578°	Sólido em pó	Fonte	15/03/2021	PIXE
7	3	Material Afetado	Paracatu	-20,304241° -43,230354°	Sólido em pó	Fonte	15/03/2021	PIXE
8	N38	Estação Paracatu	Paracatu	-20,306425; -43,229816	Filtro de nylon	Receptor	11/06/2021 a 09/08/2021	PIXE
8	C38	Estação Paracatu	Paracatu	-20,306425; -43,229816	Filtro de MCE	Receptor	11/06/2021 a 09/08/2021	PIXE
8	1	Via Não pavimentada	Paracatu	-20,306344°; -43,230132°	Sólido em pó	Fonte	06/08/2021	PIXE
8	2	Obra Reassentamento	Paracatu	-20,327022°; -43,237578°	Sólido em pó	Fonte	05/08/2021	PIXE
8	3	Material Afetado	Paracatu	-20,304241°; -43,230354°	Sólido em pó	Fonte	06/08/2021	PIXE





## FUNDAÇÃO RENOVA

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

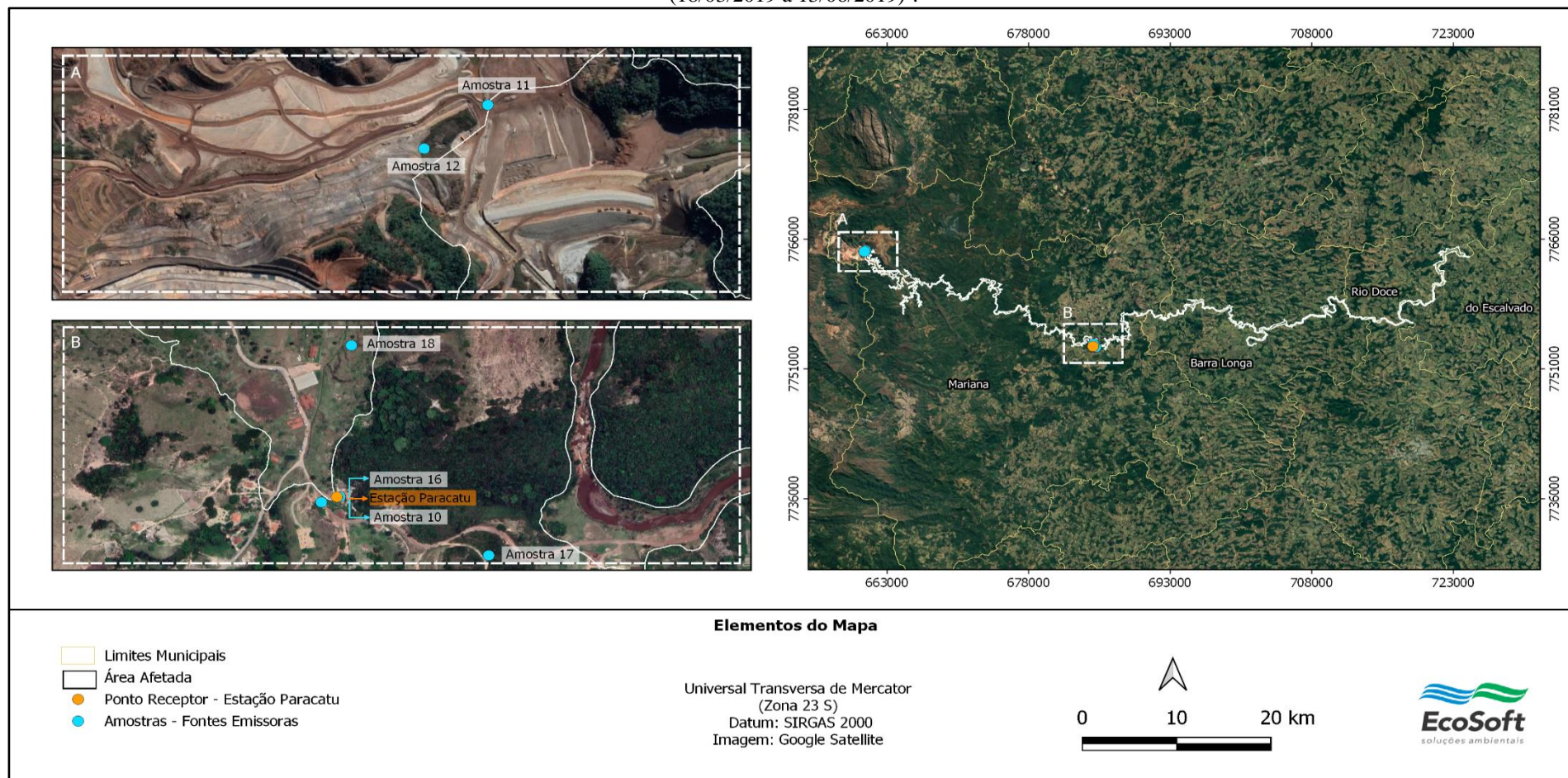
Nº 1

PÁGINA  
17/110

RTC220102

REV.  
2

**Figura 3.1** – Amostras de PM<sub>10</sub> coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores em Paracatu/MG – Campanha 5 (14/11/2018 a 12/02/2019)<sup>3</sup> e Campanha 6 (18/03/2019 a 13/06/2019)<sup>3</sup>.



<sup>3</sup> 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 PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021

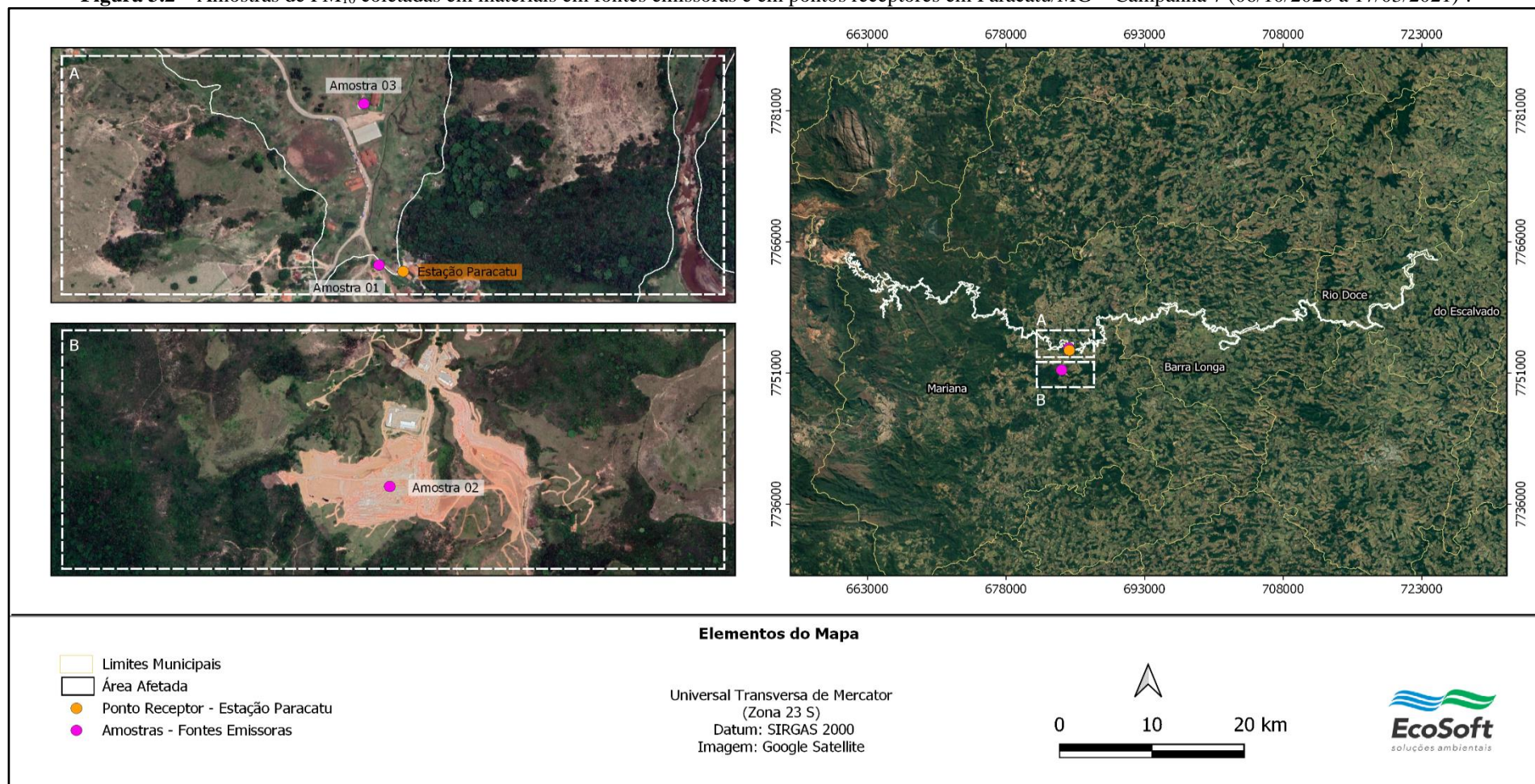
Nº 1

PÁGINA  
18/110

RTC220102

REV.  
2

**Figura 3.2 – Amostras de PM<sub>10</sub> coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores em Paracatu/MG – Campanha 7 (06/10/2020 a 17/03/2021)<sup>4</sup>.**



<sup>4</sup> 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 PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021

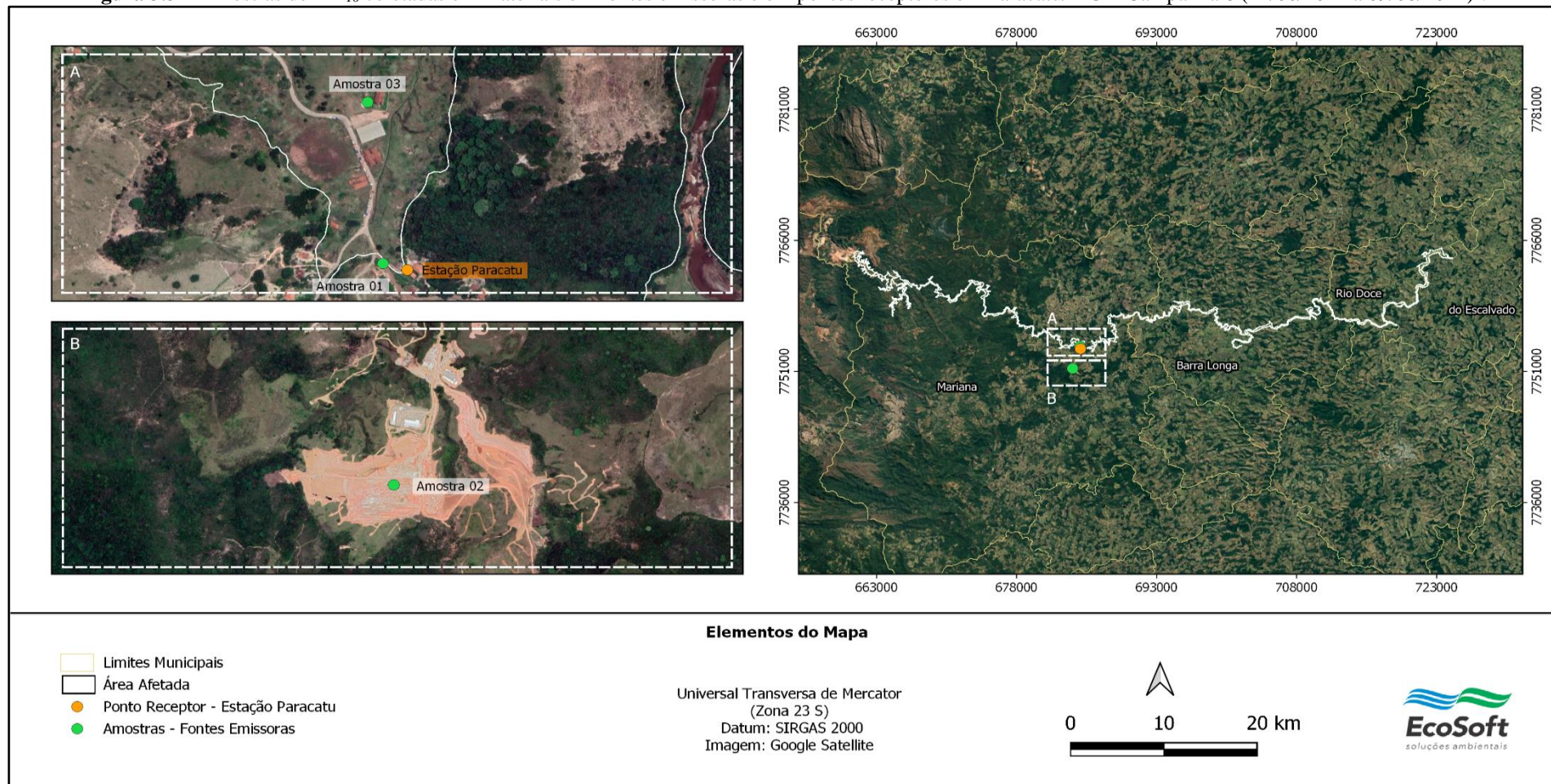
Nº 1

PÁGINA  
19/110

RTC220102

REV.  
2

**Figura 3.3** – Amostras de PM<sub>10</sub> coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores em Paracatu/MG – Campanha 8 (11/06/2021 a 09/08/2021)<sup>5</sup>.



<sup>5</sup> 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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 20/110
	RTC220102		REV. 2

## 3.2. Análises químicas

### 3.2.1. Métodos analíticos

As análises químicas, feitas pelo método PIXE, foram realizadas pelo laboratório da empresa 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 PM<sub>10</sub> e preparação dos perfis de especiação química a serem utilizados no modelo CMB.

## 4. Caracterização da localidade analisada

A localidade de Paracatu, subdistrito de Monsenhor Horta, pertencente ao município de Mariana (MG), configurou-se como uma das regiões mais afetadas pelo rompimento da Barragem de Fundão.

Algumas atividades de recuperação realizadas no subdistrito, potencialmente emissoras de poluentes atmosféricos ocorreram entre os anos de 2015 e 2017 e referem-se à estabilização dos trechos das margens do rio Gualaxo do Norte (enrocamentos), bem como a movimentação dos materiais e sua disposição em pilhas para limpeza das vias. Estas atividades incluíam ações de armazenamento de sedimentos em pilhas, promovendo arraste eólico, movimentação de materiais, operação de máquinas e equipamentos, e tráfego de veículos pesados nas vias.

A partir do ano de 2018, a dinâmica das atividades realizadas na localidade passou a incluir a realização de obras voltadas para a limpeza de rejeitos, e, posteriormente, construção do Reassentamento Paracatu. Assim, foram identificadas atividades com potencial impacto de alteração na qualidade do ar, que incluíam a operação de máquinas nas vias não pavimentadas objetivando a abertura das mesmas, movimentação de materiais com carregamento e basculamento de caminhões, operação de máquinas e equipamentos nas obras de abertura do

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 21/110	
	RTC220102	REV. 2	

espaço destinado ao reassentamento e das vias inerentes ao mesmo, e tráfego de veículos leves e pesados em vias não pavimentadas.

