




RTC220104-R2



FUNDAÇÃO
renova



**ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL
PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO**

JANEIRO 2023

| | | | |
|---|---|------------------------|-----------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE, NOVO SOBERBO E SANTANA DO DESERTO NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 2/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |





**ANÁLISE DO MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL
PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO
NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021
RTC220104-R2**

| | | | |
|--|---|------------------------|--|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | PÁGINA 3/117 | |
| | RTC220104 | REV. 2 | |



LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 3-1 – Amostras de PM10 coletadas em fontes emissoras e em pontos receptores em Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado (MG). Campanha 7 (02/11/2020 a 27/05/2021)..... | 20 |
| Figura 3-2 – Amostras de PM10 coletadas em fontes emissoras e em pontos receptores em Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado (MG). Campanha 8 (14/06/2021 a 11/08/2021)..... | 21 |
| Figura 4-1 . Concentrações de MP10 medidas em Santana do Deserto, Rio Doce e Novo Soberbo. PI-1: Padrão de qualidade do ar intermediário 1 (linha vermelha), Padrão Final de Qualidade do Ar (linha preta) CONAMA 491/2018..... | 26 |
| Figura 5-1 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 7 (15/04/2021 a 27/04/2021). | 29 |
| Figura 5-2 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 8 (02/08/2021 a 11/08/2021). | 30 |
| Figura 5-3 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros de nylon – Campanha 7 (02/11/2020 a 27/05/2021)..... | 32 |
| Figura 5-4 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros MCE – Campanha 7 (02/11/2020 a 27/05/2021)..... | 33 |
| Figura 5-5 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros de nylon – Campanha 8 (14/06/2021 a 11/08/2021)..... | 34 |
| Figura 5-6 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros MCE – Campanha 8 (14/06/2021 a 11/08/2021)..... | 35 |
| Figura 6-1 – Perfis médios dos elementos químicos detectados pelo método PIXE nas amostras coletadas em fontes emissoras das Campanhas 7 e 8 nas localidades em Rio Doce (MG) (Centro e Santana do Deserto) e Santa Cruz do Escalvado (MG) (Novo Soberbo). | 41 |
| Figura 6-2 – Evolução das concentrações diárias de PM10 e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor Estação Rio Doce..... | 47 |
| Figura 6-3 – Evolução das concentrações diárias de PM10 e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor Estação Santana do Deserto..... | 48 |
| Figura 6-4 – Evolução das concentrações diárias de PM10 e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor Estação Novo Soberbo..... | 49 |
| Figura A-1 –Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 7 (Rio Doce) | 112 |
| Figura A-2 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 7 (Santana do Deserto) | 113 |
| Figura A-3 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 7 (Novo Soberbo) | 114 |
| Figura A-4 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 8 (Rio Doce) | 115 |
| Figura A-5 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 8 (Santana do Deserto) | 116 |
| Figura A-6 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 8 (Novo Soberbo) | 117 |



| | | | |
|--|---|------------------------|--|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | PÁGINA 4/117 | |
| | RTC220104 | REV. 2 | |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Amostras de PM10 coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores definidos pelas estações Rio Doce, Santana do Deserto e Novo Soberbo. | 17 |
| Tabela 4.1 – Padrões de Qualidade do Ar - Resolução CONAMA nº 491/2018 | 24 |
| Tabela 5.1 – Concentrações em ordem decrescente dos elementos ferro, silício e alumínio nas amostras de fontes emissoras durante as Campanhas 7 e 8 localizadas em Rio Doce/MG e Santa Cruz do Escalvado/MG..... | 28 |
| Tabela 6.1 – Composição química e incerteza do perfil médio das amostras de PM10 em fontes emissoras avaliadas na modelagem CMB..... | 42 |
| Tabela 6.2 – Composição química média e incerteza entre as amostras de PM10 no ponto receptor avaliado na modelagem CMB – Campanhas 7 e 8 – Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado..... | 43 |
| Tabela 6.3 – Contribuição percentual das fontes emissoras nos pontos receptores analisados – Modelagem CMB..... | 44 |
| Tabela 7.1 – Concentração de alumínio na Estação Rio Doce..... | 53 |
| Tabela 7.2