Para prover informações contínuas sobre as condições de qualidade do ar em Paracatu (MG), a FUNDAÇÃO mantém uma estação automática de monitoramento da qualidade do ar, Estação Paracatu, que mede continuamente as médias horárias de PM<sub>10</sub>. Esta estação é equipada com analisadores de concentrações de partículas da marca E-BAM Plus, analisadores que utilizam atenuação de raios beta como princípio de medição.

A evolução das concentrações de partículas em Paracatu (MG), assim como as médias diárias e mensais, no período das campanhas de monitoramento e análises químicas é apresentada na Figura 4.1. Observa-se também que houve mais de um ano de intervalo entre as campanhas 6 e 7. Para efeitos de comparação da magnitude das concentrações medidas são apresentados os padrões referenciados pela Resolução CONAMA 491, de 19 novembro 2018.

A evolução das concentrações de partículas medidas no período de novembro de 2018 a agosto de 2021 é apresentada na Figura 4.1 como as médias diárias e mensais. Para efeitos de comparação da magnitude das concentrações medidas são apresentados os padrões referenciados pela Resolução CONAMA nº 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 nº 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).

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 22/110
		RTC220102	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 <sub>10</sub>	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual <sup>a</sup>	40	35	30	20	-
Material Particulado – MP <sub>2,5</sub>	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual <sup>a</sup>	20	17	15	10	-
Partículas Totais em Suspensão – PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual <sup>d</sup>	-	-	-	80	-

Notas:

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

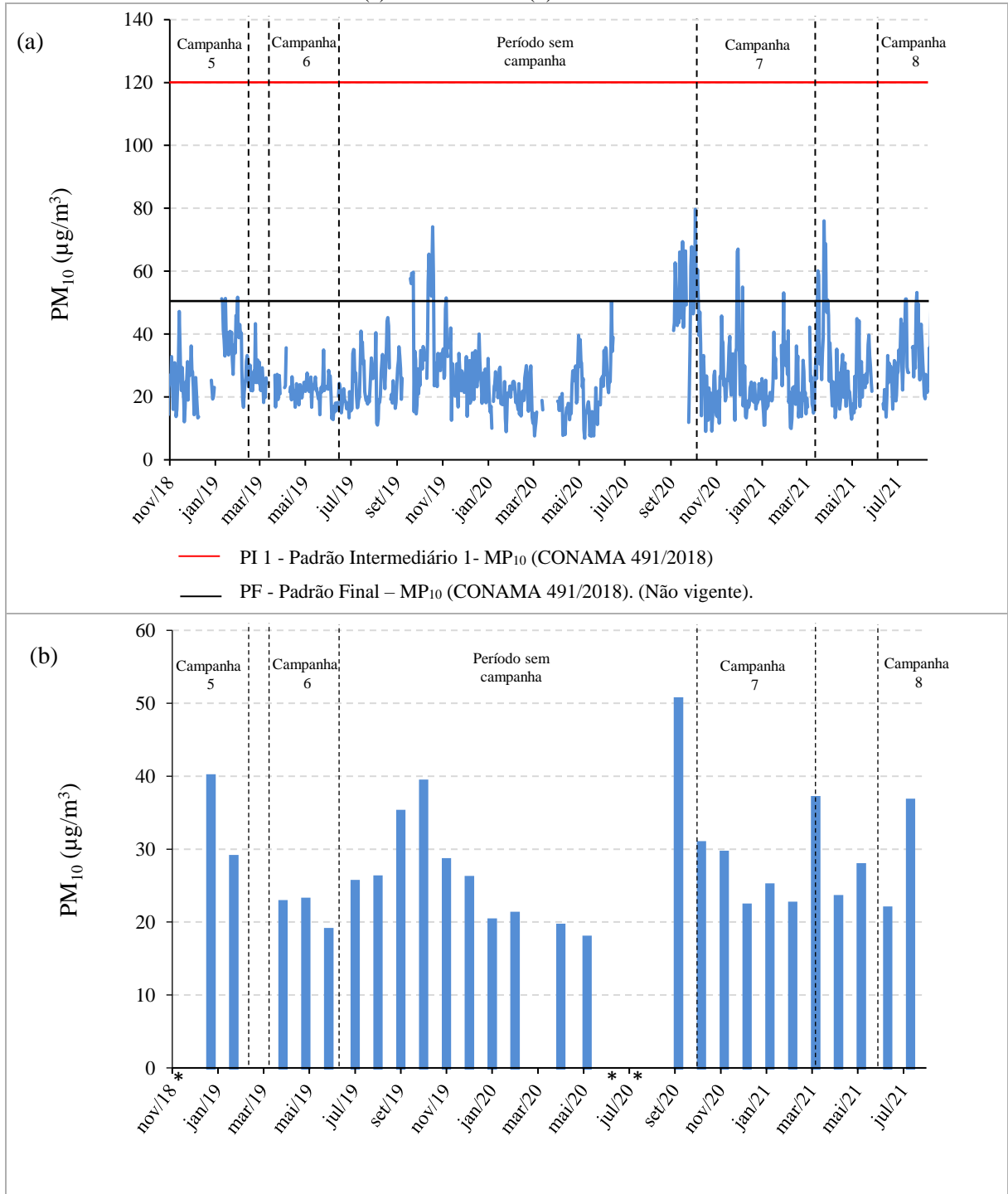
Analisando a Figura 4.1, pode-se verificar uma oscilação nas concentrações de PM<sub>10</sub> em todas as 4 campanhas utilizadas nesse estudo. Estas variações de concentrações não podem ser atribuídas isoladamente às fontes emissoras e atividades antropogênicas existentes em Paracatu (MG). Os fatores meteorológicos, principalmente ocorrência de chuvas, podem contribuir significativamente para a redução das concentrações de partículas. De acordo com padrão sazonal em Paracatu 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 foram ultrapassados apenas nas médias de 24 horas de PM<sub>10</sub> em todas as estações para padrões referenciados pela Resolução CONAMA 491/2018. 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.



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 23/110
		RTC220102	REV. 2

**Figura 4.1** – Concentrações de  $PM_{10}$  medidas na Estação Paracatu no período de agosto de 2018 a agosto de 2021. (a) Médias diárias (b) Médias mensais.



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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 24/110	
	RTC220102	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 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). Esse método permite a identificação de até 72 elementos químicos.

Os resultados do PIXE para as 6 amostras coletadas nas fontes emissoras referentes a Campanha 5 são apresentados na Tabela A.1 do Apêndice A. Os resultados para as 2<sup>6</sup> amostras referentes aos pontos receptores da Campanha 6, são apresentados na Tabela A.4 do Apêndice A. Os resultados para as amostras de fontes emissoras e pontos receptores coletados durante a campanha 7 são apresentados nas Tabelas A.2 e A.5 do Apêndice A, respectivamente. E por fim, os resultados das análises químicas da campanha 8 estão dispostos nas Tabelas A.3 e A.6 do Apêndice A.

Nas amostras coletadas nas fontes emissoras da Campanha 5, foi detectada uma média de 12 elementos. 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: Sódio (Na), Magnésio (Mg), Fósforo (P), Enxofre (S), Cloro (Cl), Potássio (K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Vanádio (V), Manganês (Mn), Cobalto (Co), Zinco (Zn), Gálio (Ga), Arsênio (As), Bromo (Br), Rubídio (Rb), Estrôncio (Sr), Ítrio (Y), Zircônio (Zr) e Háfio (Hf).

Dentre as amostras analisadas, a amostra do ponto 2 de material afetado foi a amostra que apresentou maior concentração do elemento ferro (38,12%), seguido por: ponto 1 de rejeito (36,09%), via não pavimentada (35,32%), ponto 2 de rejeito (33,89%) e ponto 1 de material afetado (32,33%). A amostra de solo intacto apresentou apenas 2,29% de concentração de Fe.

<sup>6</sup> 1 amostra com filtro de nylon e 1 amostra com MCE.



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 25/110	
	RTC220102	REV. 2	

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 (13,84%). As amostras do ponto 1 e do ponto 2 de material afetado apresentaram, respectivamente, 29,98% e 26,95% de concentração de Si. O teor de Si na amostra de solo intacto foi de 25,12%.

O alumínio foi detectado em maior concentração na amostra de solo intacto (22,83%), seguido pela via não pavimentada (14,30%). As demais fontes apresentaram teores de Al bem inferiores: ponto 2 de rejeito (6,65%), ponto 1 de material afetado (6,16%), ponto 1 de rejeito (5,08%), ponto 2 de material afetado (2,12%). Portanto, constata-se que o alumínio é um elemento naturalmente encontrado no solo da região de Paracatu, pois nas amostras de solo intacto observa-se concentrações superiores do elemento quando comparado com o rejeito da Barragem de Fundão.

Na Campanha 7 foi detectada uma média de 18 elementos para as amostras coletadas. Assim como nas fontes emissoras da 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: Sódio (Na), Magnésio (Mg), Fósforo (P), Enxofre (S), Cloro (Cl), Potássio (K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Manganês (Mn), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Gálio (Ga), Arsênio (As), Rubídio (Rb), Estrôncio (Sr), Zircônio (Zr) e Estanho (Sn).

A amostra de via não pavimentada foi a amostra que apresentou maior concentração do elemento ferro (32,57%), seguido pela amostra de material afetado (24,34%) e pela amostra de partículas da obra no Reassentamento Paracatu (6,89%).

O Si apresentou sua maior concentração na amostra de material afetado (34,07%) e as menores concentrações nas amostras de obra Reassentamento e via não pavimentada (21,64% e 22,90%, respectivamente).

O alumínio foi detectado em maior concentração na amostra de obra Reassentamento (18,21%), seguido pela via não pavimentada (14,30%) e pelo material afetado (12,18%).

Por fim, na Campanha 8 foi detectada uma média de 13 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: Sódio (Na), Magnésio (Mg), Fósforo (P), Enxofre

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 26/110	
	RTC220102	REV. 2	

(S), Cloro (Cl), Potássio (K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Cromo (Cr), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Gálio (Ga) e Zinco (Zn).

Nesta campanha, o elemento ferro apresentou a maior concentração na amostra de Material Afetado (28,43%), seguido das amostras de via não pavimentada (21,08%) e obra Reassentamento (7,74%).

A mesma configuração foi observada nas amostras com relação ao silício, na qual a concentração observada foi maior para material afetado (27,76%), seguidos de via não pavimentada (24,95%) e obra Reassentamento (19,84%).



Para o alumínio, a amostra de obra Reassentamento apresentou o maior percentual do elemento (20,49%). As amostras de via não pavimentada e material afetado apresentaram as menores concentrações do elemento (12,53% e 8,92%, respectivamente).

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).

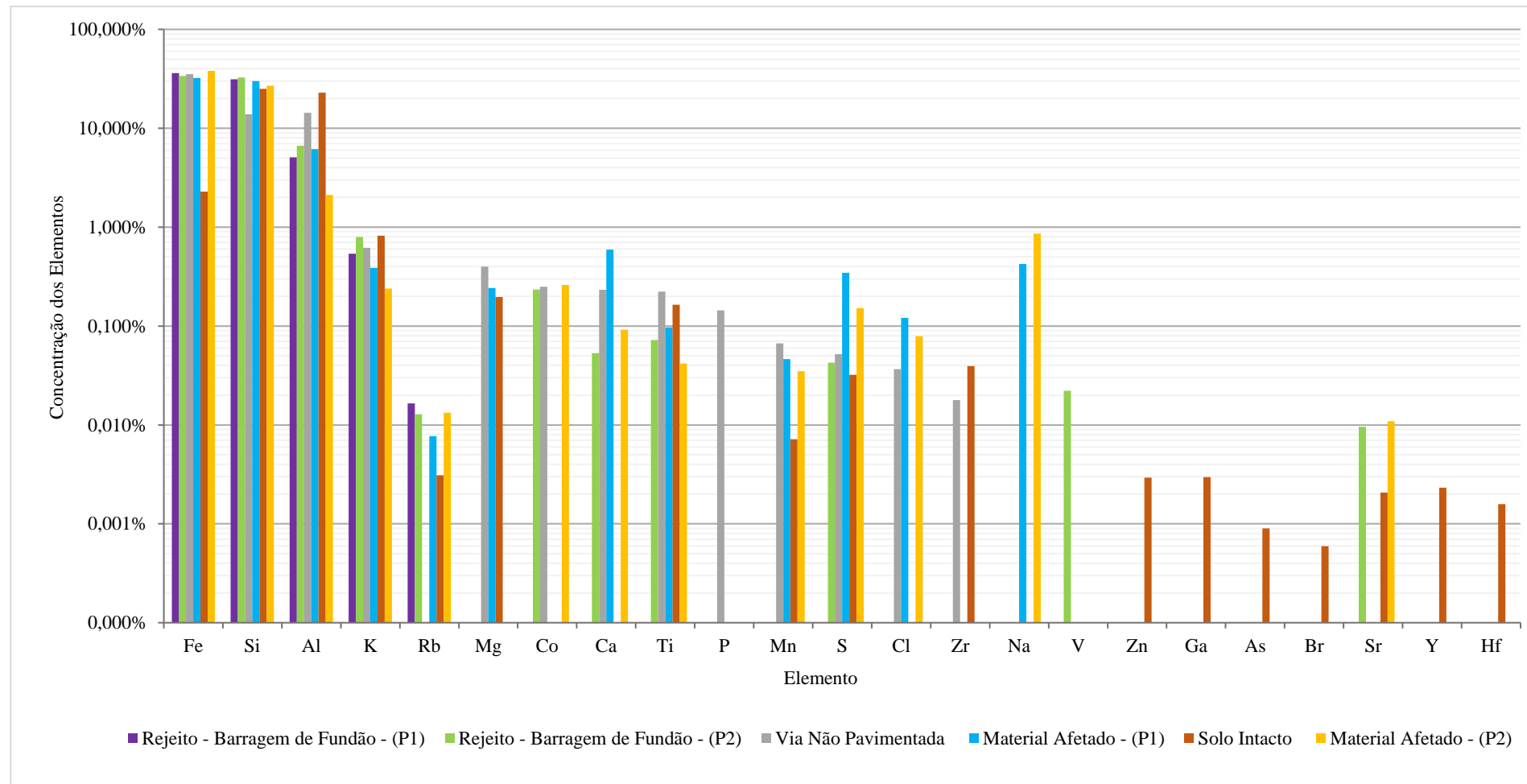
**Tabela 5.1** – Concentrações em ordem decrescente dos elementos ferro, silício e alumínio nas amostras de fontes emissoras durante as Campanhas 5, 7 e 8 coletadas em Paracatu/MG



CAMPANHA	PERÍODO	FERRO		SILÍCIO		ALUMÍNIO	
5	14/11/2018 a 12/02/2019	MA 2	38,12%	Rejeito 2	32,63%	Solo	22,83%
		Rejeito 1	36,09%	Rejeito 1	31,36%	VNP	14,30%
		VNP	35,32%	MA 1	29,98%	Rejeito 2	6,65%
		Rejeito 2	33,89%	MA 2	26,95%	MA 1	6,16%
		MA 1	32,33%	Solo	25,12%	Rejeito 1	5,08%
		Solo	2,29%	VNP	13,84%	MA 2	2,12%
7	02/03/2021 a 15/03/2021	VNP	32,57%	MA	34,07%	Obra	18,21%
		MA	24,34%	VNP	22,89%	VNP	14,30%
		Obra	6,89%	Obra	21,64%	MA	12,18%
8	05/08/2021 a 06/08/2021	MA	28,43%	MA	27,76%	Obra	20,49%
		VNP	21,08%	VNP	24,95%	VNP	12,53%
		Obra	7,74%	Obra	19,84%	MA	8,92%

Nota: MA - Material Afetado VNP – Via Não Pavimentada Obra – Obra de Reassentamento

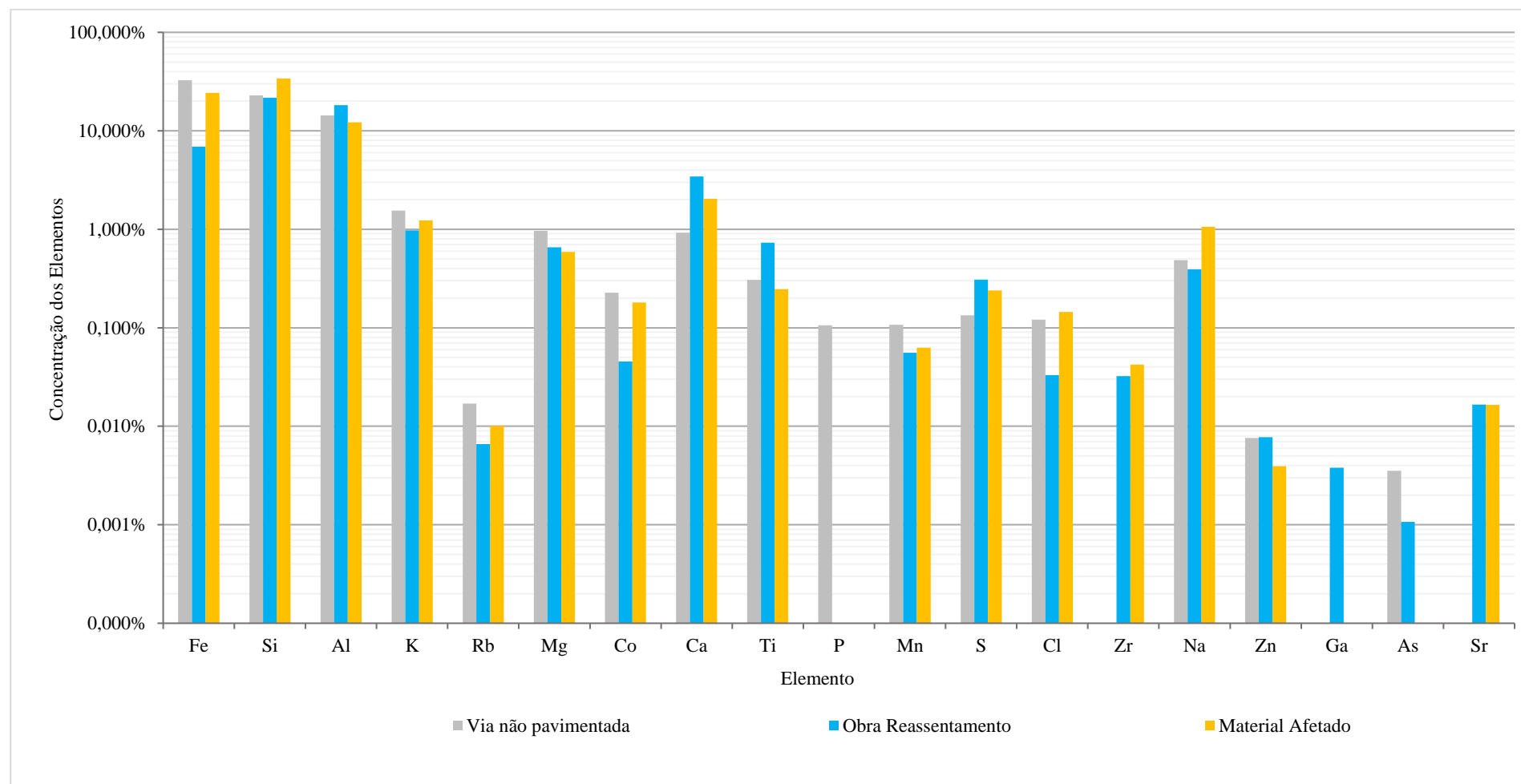
		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 27/110
		RTC220102	REV. 2



**Figura 5.1** – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 5 (14/11/2018 a 12/02/2019).



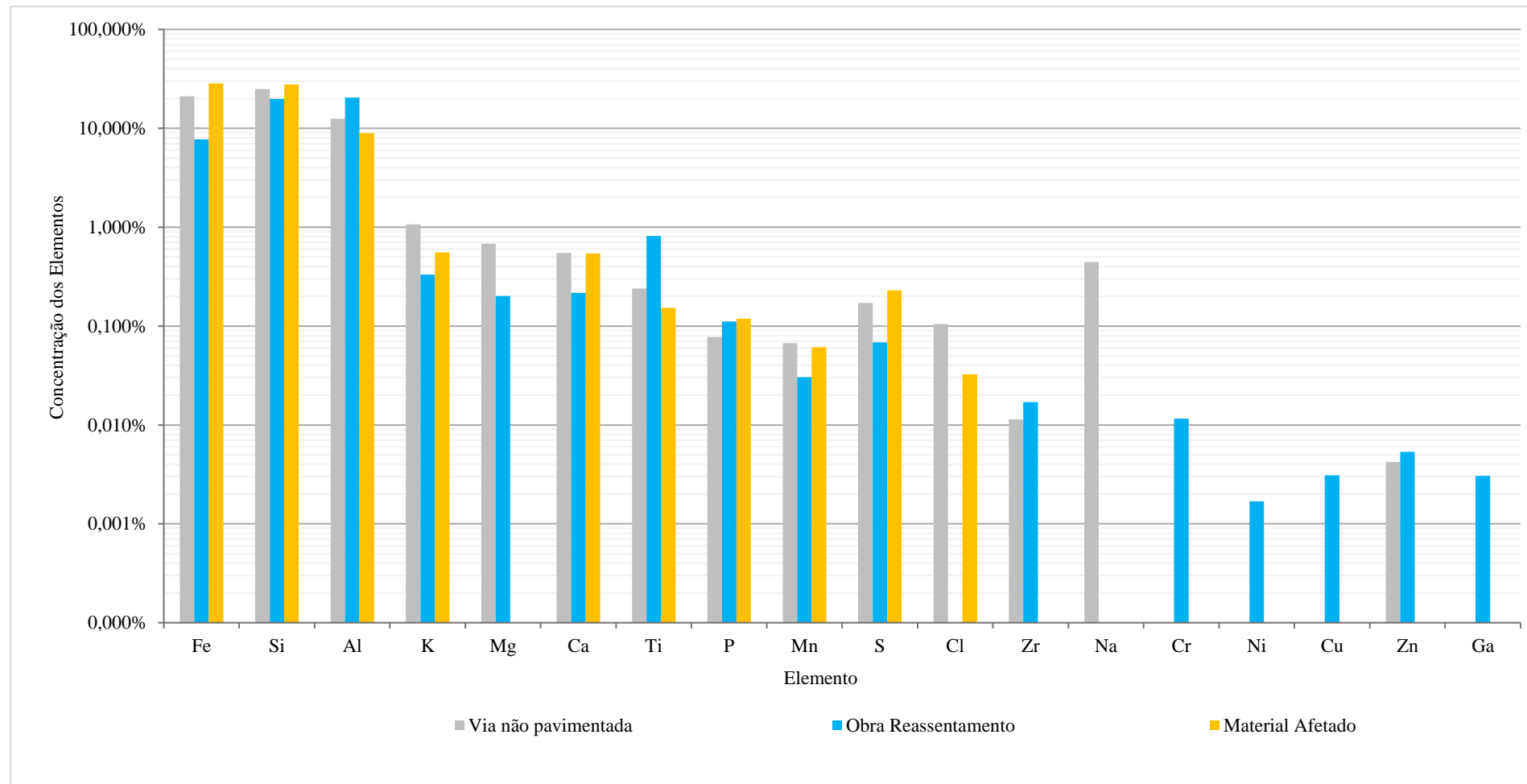
		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 28/110
		RTC220102	REV. 2


**Figura 5.2** – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 7 (02/03/2021 a 15/03/2021).



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 29/110
		RTC220102	REV. 2

**Figura 5.3** – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 8 (05/08/2021 a 06/08/2021).





		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 30/110
	RTC220102		REV. 1

Em relação às amostras de PM<sub>10</sub> coletadas em filtros de Nylon e MCE na Estação Paracatu, nas três campanhas de pontos receptores (6, 7 e 8), os elementos ferro (Fe), alumínio (Al), silício (Si), enxofre (S), potássio (K), cálcio (Ca) e o sódio (Na) foram os mais abundantes observados em todas as amostras (Figuras 5.4 e 5.5).



Nos filtros da Campanha 6 também foram identificados, com menor representatividade, os seguintes elementos: Magnésio (Mg), Fósforo (P), Titânio (Ti), Manganês (Mn), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Arsênio (As) e Bromo (Br). Os elementos identificados com menor representatividade na Campanha 7 foram: Magnésio (Mg), Fósforo (P), Titânio (Ti), Manganês (Mn), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Arsênio (As), Bromo (Br) e Cloro (Cl). E por fim, na Campanha 8, os elementos com as menores concentrações foram Fósforo (P), Cobre (Cu), Arsênio (As) e Bromo (Br).

Para estimar quantitativamente a contribuição das diferentes fontes emissoras de material particulado nas concentrações atmosféricas de PM<sub>10</sub>, foi aplicado o modelo CMB8.2 (*Chemical Mass Balance*), recomendado pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2016), apresentado a seguir.

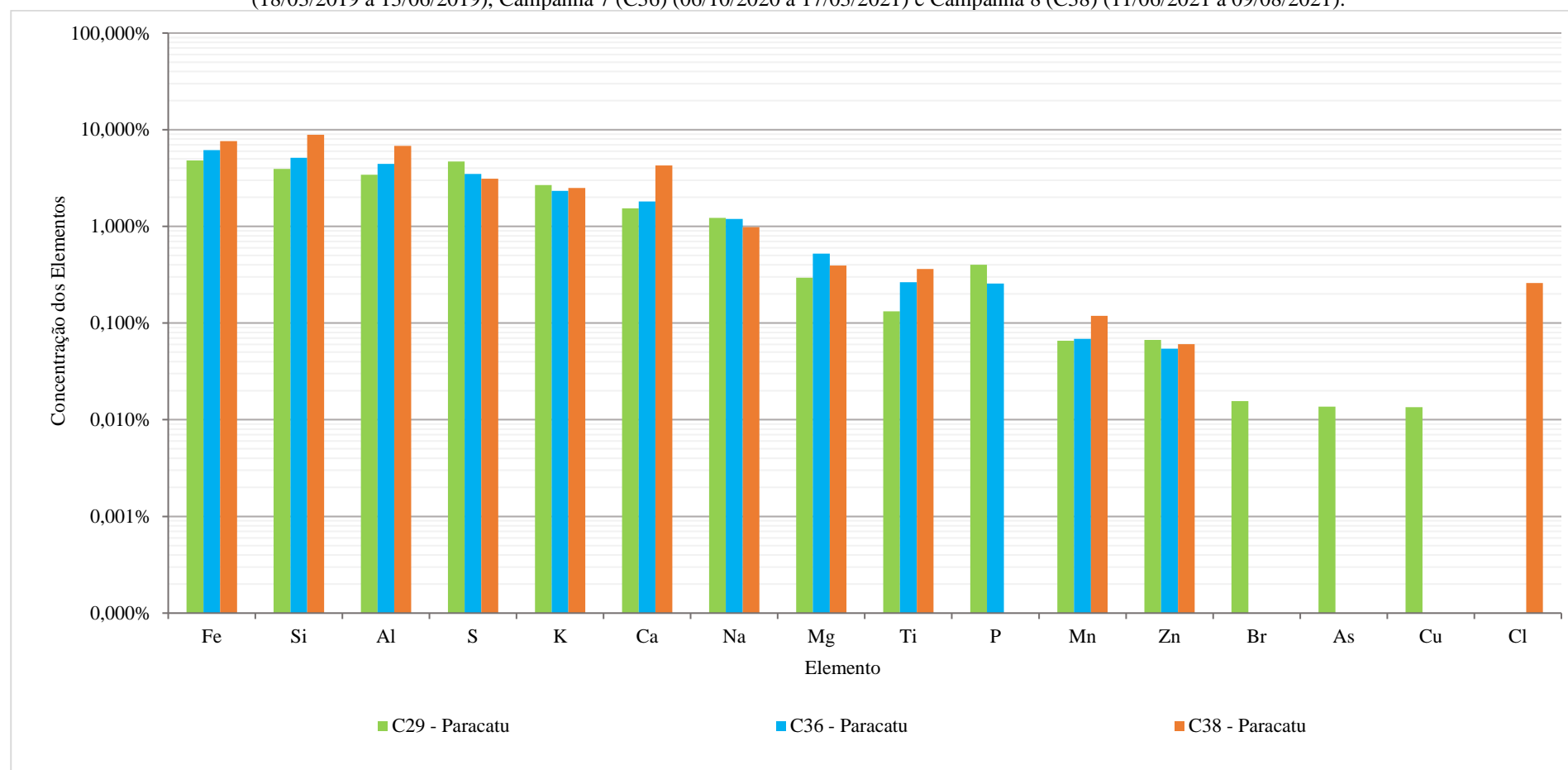
		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 31/110
		RTC220102	REV. 2

**Figura 5.4** – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em ponto receptor (Estação Paracatu) com filtros de nylon – Campanhas 6 (N29) (18/03/2019 a 13/06/2019), Campanha 7 (N36) (06/10/2020 a 17/03/2021) e Campanha 8 (N38) (11/06/2021 a 09/08/2021).





		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 32/110
		RTC220102	REV. 2

**Figura 5.5** – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em ponto receptor (Estação Paracatu) com filtros MCE – Campanhas 6 (C29) (18/03/2019 a 13/06/2019), Campanha 7 (C36) (06/10/2020 a 17/03/2021) e Campanha 8 (C38) (11/06/2021 a 09/08/2021).





		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 33/110	
	RTC220102	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 PM<sub>10</sub>. O CMB vem sendo aplicado para avaliação da contribuição de partículas em diversas cidades do mundo (CHOW; WATSON, 2002; GUPTA *et al.*, 2006; 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 consiste 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);

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 34/110
	RTC220102		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).

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 35/110
		RTC220102	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 ( $\sigma$ ) 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  $j$ ;

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 36/110	
	RTC220102	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.

## 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  $PM_{10}$  em Paracatu (MG). Para uma aplicação mais ampla do CMB, seria necessário identificar e caracterizar quimicamente todas as demais fontes emissoras significativas de partículas existentes em Paracatu e nos seus arredores, o que não seria de execução viável no presente trabalho contratado.

Para simulação com o CMB, foram considerados os perfis químicos do ponto receptor e das fontes emissoras relevantes para o contexto em análise, conforme descrito a seguir.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 37/110
	RTC220102		REV. 2

### **Fontes Emissoras**

Devido ao fato de não ter sido realizada amostragem de fontes emissoras na localidade de Paracatu na Campanha 6, foram consideradas para o presente estudo as amostras de fontes emissoras referentes as Campanhas 5, 7 e 8


Tendo em vista a grande similaridade existente entre alguns perfis químicos de  $PM_{10}$  coletados para diferentes tipologias de fontes, optou-se pela adoção de grupos representantes dos tipos de fontes similares, ao invés de trabalhar com cada perfil químico de forma isolada. Essa abordagem foi adotada de modo a evitar a colinearidade pelo modelo CMB.

Analisando os perfis químicos das amostras de vias não pavimentadas e material afetado, observa-se grande similaridade nas concentrações da maioria dos elementos químicos presentes nas amostras. Esse comportamento é reflexo da interação entre as fontes, onde as partículas das vias podem estar sendo depositadas pela ação do vento ou outro fator meteorológico nas áreas que foram anteriormente denominadas como afetadas. Além disso, junto da ação do vento, a dinâmica de tráfego no local também pode contribuir para que fontes da localidade apresentem características semelhantes entre si.

Sendo assim, sugere-se que a área que antes era caracterizada por material afetado por rejeito, já se constituiu de outras características devido aos processos naturais de interferência de outras fontes e também as próprias intervenções propositais (como obras e retirada de materiais, por exemplo).

Da mesma forma, os perfis químicos das amostras de solo intacto e obras Reassentamento também apresentam muita semelhança, sugerindo que ambos possuem a mesma composição, sendo, portanto, representantes de apenas um tipo de fonte.

Dessa maneira, foi realizada a média das concentrações dos elementos entre as tipologias vias não pavimentadas e material afetado e, entre as tipologias solo intacto e obra reassentamento. Em virtude da similaridade estar presente entre campanhas e não só entre as amostras de uma mesma campanha, as médias calculadas contemplaram as amostras das campanhas 5, 7 e 8 e estão apresentadas na Tabela 6.1 a seguir. As amostras coletadas na Barragem de Fundão não foram consideradas no CMB, apenas utilizadas neste estudo para compreender as características do solo afetado pelo rejeito proveniente da barragem;

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 38/110	
	RTC220102	REV. 2	

### Pontos Receptores

Foi utilizada a média entre os perfis químicos de PM<sub>10</sub> coletados em filtros de Nylon e MCE no ponto receptor amostrado (Estação Paracatu), apresentados na Tabela 6.2.

**Tabela 6.1** – Composição química média e incerteza entre as amostras de PM<sub>10</sub> em fontes emissoras avaliadas na modelagem CMB – Campanhas 5, 7 e 8

ELEMENTO	VIA NÃO PAVIMENTADA E MATERIAL AFETADO		OBRA REASSENTAMENTO E SOLO INTACTO	
	M [%] <sup>a</sup>	IC [%] <sup>b</sup>	M [%] <sup>a</sup>	IC [%] <sup>b</sup>
Na	0,468	0,397	0,131	0,226
Mg	0,411	0,360	0,352	0,264
Al	10,072	4,584	20,509	2,310
Si	25,778	6,366	22,199	2,682
P	0,064	0,063	0,037	0,064
S	0,189	0,093	0,136	0,150
Cl	0,091	0,044	0,011	0,019
K	0,807	0,482	0,710	0,337
Ca	0,710	0,644	1,215	1,920
Ti	0,187	0,093	0,570	0,354
Cr	0,000	0,000	0,004	0,007
Mn	0,064	0,022	0,031	0,024
Fe	30,313	6,051	5,641	2,932
Co	0,131	0,125	0,015	0,026
Ni	0,000	0,000	0,002	0,001
Cu	0,000	0,000	0,002	0,002
Zn	0,002	0,003	0,005	0,002
Ga	0,000	0,000	0,003	<0,001
As	0,001	0,001	0,001	0,001
Br	0,000	0,000	0,000	0,000
Rb	0,007	0,007	0,003	0,003
Sr	0,004	0,007	0,006	0,009
Y	0,000	0,000	0,001	0,001
Zr	0,010	0,016	0,030	0,011
Sn	0,000	0,000	0,186	0,322
Hf	0,000	0,000	0,001	0,001

**Nota:**

ELEM: Elemento

<sup>a</sup> M – Percentual em massa do elemento

<sup>b</sup> IC – Desvio padrão entre as amostras analisadas

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 39/110
		RTC220102	REV. 2

**Tabela 6.2** – Composição química média e incerteza entre as amostras de PM<sub>10</sub> no ponto receptor (Estação Paracatu) avaliado na modelagem CMB – Campanhas 6, 7 e 8

ELEMENTO	Campanha 6		Campanha 7		Campanha 8	
	M [%] <sup>a</sup>	IC [%] <sup>b</sup>	M [%] <sup>a</sup>	IC [%] <sup>b</sup>	M [%] <sup>a</sup>	IC [%] <sup>b</sup>
Na	1,018	0,298	0,885	0,439	0,835	0,209
Mg	0,281	0,018	0,431	0,131	0,411	0,025
Al	3,090	0,460	4,340	0,138	6,601	0,284
Si	3,549	0,548	5,022	0,153	8,493	0,540
P	0,365	0,051	0,283	0,037	0,000	0,000
S	4,188	0,707	2,807	0,959	2,522	0,838
Cl	0,000	0,000	0,038	0,054	0,301	0,058
K	2,405	0,391	2,099	0,318	2,372	0,170
Ca	1,347	0,270	1,597	0,300	4,213	0,085
Ti	0,299	0,236	0,206	0,084	0,294	0,099
Mn	0,058	0,010	0,068	0,001	0,101	0,026
Fe	4,079	1,040	6,404	0,367	7,370	0,378
Cu	0,010	0,004	0,002	0,002	0,000	0,000
Zn	0,059	0,012	0,046	0,012	0,055	0,008
As	0,011	0,004	0,003	0,005	0,000	0,000
Br	0,013	0,004	0,005	0,007	0,000	0,000

**Nota:**

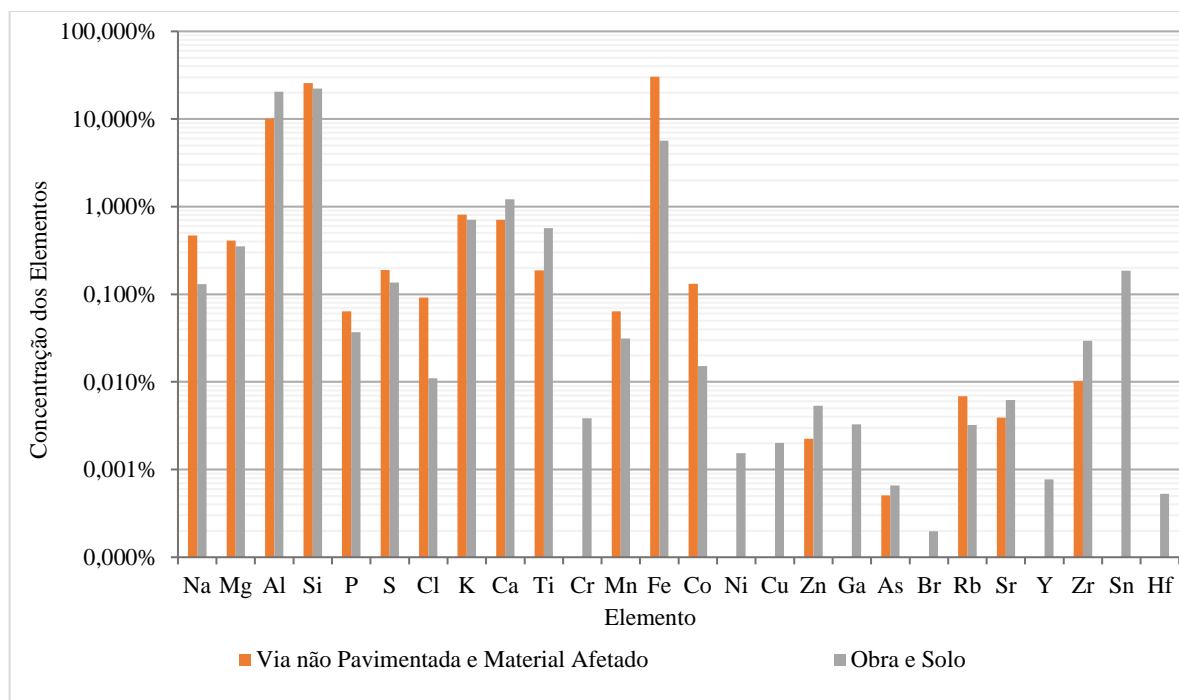
<sup>a</sup> M – Percentual em massa do elemento

<sup>b</sup> IC – Desvio padrão entre as amostras realizadas

A Figura 6.1 apresenta a média entre os perfis dos elementos químicos detectados pelo método PIXE nas amostras coletadas em Vias não Pavimentadas e Material Afetado, assim como entre Solo Intacto e Obra Reassentamento, durante as Campanhas 5, 7 e 8.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 40/110	
	RTC220102	REV. 2	

**Figura 6.1**– Média entre os perfis químicos dos elementos detectados pelo método PIXE nas amostras coletadas em fontes emissoras de via não pavimentada, material afetado, solo intacto e obra Reassentamento – Média das Campanhas 5, 7 e 8



A Tabela 6.3 apresenta os resultados da modelagem CMB, contendo as contribuições de  $PM_{10}$  durante as Campanhas 6, 7 e 8, para o ponto receptor da Estação Paracatu. Os arquivos de saída gerados pelo modelo CMB são apresentados no Anexo A.



**Tabela 6.3** – Contribuição percentual das fontes emissoras nos pontos receptores analisados – Modelagem CMB

CAMPANHA	PERÍODO DE AMOSTRAGEM	CONTRIBUIÇÃO [%]		
		VIA NÃO PAV. E MATERIAL AFETADO	SOLO INTACTO E OBRA	TOTAL
6	18/03/2019 à 13/06/2019	9,13%	9,57%	18,70%
7	06/10/2020 à 17/03/2021	16,03%	11,72%	27,80%
8	11/06/2021 à 09/08/2021	21,46%	21,86%	43,30%

**Nota:** PAV - Pavimentada

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 Paracatu (MG) que contribuem para concentração de  $PM_{10}$  que não estão relacionadas às ações da FUNDAÇÃO e não foram mapeadas, sendo representadas a seguir,



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 41/110
	RTC220102		REV. 2

pela nomenclatura “Outras Fontes”. Tais emissões podem ser provenientes, inclusive, de outras localidades, visto que o material analisado corresponde a uma menor fração do material particulado ( $PM_{10}$ ) e, assim, possui maior tempo de residência na atmosfera.

Como já observado através da similaridade entre os perfis químicos e por meio dos resultados das modelagens com o modelo CMB em campanhas de amostragem anteriores a estas, o perfil químico das vias não pavimentadas na localidade de Paracatu (MG) é colinear com o perfil do material afetado na região. Isto pode ser explicado pelo fato de após o EVENTO o material afetado também ter atingido as vias de tráfego não pavimentadas em Paracatu de Baixo (MG). Dessa forma, como já citado anteriormente, optou-se por apresentar essas duas fontes emissoras de forma agrupada, tendo em vista a impossibilidade de fazer a diferenciação da contribuição de cada uma delas.

Além disso, a identificação de baixos percentuais totais de contribuição das fontes emissoras analisadas pode estar relacionada à pequena massa coletada nos filtros (MCE ou Nylon), utilizados como pontos receptores. Outro fator que pode ter influenciado nesse resultado refere-se à dissiparidade existente entre as concentrações obtidas dos principais elementos nos receptores e nas fontes emissoras. Os receptores apresentam concentrações dos elementos muito inferiores àsquelas obtidas nas fontes, dificultando o desenvolvimento do modelo CMB ao relacionar fonte x receptor.

Nas Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 são apresentadas as concentrações de  $PM_{10}$  bem como as contribuições de material particulado (percentual e concentração<sup>7</sup>) das fontes emissoras resultantes do modelo CMB referentes ao ponto receptor Estação Paracatu para as Campanhas 6, 7 e 8, respectivamente.

Analisando os gráficos apresentados na Figura 6.2, referente a Campanha 6, observa-se que metade das concentrações médias diárias de  $PM_{10}$  monitoradas na Estação Paracatu no período de março a junho de 2019 encontravam-se predominantemente superiores à média ( $22 \mu g/m^3$ ), enquanto o restante do período apresentou concentrações próximas ou inferiores à concentração média do período. Observa-se também que o grupo de fontes contendo Solo Intacto e Obra Reassentamento (10%) apresentou contribuição ligeiramente superior a proporcionada pelo grupo de fontes referentes a via e material afetado.

<sup>7</sup> A concentração foi estimada através do produto entre o percentual de contribuição resultante do CMB e a concentração monitorada média diária do período analisado.

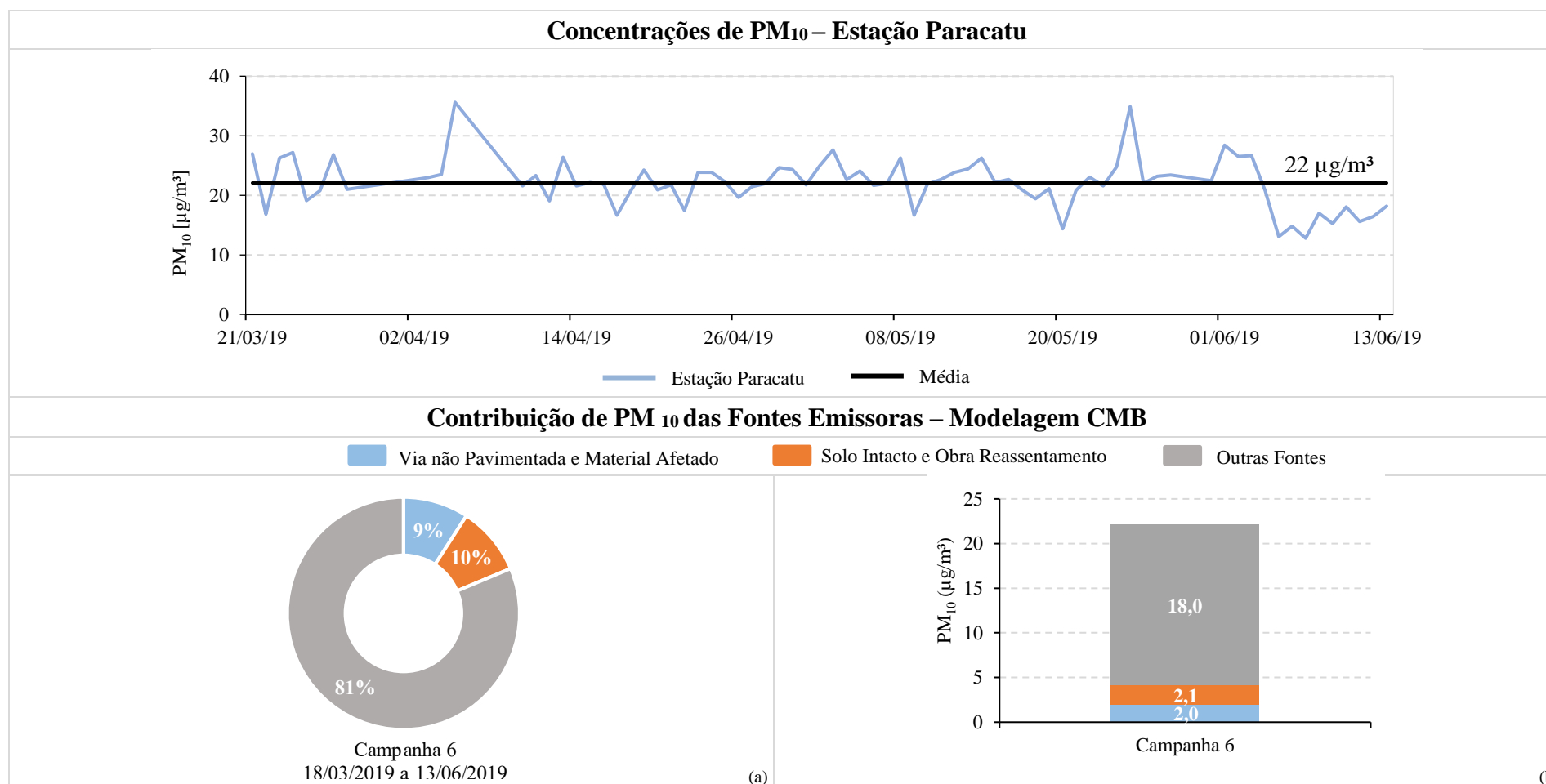
		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 42/110
	RTC220102		REV. 2

Para a Campanha 7 (Figura 6.3), observa-se que as concentrações médias diárias de PM<sub>10</sub> monitoradas na Estação Paracatu no período de outubro de 2020 a março de 2021 encontravam-se superiores à média (26 µg/m<sup>3</sup>) em 38% do tempo. Diferente da campanha 6, nesta, o grupo de fontes com maior contribuição foi o de Vias e Material Afetado (16%). Além disso, observou-se um aumento em torno de 20% da concentração média de PM<sub>10</sub> medida na Estação Paracatu, quando comparada ao período da campanha 6.

Com relação a Campanha 8, ao analisar a Figura 6.4 constata-se que durante o período da campanha, as concentrações ficaram abaixo da média na maior parte do tempo (58% do tempo). Com relação a média de PM<sub>10</sub>, verifica-se um aumento de cerca de 40% na concentração média de PM<sub>10</sub> durante a campanha 8 quando comparado a média da Campanha 6. Esse aumento também pode ser percebido nas contribuições dos grupos de fontes emissoras. Ademais, essas contribuições foram similares entre si, alcançando cerca de 22% cada grupo.

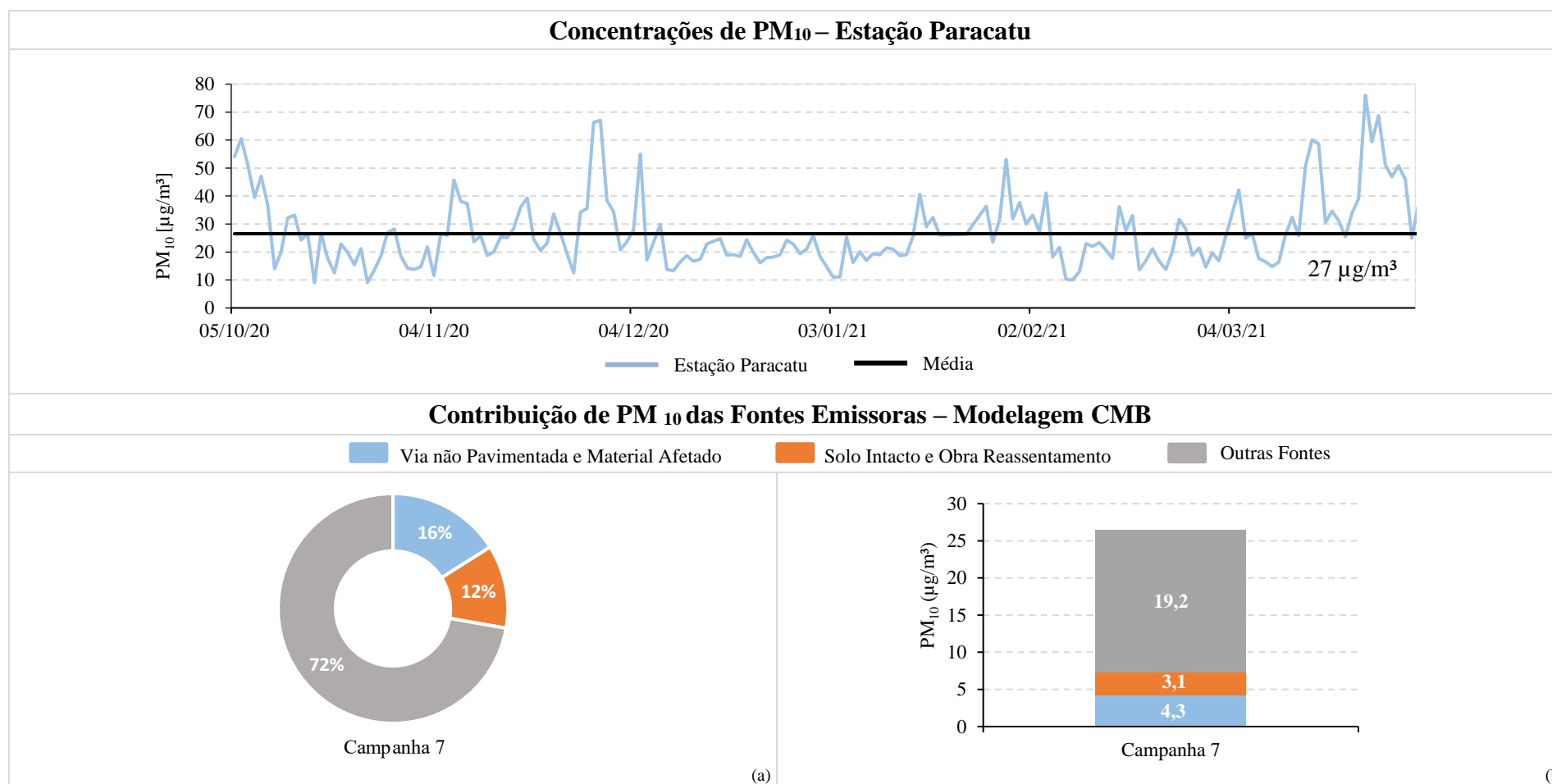
De forma geral, os percentuais de contribuição de cada grupo de fonte emissora obtidos pelo modelo CMB foram sutilmente diferentes nos três períodos de análise do receptor, com variações de cerca de 9% a 22% de contribuição tanto para o grupo de vias não pavimentadas e material afetado quanto para o grupo contendo solo intacto e obra Reassentamento. Nas três campanhas, o maior percentual da contribuição para as concentrações de PM<sub>10</sub> foi proveniente das fontes emissoras que não foram mapeadas (entre 57 e 81%). Menos de 44% do acréscimo das concentrações foi proveniente do grupo contendo as tipologias obra reassentamento e solo intacto (entre 10 e 22%) e do grupo contendo vias não pavimentadas e material afetado (entre 09 e 21%). Além disso, observou-se um acréscimo na contribuição das tipologias de fontes quando comparados os percentuais obtidos em cada campanha.

**Figura 6.2** – Evolução das concentrações diárias de PM<sub>10</sub> e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor estação de monitoramento de qualidade do ar Paracatu – Campanha 6 (18/03/2019 a 13/06/2019).



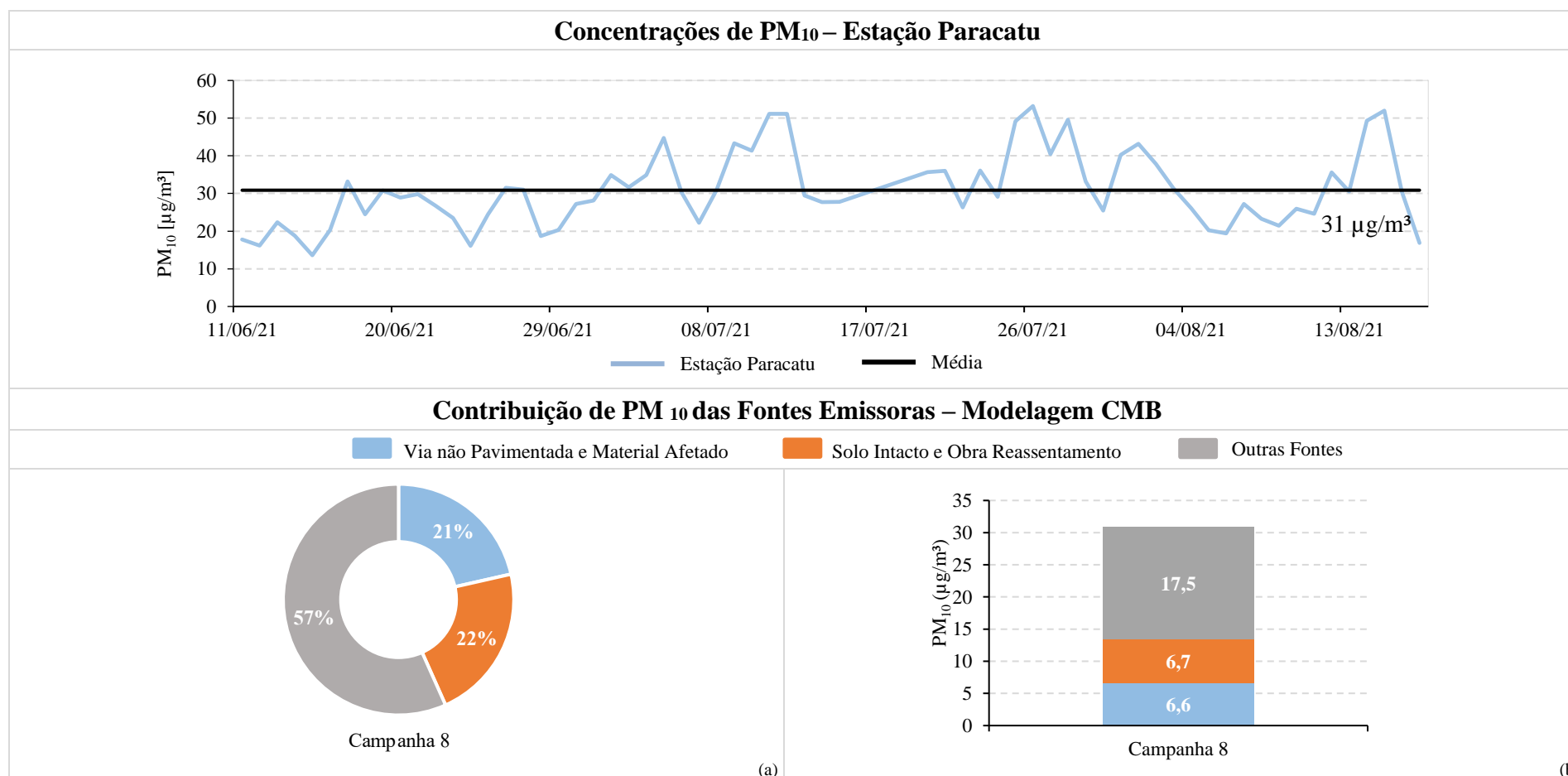
**Nota:** (a) Contribuição percentual de PM<sub>10</sub>; (b) Contribuição em termos de concentração de PM<sub>10</sub>.

**Figura 6.3** – Evolução das concentrações diárias de PM<sub>10</sub> e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor estação de monitoramento de qualidade do ar Paracatu – Campanha 7 (06/10/2020 à 17/03/2021).




**Nota:** (a) Contribuição percentual de PM<sub>10</sub>; (b) Contribuição em termos de concentração de PM<sub>10</sub>.

**Figura 6.4** – Evolução das concentrações diárias de PM<sub>10</sub> e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor estação de monitoramento de qualidade do ar Paracatu – Campanha 8 (11/06/2021 à 09/08/2021).



**Nota:** (a) Contribuição percentual de PM<sub>10</sub>; (b) Contribuição em termos de concentração de PM<sub>10</sub>.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 46/110
	RTC220102		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 na Estação Paracatu para as campanhas em questão.

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 PM<sub>10</sub> obtida pelo monitoramento da qualidade do ar (Estação Paracatu).

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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 47/110	
	RTC220102	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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 48/110	
	RTC220102	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. Sabendo-se que os valores obtidos para a máxima de 1 hora na Estação Paracatu para as Campanhas 6, 7 e 8, respectivamente, foram 4,75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 21,83  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e 35,78  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Tabela 7.1), pode-se dizer que as concentrações de alumínio obtidas na localidade 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  $\text{PM}_{10}$  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.

**Tabela 7.1** – Concentração de alumínio na Estação Paracatu

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	4,75	21,83	35,78
Máxima de 24 horas	1,22	3,37	3,62
Média do Período	0,75	1,18	2,10

Portanto, pode-se dizer que as concentrações de alumínio obtidas para a Estação Paracatu, durante as três campanhas, não apresentam níveis mínimos de riscos à saúde da população quando comparados com a recomendação feita pela NIOSH.



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 49/110
	RTC220102		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., 1987a, 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 (ATDSR, 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/m<sup>3</sup>), 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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 50/110	
	RTC220102	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 ng/m<sup>3</sup> (0,006 µg/m<sup>3</sup>) para a média do período de um ano (EUROPEAN COMMISSION, 2019). A Tabela 7.2 indica os valores de concentração obtidos na Estação Paracatu durante as três campanhas.

**Tabela 7.2** – Concentração de arsênio na Estação Paracatu

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE ARSÊNIO [µg/m <sup>3</sup> ]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,019	0,033	< LD
Máxima de 24 horas	0,005	0,005	< LD
Média do Período	0,003	0,002	< LD



Nota: <LD: Fração mássica menor do 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 µg/m<sup>3</sup>, atendendo aos padrões estabelecidos pela União Europeia. 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 mg/m<sup>3</sup>, pode ocasionar a destruição das células epiteliais pulmonares, provocando edema pulmonar,

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 51/110
	RTC220102		REV. 2

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 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



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 52/110
	RTC220102		REV. 2

caracterizada por um aumento da excreção urinária de proteínas de baixo peso molecular ( $\beta$ 2-microglobulina,  $\alpha$ 1-microglobulina e proteínas de ligação ao retinol) ou enzimas intracelulares, como a N-acetil-  $\beta$ -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., 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., 1995b; 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. (1989b). 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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 53/110
	RTC220102		REV. 2



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., 1992a; THUN et al., 1985), enquanto outros não comprovam tais conclusões (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  $\text{ng/m}^3$  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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 54/110
	RTC220102		REV. 2

## 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 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 ( $\mu\text{g}$ ) 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  $\mu\text{g}$  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



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 55/110	
	RTC220102	REV. 2	

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, analisando a comparação mais restritiva, o documento considera que a cada 1 µg de chumbo por metro cúbico (m<sup>3</sup>) 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/m<sup>3</sup>.



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/m<sup>3</sup> 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/m<sup>3</sup> para a média do período, sendo este menor em relação à concentração de 2,63 µg/m<sup>3</sup> para qual foram observados efeitos adversos à saúde e considerado, portanto, mais restritivo.

Verifica-se que não foram detectados valores de chumbo através do limite de quantificação do método PIXE para as Campanhas. Dessa forma, pode-se concluir que a população não estaria exposta aos efeitos na saúde ocasionados pela inalação do chumbo.

## 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,

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 56/110
	RTC220102		REV. 2

modulação 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, o governo de Ontário, no Canadá, estabelece o padrão de qualidade do ar para o cobre de 50 µg/m³, 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 material particulado menor que 10 µm monitoradas na estação de qualidade do ar de Paracatu para as três campanhas, foram calculadas as concentrações do elemento químico para cada tempo de referência. (Tabela 7.3).



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 57/110	
	RTC220102	REV. 2	

**Tabela 7.3** – Concentração de cobre na Estação Paracatu

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE COBRE [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,019	0,016	< LD
Máxima de 24 horas	0,005	0,002	< LD
Média do Período	0,003	0,001	< LD



Nota: <LD: Fração mássica menor do 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 Paracatu para as três campanhas, 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 obtidas na região de Paracatu (MG), percebe-se que também não ocorrem ultrapassagens, sendo consideravelmente inferiores ao padrão. Dessa forma, para as concentrações de cobre obtidas nos períodos de amostragem das campanhas do presente 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 Paracatu (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 Paracatu, analisadas pelo método PIXE, apresentaram concentrações de ferro na faixa entre 2,29% e 7,03%.

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,

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 58/110	
	RTC220102	REV. 2	



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 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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 59/110	
	RTC220102	REV. 2	

A Tabela 7.4 apresenta os valores de concentração de ferro da Estação Paracatu para as Campanhas 6,7 e 8.

**Tabela 7.4** – Concentração de ferro na Estação Paracatu



REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE FERRO [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	6,69	32,78	40,17
Máxima de 24 horas	1,72	5,06	4,06
Média do Período	1,06	1,77	2,36

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 foi 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 para máxima de 24 horas apresentam-se ligeiramente superiores ao limite de risco nas campanhas 7 e 8, podendo ocasionar efeitos à saúde dependendo do tempo de exposição, contudo, devido às características do método percentual empregado na análise das amostras, esta informação deve ser confirmada posteriormente com base no histórico de análises do elemento no local.

## 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,

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 60/110
	RTC220102		REV. 2

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, para 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.

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 utilizada prevê um Nível de Risco Mínimo (NRM) para manganês inorgânico inalado que atenda a proteção para cenários de exposição de inalação crônica (365 dias ou mais). Sendo assim, o NRM encontrado para inalação do manganês foi de  $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . A Tabela 7.5 apresenta os valores de concentração de manganês da Estação Paracatu para as campanhas 6, 7 e 8.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 61/110
	RTC220102		REV. 2

**Tabela 7.5** – Concentração de manganês na Estação Paracatu

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE MANGANÊS [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,09	0,34	0,63
Máxima de 24 horas	0,02	0,05	0,06
Média do Período	0,01	0,02	0,04



Cabe ressaltar que, a média do período de cada campanha foi obtida com base em poucos meses de amostragens (3 meses na Campanha 6, 7 meses na Campanha 7 e 2 meses na campanha 8), enquanto o Nível de Risco Mínimo foi estabelecido visando a proteção para cenários de exposição de inalação crônica (365 dias ou mais). Dessa forma, mesmo que não seja aplicável fazer uma comparação entre as médias encontradas e o MRL estabelecido, pode-se observar que as concentrações de manganês obtidas nas campanhas se encontram muito inferiores ao valor de  $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , indicando 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 em 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, 2005) 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 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



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 62/110
	RTC220102		REV. 2

que foram expostos a mais de 10 mg de níquel/m<sup>3</sup> de ar, na forma de compostos de níquel de difícil dissolução (como o subsulfeto de níquel, Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>). A exposição a altos níveis de compostos de níquel solúvel (dissolvem facilmente em água) também pode resultar em câncer quando os compostos de níquel são difíceis de dissolver (menos solúveis) estão presentes, 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 de 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/m<sup>3</sup>, principalmente na forma de aerossóis e podem ser tão altas quanto 150 ng/m<sup>3</sup> perto de fontes pontuais. Com base nos dados de qualidade do ar de 1996, a USEPA relatou a média de 2,2 ng/m<sup>3</sup> 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/m<sup>3</sup>.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 63/110	
	RTC220102	REV. 2	

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 Paracatu/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/m<sup>3</sup> de ar (0,2 µg/m<sup>3</sup>, 200 ng/m<sup>3</sup>) foi derivado para exposição de duração intermediária ao níquel (ATSDR, 2005).
- Um MRL de 0,00009 mg Ni/m<sup>3</sup> de ar (0,09 µg/m<sup>3</sup>, 90 ng/m<sup>3</sup>) foi derivado para exposição de duração crônica ao níquel (ATSDR, 2005).

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/m<sup>3</sup> (0,02 µg/m<sup>3</sup>) 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,



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 64/110	
	RTC220102	REV. 2	

é referente a concentrações de níquel contido na fração menor que 10 µm do material particulado (PM<sub>10</sub>). O mesmo valor é aplicado como padrão de qualidade do ar na Índia e no Canadá (Estado de Ontario).

O elemento níquel 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 níquel.

## 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).

Na Tabela 7.6 abaixo estão expostas as concentrações de silício encontradas para as regiões analisadas.

**Tabela 7.6 – Concentração de silício na Estação Paracatu**

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE SILÍCIO [µg/m³]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	5,47	25,24	46,68
Máxima de 24 horas	1,40	3,90	4,72
Média do Período	0,87	1,36	2,74

Devido à falta de regulamentações que indiquem os limites de exposição à inalação para o silício e, também a falta de estudos em humanos que indiquem riscos potenciais à saúde,

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 65/110
	RTC220102		REV. 2

torna-se inviável recorrer acerca dos riscos existentes na localidade de Paracatu (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 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., 1927b; 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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 66/110	
	RTC220102	REV. 2	

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 (2005), 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 (2005), 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, 2005). 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/m<sup>3</sup> como padrão de concentração para meia hora e 120 µg/m<sup>3</sup> para 24 (vinte e quatro) horas (Government of Ontario, 2019). A Tabela 7.7 indica os valores de concentração obtidos nas proximidades da estação de monitoramento de Paracatu, durante as Campanhas 6, 7 e 8.


**Tabela 7.7** – Concentração de zinco na Estação Paracatu

REFERÊNCIA TEMPORAL	CONCENTRAÇÃO DE ZINCO [µg/m <sup>3</sup> ]		
	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8
Máxima de 1 hora	0,09	0,27	0,32
Máxima de 24 horas	0,02	0,04	0,03
Média do Período	0,01	0,01	0,02

No que tange aos padrões de qualidade do ar existentes, todas as concentrações obtidas nas campanhas são substancialmente inferiores aos 100µg/m<sup>3</sup> estabelecidos como valor limite

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 67/110
	RTC220102		REV. 2

para qualidade do ar em Ontario, Canadá. Mesmo analisando o cenário mais crítico (máxima de uma hora), verificam-se concentrações significativamente inferiores ao valor limite. De fato, a maior concentração obtida na Estação Paracatu (máxima de uma hora da Campanha 8) representa apenas 0,32% 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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 68/110
	RTC220102		REV. 2

## 8. Conclusão


O presente trabalho teve como objetivos caracterizar quimicamente o material particulado menor que 10 µm (PM<sub>10</sub>), estabelecer relação entre fontes emissoras e receptores, bem como discutir o risco à saúde da população pela exposição aos elementos e concentrações identificadas.

O período de estudo deste relatório foi dividido em 4 campanhas. A primeira campanha, denominada Campanha 5, teve início em 14/11/2018 e término no dia 12/02/2019. Destaca-se que neste relatório, com relação a campanha 5, foram utilizadas apenas as amostras de fontes emissoras. Já a segunda campanha (Campanha 6), ocorreu entre os dias 18/03/2019 a 13/06/2019, sendo que para a localidade de Paracatu (MG), foram coletadas apenas amostras de receptores. Na terceira Campanha (Campanha 7), foram coletadas amostras de fontes emissoras e pontos receptores durante os o período de 06/10/2020 a 17/03/2021. E por fim, entre os dias 11/06/2021 a 09/08/2021, ocorreu a Campanha 8, na qual também foram coletadas amostras de fontes emissoras e de pontos receptores a serem utilizados no presente relatório.

A partir dos dados obtidos da estação de monitoramento da qualidade do ar de Paracatu, para o período que engloba todas as campanhas, foi possível perceber que, não houve ultrapassagem ao padrão intermediário I para PM<sub>10</sub>, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 491/2018, durante o período do estudo.

As análises químicas foram realizadas para as amostras dos materiais contidos nas fontes emissoras (rejeito, solo intacto, material afetado, vias não pavimentadas e obra) e receptores (Estação Paracatu) utilizando o método PIXE.

Pelo método PIXE, os elementos químicos mais abundantes detectados nas amostras de fontes emissoras, em ambas campanhas foram, o Ferro (Fe), Silício (Si) e Alumínio (Al). Contudo, também foram detectados, em menor quantidade, os elementos: Sódio (Na), Magnésio (Mg), Fósforo (P), Enxofre (S), Cloro (Cl), Potássio(K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Vanádio (V), Manganês (Mn), Cobalto (Co), Zinco (Zn), Gálio (Ga), Arsênio (As), Bromo (Br), Rubídio (Rb), Estrôncio (Sr), Ítrio (Y), Zircônio (Zr) e Háfio (Hf) na Campanha 5; Sódio (Na), Magnésio (Mg), Fósforo (P), Enxofre (S), Cloro (Cl), Potássio(K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Manganês (Mn), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Gálio (Ga), Arsênio (As), Rubídio (Rb), Estrôncio (Sr), e Estanho (Sn) na Campanha 7 e Sódio (Na), Magnésio (Mg), Fósforo (P), Enxofre (S), Cloro (Cl), Potássio(K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Cromo (Cr), Manganês (Mn),



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 69/110	
	RTC220102	REV. 2	

Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Gálio e Zircônio (Zr) na Campanha 8. Para as amostras dos pontos receptores, os elementos com maior relevância foram de modo geral, Ferro (Fe), Silício (Si) e Alumínio (Al), Enxofre (S), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Sódio (Na). No entanto, também foram detectados, em menor quantidade, os elementos: Mg, P, Ti, Mn, Cu, Zn, As e Br (Campanha 6); Mg, P, Ti, Mn, Cu, Zn, As, Br, Cl (Campanha 7) e P, Cu, As e Br (Campanha 8).

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 PM<sub>10</sub>, em Paracatu (MG). Devido à similaridade encontrada entre os perfis químicos das tipologias de fontes Vias não pavimentadas e Material Afetado e também entre as tipologias Solo Intacto e Obra Reassentamento, optou-se pelo agrupamento dos referidos pares semelhantes, de forma que a média das concentrações dos elementos químicos passou a representar 2 grupos de fontes emissoras distintos na localidade de Paracatu. Essa abordagem buscou evitar a colinearidade das fontes emissoras no modelo.



Ao analisar o ponto receptor em Paracatu (MG), foi possível observar que a contribuição para as concentrações de PM<sub>10</sub> do grupo contendo as fontes via não pavimentada e material afetado variou de 09 a 21% entre as campanhas 6, 7 e 8. Enquanto a contribuição do grupo contendo as fontes de solo intacto e obra Reassentamento variou de 10 a 22% entre as campanhas realizadas. Ainda, o percentual referente à contribuição das outras fontes emissoras apresentou-se relevante para o receptor, uma vez que foi maior do que o total de contribuição das fontes mapeadas. Isto mostra que as atividades características de Paracatu e as condições naturais começam a se tornar expressivas para a qualidade do ar local. Estas não estão relacionadas às ações da FUNDAÇÃO, e no âmbito do presente estudo não foram mapeadas.

O método PIXE subsidiou a discussão dos efeitos dos elementos detectados nas amostras coletadas em Paracatu na saúde da população exposta. 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, 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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 70/110
	RTC220102		REV. 2

de potencial risco à saúde da população. Entretanto, para o elemento Fe, que 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.



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 71/110
	RTC220102		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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 72/110	
	RTC220102	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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 73/110
	RTC220102		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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 74/110	
	RTC220102	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.

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

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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 75/110	
	RTC220102	REV. 2	

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.

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<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> 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.

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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 76/110	
	RTC220102	REV. 2	

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

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.

ECOSOFT – ECOSOFT CONSULTORIA E SOFTWARES AMBIENTAIS. *Plano de Monitoramento da Qualidade do Ar e Controle de Emissões Atmosféricas (RTC200499-R1).* Vitória, 2021.

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*

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 77/110	
	RTC220102	REV. 2	

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.

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.



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 78/110	
	RTC220102	REV. 2	

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.

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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 79/110
	RTC220102		REV. 2

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.

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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 80/110	
	RTC220102	REV. 2	

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.

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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 81/110
	RTC220102		REV. 2

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.

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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 82/110	
	RTC220102	REV. 2	

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.

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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 83/110
	RTC220102		REV. 2

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.

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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 84/110	
	RTC220102	REV. 2	

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.

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.



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 85/110	
	RTC220102	REV. 2	

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.

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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 86/110	
	RTC220102	REV. 2	

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.

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: Nordberg 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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 87/110
	RTC220102		REV. 2

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Chemical Mass Balance (CMB) Model. *United States*, 2016. Disponível em: <[https://www3.epa.gov/scram001/receptor\\_cmb.htm](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.



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/](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.



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 88/110
		RTC220102	REV. 2

## APÊNDICE A – Resultados das Análises Químicas de PM<sub>10</sub> – Método PIXE

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



**Tabela A.1** – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM<sub>10</sub> – Amostras em fontes emissoras – Campanha 5 (14/11/2018 a 12/02/2019)

ELEMENTO	CONCENTRAÇÃO [%]*					
	Amostra 10	Amostra 16	Amostra 17	Amostra 18	Amostra 11	Amostra 12
	23/01/2019	12/02/2019	12/02/2019	12/02/2019	14/11/2018	14/11/2018
	VIA N.PAV.	MATERIAL AFETADO – P1	SOLO INTACTO	MATERIAL AFETADO – P2	REJEITO BAR. FUNDÃO - P1	REJEITO BAR. FUNDÃO - P2
Na	< LD	0,423	< LD	0,861	< LD	< LD
Mg	0,398	0,243	0,197	< LD	< LD	< LD
Al	14,303	6,162	22,829	2,119	5,081	6,650
Si	13,843	29,979	25,116	26,954	31,357	32,629
P	0,144	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
S	0,052	0,346	0,032	0,152	< LD	0,042
Cl	0,037	0,121	< LD	0,079	< LD	< LD
K	0,620	0,388	0,820	0,240	0,539	0,797
Ca	0,233	0,594	< LD	0,092	< LD	0,053
Sc	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Ti	0,223	0,097	0,164	0,042	< LD	0,072
V	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	0,022
Cr	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Mn	0,067	0,046	0,007	0,035	< LD	< LD
Fe	35,322	32,325	2,291	38,124	36,088	33,891
Co	0,250	< LD	< LD	0,260	< LD	0,234
Ni	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Cu	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Zn	< LD	< LD	0,003	< LD	< LD	< LD
Ga	< LD	< LD	0,003	< LD	< LD	< LD
Ge	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
As	< LD	< LD	0,001	< LD	< LD	< LD
Se	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Br	< LD	< LD	0,001	< LD	< LD	< LD
Rb	< LD	0,008	0,003	0,013	0,016	0,013
Sr	< LD	< LD	0,002	0,011	< LD	0,010

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 89/110
		RTC220102	REV. 2

Continuação

CONCENTRAÇÃO [%]*						
	Amostra 10	Amostra 16	Amostra 17	Amostra 18	Amostra 11	Amostra 12
	23/01/2019	12/02/2019	12/02/2019	12/02/2019	14/11/2018	14/11/2018
ELEMENTO	VIA N.PAV.	MATERIAL AFETADO – P1	SOLO INTACTO	MATERIAL AFETADO – P2	REJEITO BAR. FUNDÃO < LD P1	REJEITO BAR. FUNDÃO < LD P2
Y	< LD	< LD	0,002	< LD	< LD	< LD
Zr	0,018	< LD	0,039	< LD	< LD	< LD
Nb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Mo	< 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	0,002	< LD	< LD	< LD

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 90/110
		RTC220102	REV. 2



Conclusão

CONCENTRAÇÃO [%]*						
	Amostra 10	Amostra 16	Amostra 17	Amostra 18	Amostra 11	Amostra 12
	23/01/2019	12/02/2019	12/02/2019	12/02/2019	14/11/2018	14/11/2018
ELEMENTO	VIA N.PAV.	MATERIAL AFETADO – P1	SOLO INTACTO	MATERIAL AFETADO – P2	REJEITO BAR. FUNDÃO < LD P1	REJEITO BAR. FUNDÃO < LD P2
Ta	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
W	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Re	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
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 do que o limite de detecção para o elemento.

VIA N. PAV.: Via não pavimentada



BAR. FUNDÃO: Barragem de Fundão

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 91/110	
	RTC220102	REV. 2	

**Tabela A.2** – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM<sub>10</sub> – Amostras em fontes emissoras – Campanha 7 (02/03/2021 a 15/03/2021).



CONCENTRAÇÃO [%]*			
ELEMENTO	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
	02/03/2021	15/03/2021	15/03/2021
	VIA NÃO PAVIMENTADA	OBRA REASSENTAMENTO	MATERIAL AFETADO
Na	0,487	0,392	1,059
Mg	0,965	0,657	0,589
Al	14,295	18,209	12,175
Si	22,894	21,644	34,071
P	0,106	< LD	< LD
S	0,134	0,308	0,239
Cl	0,121	0,033	0,145
K	1,549	0,978	1,230
Ca	0,922	3,428	2,039
Sc	< LD	< LD	< LD
Ti	0,306	0,732	0,247
V	< LD	< LD	< LD
Cr	< LD	< LD	< LD
Mn	0,107	0,056	0,063
Fe	32,574	6,892	24,339
Co	0,227	0,045	0,181
Ni	< LD	0,003	< LD
Cu	< LD	0,003	< LD
Zn	0,008	0,008	0,004
Ga	< LD	0,004	< LD
Ge	< LD	< LD	< LD
As	0,004	0,001	< LD
Se	< LD	< LD	< LD
Br	< LD	< LD	< LD
Rb	0,017	0,007	0,010
Sr	< LD	0,017	0,017
Y	< LD	< LD	< LD
Zr	< LD	0,032	0,042
Nb	< LD	< LD	< LD
Mo	< LD	< LD	< LD
Ru	< LD	< LD	< LD
Rh	< LD	< LD	< LD
Pd	< LD	< LD	< LD



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 92/110	
	RTC220102	REV. 2	

Continuação



CONCENTRAÇÃO [%]*			
ELEMENTO	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
	02/03/2021	15/03/2021	15/03/2021
	VIA NÃO PAVIMENTADA	OBRA REASSENTAMENTO	MATERIAL AFETADO
Ag	< LD	< LD	< LD
Cd	< LD	< LD	< LD
In	< LD	< LD	< LD
Sn	< LD	0,558%	< LD
Sb	< LD	< LD	< LD
Te	< LD	< LD	< LD
I	< LD	< LD	< LD
Cs	< LD	< LD	< LD
Ba	< LD	< LD	< LD
La	< LD	< LD	< LD
Ce	< LD	< LD	< LD
Pr	< LD	< LD	< LD
Nd	< LD	< LD	< LD
Pm	< LD	< LD	< LD
Sm	< LD	< LD	< LD
Eu	< LD	< LD	< LD
Gd	< LD	< LD	< LD
Tb	< LD	< LD	< LD
Dy	< LD	< LD	< LD
Ho	< LD	< LD	< LD
Er	< LD	< LD	< LD
Tm	< LD	< LD	< LD
Yb	< LD	< LD	< LD
Lu	< LD	< LD	< LD
Hf	< LD	< LD	< LD
Ta	< LD	< LD	< LD
W	< LD	< LD	< LD
Re	< LD	< LD	< LD
Os	< LD	< LD	< LD
Ir	< LD	< LD	< LD
Pt	< LD	< LD	< LD
Au	< LD	< LD	< LD
Hg	< LD	< LD	< LD

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 93/110
	RTC220102		REV. 2

Conclusão



CONCENTRAÇÃO [%]*			
	<b>Amostra 01</b>	<b>Amostra 02</b>	<b>Amostra 03</b>
	<b>02/03/2021</b>	<b>15/03/2021</b>	<b>15/03/2021</b>
<b>ELEMENTO</b>	<b>VIA NÃO PAVIMENTADA</b>	<b>OBRA REASSENTAMENTO</b>	<b>MATERIAL AFETADO</b>
Tl	< LD	< LD	< LD
Pb	< LD	< LD	< LD
Bi	< LD	< LD	< LD
Th	< LD	< LD	< LD
U	< LD	< LD	< LD

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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 94/110	
	RTC220102	REV. 2	



**Tabela A.3** – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM<sub>10</sub> – Amostras em fontes emissoras – Campanha 8 (05/08/2021 a 06/08/2021).

CONCENTRAÇÃO [%]*			
ELEMENTO	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
	06/08/2021	05/08/2021	06/08/2021
	VIA NÃO PAVIMENTADA	OBRA REASSENTAMENTO	MATERIAL AFETADO
Na	0,445	< LD	< LD
Mg	0,682	0,202	< LD
Al	12,529	20,489	8,918
Si	24,949	19,838	27,756
P	0,077	0,111	0,119
S	0,171	0,068	0,230
Cl	0,105	< LD	0,032
K	1,068	0,332	0,555
Ca	0,549	0,216	0,542
Sc	< LD	< LD	< LD
Ti	0,240	0,815	0,153
V	< LD	< LD	< LD
Cr	< LD	0,012	< LD
Mn	0,067	0,030	0,061
Fe	21,083	7,740	28,427
Co	< LD	< LD	< LD
Ni	< LD	0,002	< LD
Cu	< LD	0,003	< LD
Zn	0,004	0,005	< LD
Ga	< LD	0,003	< LD
Ge	< LD	< LD	< LD
As	< LD	< LD	< LD
Se	< LD	< LD	< LD
Br	< LD	< LD	< LD
Rb	< LD	< LD	< LD
Sr	< LD	< LD	< LD
Y	< LD	< LD	< LD
Zr	0,011	0,017	< LD
Nb	< LD	< LD	< LD
Mo	< LD	< LD	< LD
Ru	< LD	< LD	< LD
Rh	< LD	< LD	< LD
Pd	< LD	< LD	< LD

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 95/110	
	RTC220102	REV. 2	

Continuação



CONCENTRAÇÃO [%]*			
ELEMENTO	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
	06/08/2021	05/08/2021	06/08/2021
	VIA NÃO PAVIMENTADA	OBRA REASSENTAMENTO	MATERIAL AFETADO
Ag	< LD	< LD	< LD
Cd	< LD	< LD	< LD
In	< LD	< LD	< LD
Sn	< LD	< LD	< LD
Sb	< LD	< LD	< LD
Te	< LD	< LD	< LD
I	< LD	< LD	< LD
Cs	< LD	< LD	< LD
Ba	< LD	< LD	< LD
La	< LD	< LD	< LD
Ce	< LD	< LD	< LD
Pr	< LD	< LD	< LD
Nd	< LD	< LD	< LD
Pm	< LD	< LD	< LD
Sm	< LD	< LD	< LD
Eu	< LD	< LD	< LD
Gd	< LD	< LD	< LD
Tb	< LD	< LD	< LD
Dy	< LD	< LD	< LD
Ho	< LD	< LD	< LD
Er	< LD	< LD	< LD
Tm	< LD	< LD	< LD
Yb	< LD	< LD	< LD
Lu	< LD	< LD	< LD
Hf	< LD	< LD	< LD
Ta	< LD	< LD	< LD
W	< LD	< LD	< LD
Re	< LD	< LD	< LD
Os	< LD	< LD	< LD
Ir	< LD	< LD	< LD
Pt	< LD	< LD	< LD
Au	< LD	< LD	< LD
Hg	< LD	< LD	< LD

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 96/110
	RTC220102		REV. 2

Conclusão

CONCENTRAÇÃO [%]*			
	<b>Amostra 01</b>	<b>Amostra 02</b>	<b>Amostra 03</b>
	<b>06/08/2021</b>	<b>05/08/2021</b>	<b>06/08/2021</b>
<b>ELEMENTO</b>	<b>VIA NÃO PAVIMENTADA</b>	<b>OBRA REASSENTAMENTO</b>	<b>MATERIAL AFETADO</b>
Tl	< LD	< LD	< LD
Pb	< LD	< LD	< LD
Bi	< LD	< LD	< LD
Th	< LD	< LD	< LD
U	< LD	< LD	< LD



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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 97/110	
	RTC220102	REV. 2	

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

**Tabela A.4** – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM<sub>10</sub> – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de nylon e filtro de celulose – Campanha 6 (18/03/2019 a 13/06/2019)



CONCENTRAÇÃO [%]*		
ELEMENTO	FILTRO DE NYLON	FILTRO DE CELULOSE
	Amostra N29	Amostra C29
	18/03/2019 a 13/06/2019	18/03/2019 a 13/06/2019
Na	0,807	1,228
Mg	0,268	0,294
Al	2,765	3,415
Si	3,162	3,936
P	0,329	0,402
S	3,688	4,688
Cl	< LD	< LD
K	2,128	2,682
Ca	1,156	1,538
Sc	< LD	< LD
Ti	0,466	0,132
V	< LD	< LD
Cr	< LD	< LD
Mn	0,051	0,066
Fe	3,344	4,814
Co	< LD	< LD
Ni	< LD	< LD
Cu	0,007	0,014
Zn	0,051	0,067
Ga	< LD	< LD
Ge	< LD	< LD
As	0,008	0,014
Se	< LD	< LD
Br	0,010	0,016
Rb	< LD	< LD
Sr	< LD	< LD
Y	< LD	< LD
Zr	< LD	< LD

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 98/110	
	RTC220102	REV. 2	

Continuação

CONCENTRAÇÃO [%]*		
	FILTRO DE NYLON	FILTRO DE CELULOSE
	Amostra N29	Amostra C29
ELEMENTO	18/03/2019 a 13/06/2019	18/03/2019 a 13/06/2019
Nb	< LD	< LD
Mo	< LD	< LD
Tc	< LD	< LD
Ru	< LD	< LD
Rh	< LD	< LD
Pd	< LD	< LD
Ag	< LD	< LD
Cd	< LD	< LD
In	< LD	< LD
Sn	< LD	< LD
Sb	< LD	< LD
Te	< LD	< LD
I	< LD	< LD
Cs	< LD	< LD
Ba	< LD	< LD
La	< LD	< LD
Ce	< LD	< LD
Pr	< LD	< LD
Nd	< LD	< LD
Pm	< LD	< LD
Sm	< LD	< LD
Eu	< LD	< LD
Gd	< LD	< LD
Tb	< LD	< LD
Dy	< LD	< LD
Ho	< LD	< LD
Er	< LD	< LD
Tm	< LD	< LD
Yb	< LD	< LD
Lu	< LD	< LD
Hf	< LD	< LD
Ta	< LD	< LD





		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 99/110
	RTC220102		REV. 2

Conclusão

CONCENTRAÇÃO [%]*		
	FILTRO DE NYLON	FILTRO DE CELULOSE
	Amostra N29	Amostra C29
ELEMENTO	18/03/2019 a 13/06/2019	18/03/2019 a 13/06/2019
W	< LD	< LD
Re	< LD	< LD
Os	< LD	< LD
Ir	< LD	< LD
Pt	< LD	< LD
Au	< LD	< LD
Hg	< LD	< LD
Tl	< LD	< LD
Pb	< LD	< LD
Bi	< LD	< LD
Th	< LD	< LD
U	< LD	< LD



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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 100/110	
	RTC220102	REV. 2	

**Tabela A.5** – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM<sub>10</sub> – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de nylon e filtro de celulose – Campanha 7 (06/10/2020 a 17/03/2021)



CONCENTRAÇÃO [%]*		
	FILTRO DE NYLON	FILTRO DE CELULOSE
	Amostra N36	Amostra C36
ELEMENTO	06/10/2020 a 17/03/2021	06/10/2020 a 17/03/2021
Na	0,574	1,195
Mg	0,339	0,523
Al	4,242	4,437
Si	4,913	5,130
P	0,309	0,257
S	2,129	3,484
Cl	0,076	< LD
K	1,875	2,324
Ca	1,385	1,809
Sc	< LD	< LD
Ti	0,146	0,265
V	< LD	< LD
Cr	< LD	< LD
Mn	0,068	0,068
Fe	6,663	6,144
Co	< LD	< LD
Ni	< LD	< LD
Cu	0,003	< LD
Zn	0,037	0,054
Ga	< LD	< LD
Ge	< LD	< LD
As	0,007	< LD
Se	< LD	< LD
Br	0,010	< LD
Rb	< LD	< LD
Sr	< LD	< LD
Y	< LD	< LD
Zr	< LD	< LD
Nb	< LD	< LD
Mo	< LD	< LD
Tc	< LD	< LD

Continuação

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 101/110	
	RTC220102	REV. 2	

**CONCENTRAÇÃO [%]\***



ELEMENTO	FILTRO DE NYLON	FILTRO DE CELULOSE
	Amostra N36	Amostra C36
	06/10/2020 a 17/03/2021	06/10/2020 a 17/03/2021
Ru	< LD	< LD
Rh	< LD	< LD
Pd	< LD	< LD
Ag	< LD	< LD
Cd	< LD	< LD
In	< LD	< LD
Sn	< LD	< LD
Sb	< LD	< LD
Te	< LD	< LD
I	< LD	< LD
Cs	< LD	< LD
Ba	< LD	< LD
La	< LD	< LD
Ce	< LD	< LD
Pr	< LD	< LD
Nd	< LD	< LD
Pm	< LD	< LD
Sm	< LD	< LD
Eu	< LD	< LD
Gd	< LD	< LD
Tb	< LD	< LD
Dy	< LD	< LD
Ho	< LD	< LD
Er	< LD	< LD
Tm	< LD	< LD
Yb	< LD	< LD
Lu	< LD	< LD
Hf	< LD	< LD
Ta	< LD	< LD
W	< LD	< LD
Re	< LD	< LD
Os	< LD	< LD

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1		PÁGINA 102/110
	RTC220102		REV. 2

Conclusão



CONCENTRAÇÃO [%]*		
	FILTRO DE NYLON	FILTRO DE CELULOSE
	Amostra N36	Amostra C36
ELEMENTO	06/10/2020 a 17/03/2021	06/10/2020 a 17/03/2021
Ir	< LD	< LD
Pt	< LD	< LD
Au	< LD	< LD
Hg	< LD	< LD
Tl	< LD	< LD
Pb	< LD	< LD
Bi	< LD	< LD
Th	< LD	< LD
U	< LD	< LD

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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 103/110	
	RTC220102	REV. 2	



**Tabela A.6** – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM<sub>10</sub> – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de nylon e filtro de celulose – Campanha 8 (11/06/2021 a 09/08/2021)

CONCENTRAÇÃO [%]*		
	FILTRO DE NYLON	FILTRO DE CELULOSE
	Amostra N36	Amostra C36
ELEMENTO	11/06/2021 a 09/08/2021	11/06/2021 a 09/08/2021
Na	0,688	0,983
Mg	0,428	0,393
Al	6,401	6,802
Si	8,111	8,875
P	< LD	< LD
S	1,930	3,114
Cl	0,342	0,260
K	2,252	2,492
Ca	4,153	4,273
Sc	< LD	< LD
Ti	0,224	0,364
V	< LD	< LD
Cr	< LD	< LD
Mn	0,082	0,119
Fe	7,103	7,638
Co	< LD	< LD
Ni	< LD	< LD
Cu	< LD	< LD
Zn	0,049	0,060
Ga	< LD	< LD
Ge	< LD	< LD
As	< LD	< LD
Se	< LD	< LD
Br	< LD	< LD
Rb	< LD	< LD
Sr	< LD	< LD
Y	< LD	< LD
Zr	< LD	< LD
Nb	< LD	< LD
Mo	< LD	< LD
Tc	< LD	< LD

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 104/110	
	RTC220102	REV. 2	

Continuação

CONCENTRAÇÃO [%]*		
	FILTRO DE NYLON	FILTRO DE CELULOSE
	Amostra N36	Amostra C36
ELEMENTO	11/06/2021 a 09/08/2021	11/06/2021 a 09/08/2021
Ru	< LD	< LD
Rh	< LD	< LD
Pd	< LD	< LD
Ag	< LD	< LD
Cd	< LD	< LD
In	< LD	< LD
Sn	< LD	< LD
Sb	< LD	< LD
Te	< LD	< LD
I	< LD	< LD
Cs	< LD	< LD
Ba	< LD	< LD
La	< LD	< LD
Ce	< LD	< LD
Pr	< LD	< LD
Nd	< LD	< LD
Pm	< LD	< LD
Sm	< LD	< LD
Eu	< LD	< LD
Gd	< LD	< LD
Tb	< LD	< LD
Dy	< LD	< LD
Ho	< LD	< LD
Er	< LD	< LD
Tm	< LD	< LD
Yb	< LD	< LD
Lu	< LD	< LD
Hf	< LD	< LD
Ta	< LD	< LD
W	< LD	< LD
Re	< LD	< LD
Os	< LD	< LD



		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 105/110	
	RTC220102	REV. 2	

Conclusão

CONCENTRAÇÃO [%]*		
	FILTRO DE NYLON	FILTRO DE CELULOSE
	Amostra N36	Amostra C36
ELEMENTO	11/06/2021 a 09/08/2021	11/06/2021 a 09/08/2021
Ir	< LD	< LD
Pt	< LD	< LD
Au	< LD	< LD
Hg	< LD	< LD
Tl	< LD	< LD
Pb	< LD	< LD
Bi	< LD	< LD
Th	< LD	< LD
U	< LD	< LD

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





		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 106/110	
	RTC220102	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

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021	Nº 1	PÁGINA 107/110	
	RTC220102	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 PM<sub>10</sub> 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.

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 108/110
		RTC220102	REV. 2



**Figura A.1** – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 6 (18/03/2019 a 13/06/2019)

SAMPLE:		OPTIONS:		INPUT FILES:	
SITE:	PAC6	BRITT & LUECKE:	No		
SAMPLE DATE:	2022	SOURCE ELIMINATION:	Yes		
DURATION:	24	BEST FIT:	Yes		
START HOUR:	0	FIT MEASURE WEIGHTS:			
SIZE:	PM10	R Square:	1	AD_PA.csv	
		Chi Square:	1	PR_PA.csv	
Species Array:	1	% Mass:	1		
Sources Array:	1	Fraction Estimate:	1		
FITTING STATISTICS:					
R SQUARE	0.69	% MASS	18.7		
CHI SQUARE	6.31	DEGREES FREEDOM	4		
FIT MEASURE	0.51				
SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:					
SOURCE	EST CODE	NAME	SCE(µg/m³)	Std Err	Tstat
YES VNPEMA	0		0.09127	0.03952	2.30963
YES OES	0		0.09569	0.04071	2.35058
-----					
0.18697					
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					
-----					
0.01774 0.05389					
-----					
NUMBER ESTIMABLE SOURCES = 2 FOR MIN. PROJ. = 0.95					
PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	
-----					
1.0000	VNPEMA	1.0000	OES		
-----					
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	0.18697+- 0.02512	0.19+- 0.03	-7.9
Na	IC1 *	0.01018+- 0.00298	0.00055+- 0.00042	0.05+- 0.04	-3.2
Mg	IC2	0.00281+- 0.00018	0.00071+- 0.00041	0.25+- 0.15	-4.6
Al	IC3 *	0.03090+- 0.00460	0.02882+- 0.00473	0.93+- 0.21	-0.3
Si	IC4 *	0.03549+- 0.00548	0.04477+- 0.00635	1.26+- 0.26	1.1
P	IC5	0.00365+- 0.00051	0.00009+- 0.00008	0.03+- 0.02	-6.9
S	IC6	0.04188+- 0.00707	0.00030+- 0.00017	0.01+- 0.00	-5.9
Cl	IC7	0.00000+- 0.00000	0.00009+- 0.00004	0.00+- 0.00	2.1
K	IC8	0.02405+- 0.00391	0.00142+- 0.00055	0.06+- 0.02	-5.7
Ca	IC9 *	0.01347+- 0.00270	0.00181+- 0.00193	0.13+- 0.15	-3.5
Ti	IC10 *	0.00299+- 0.00236	0.00072+- 0.00035	0.24+- 0.22	-1.0
Mn	IC11	0.00058+- 0.00010	0.00009+- 0.00003	0.15+- 0.06	-4.7
Fe	IC12 *	0.04079+- 0.01040	0.03307+- 0.00619	0.81+- 0.26	-0.6
Cu	IC13	0.00010+- 0.00004	0.00000+- 0.00000	0.02+- 0.02	-2.4
Zn	IC14	0.00059+- 0.00012	0.00001+- 0.00000	0.01+- 0.01	-4.9
As	IC15	0.00011+- 0.00004	0.00000+- 0.00000	0.01+- 0.01	-2.7
Br	IC16	0.00013+- 0.00004	0.00000+- 0.00000	0.00+- 0.00	-3.2
-----					

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 109/110
		RTC220102	REV. 2

**Figura A.2** – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 7 (06/10/2020 a 17/03/2021)

SAMPLE:		OPTIONS:		INPUT FILES:	
SITE:	PAC7	BRITT & LUECKE:	No		
SAMPLE DATE:	2022	SOURCE ELIMINATION:	Yes		
DURATION:	24	BEST FIT:	Yes		
START HOUR:	0	FIT MEASURE WEIGHTS:			
SIZE:	PM10	R Square:	1	AD_PA.csv	
		Chi Square:	1	PR_PA.csv	
Species Array:	1	% Mass:	1		
Sources Array:	1	Fraction Estimate:	1		
FITTING STATISTICS:					
	R SQUARE	0.82	% MASS	27.8	
	CHI SQUARE	4.92	DEGREES FREEDOM	4	
	FIT MEASURE	0.58			
SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:					
SOURCE	EST CODE	NAME	SCE(µg/m³)	Std Err	Tstat
YES VNPMA	0		0.16027	0.03822	4.19307
YES OES	0		0.11724	0.04358	2.69019
-----					
0.27751					
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					
-----					
0.02070 0.05415					
-----					
NUMBER ESTIMABLE SOURCES = 2 FOR MIN. PROJ. = 0.95					
PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE
-----					
1.0000	VNPMA	1.0000	OES		
-----					
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	0.27751+- 0.02992	0.28+- 0.04	-6.9
Na	IC1	* 0.00885+- 0.00439	0.00090+- 0.00069	0.10+- 0.09	-1.8
Mg	IC2	0.00431+- 0.00131	0.00107+- 0.00066	0.25+- 0.17	-2.2
Al	IC3	* 0.04340+- 0.00138	0.04019+- 0.00783	0.93+- 0.18	-0.4
Si	IC4	* 0.05022+- 0.00153	0.06734+- 0.01068	1.34+- 0.22	1.6
P	IC5	0.00283+- 0.00037	0.00015+- 0.00013	0.05+- 0.04	-6.9
S	IC6	0.02807+- 0.00959	0.00046+- 0.00023	0.02+- 0.01	-2.9
Cl	IC7	0.00038+- 0.00054	0.00016+- 0.00007	0.42+- 0.63	-0.4
K	IC8	0.02099+- 0.00318	0.00213+- 0.00087	0.10+- 0.04	-5.7
Ca	IC9	* 0.01597+- 0.00300	0.00256+- 0.00248	0.16+- 0.16	-3.4
Ti	IC10	* 0.00206+- 0.00084	0.00097+- 0.00044	0.47+- 0.29	-1.2
Mn	IC11	0.00068+- 0.00001	0.00014+- 0.00005	0.20+- 0.07	-11.5
Fe	IC12	* 0.06404+- 0.00367	0.05520+- 0.01029	0.86+- 0.17	-0.8
Cu	IC13	0.00002+- 0.00002	0.00000+- 0.00000	0.12+- 0.16	-0.9
Zn	IC14	0.00046+- 0.00012	0.00001+- 0.00001	0.02+- 0.01	-3.7
As	IC15	0.00003+- 0.00005	0.00000+- 0.00000	0.05+- 0.12	-0.6
Br	IC16	0.00005+- 0.00007	0.00000+- 0.00000	0.00+- 0.01	-0.7
-----					

		<b>FUNDAÇÃO RENOVA</b>	
ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM PARACATU - NOVEMBRO DE 2018 A AGOSTO DE 2021		Nº 1	PÁGINA 110/110
		RTC220102	REV. 2

**Figura A.3** – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 8 (11/06/2021 a 09/08/2021)

SAMPLE:		OPTIONS:		INPUT FILES:	
SITE:	PAC8	BRITT & LUECKE:	No		
SAMPLE DATE:	2022	SOURCE ELIMINATION:	Yes		
DURATION:	24	BEST FIT:	Yes		
START HOUR:	0	FIT MEASURE WEIGHTS:			
SIZE:	PM10	R Square:	1	AD_PA.csv	
		Chi Square:	1	PR_PA.csv	
Species Array:	1	% Mass:	1		
Sources Array:	1	Fraction Estimate:	1		
FITTING STATISTICS:					
R SQUARE	0.80	% MASS	43.3		
CHI SQUARE	5.39	DEGREES FREEDOM	5		
FIT MEASURE	0.61				
SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:					
SOURCE					
EST CODE	NAME	SCE(µg/m³)	Std Err	Tstat	
YES VNPMA	0	0.21463	0.05234	4.10058	
YES OES	0	0.21855	0.06143	3.55768	
-----					
0.43319					
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					
0.02906 0.07529					
-----					
NUMBER ESTIMABLE SOURCES = 2 FOR MIN. PROJ. = 0.95					
PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	PROJ. SOURCE	
1.0000 VNPMA	1.0000 OES				
-----					
ESTIMABLE LINEAR COMBINATIONS OF INESTIMABLE SOURCES					
COEFF. SOURCE	COEFF. SOURCE	COEFF. SOURCE	COEFF. SOURCE	SCE	Std Err
=====					
SPECIES CONCENTRATIONS:					
SPECIES	FIT	MEASURED	CALCULATED	CALCULATED	RESIDUAL
				MEASURED	UNCERTAINTY
-----					
TOTAL	IC	1.00000+- 0.10000	0.43319+- 0.04244	0.43+- 0.06	-5.2
Na	IC1	* 0.00835+- 0.00209	0.00129+- 0.00098	0.15+- 0.12	-3.1
Mg	IC2	* 0.00411+- 0.00025	0.00165+- 0.00096	0.40+- 0.24	-2.5
Al	IC3	* 0.06601+- 0.00284	0.06644+- 0.01106	1.01+- 0.17	0.0
Si	IC4	* 0.08493+- 0.00540	0.10385+- 0.01487	1.22+- 0.19	1.2
P	IC5	0.00000+- 0.00000	0.00022+- 0.00019	0.00+- 0.00	1.1
S	IC6	0.02522+- 0.00838	0.00070+- 0.00038	0.03+- 0.02	-2.9
Cl	IC7	0.00301+- 0.00058	0.00022+- 0.00010	0.07+- 0.04	-4.7
K	IC8	0.02372+- 0.00170	0.00328+- 0.00127	0.14+- 0.05	-9.6
Ca	IC9	0.04213+- 0.00885	0.00418+- 0.00442	0.10+- 0.10	-8.4
Ti	IC10	* 0.00294+- 0.00099	0.00165+- 0.00080	0.56+- 0.33	-1.0
Mn	IC11	* 0.00101+- 0.00026	0.00020+- 0.00007	0.20+- 0.09	-3.0
Fe	IC12	* 0.07370+- 0.00378	0.07739+- 0.01448	1.05+- 0.20	0.2
Cu	IC13	0.00000+- 0.00000	0.00000+- 0.00000	0.00+- 0.00	1.2
Zn	IC14	0.00055+- 0.00008	0.00002+- 0.00001	0.03+- 0.02	-6.6
As	IC15	0.00000+- 0.00000	0.00000+- 0.00000	0.00+- 0.00	0.8
Br	IC16	0.00000+- 0.00000	0.00000+- 0.00000	0.00+- 0.00	0.6
-----					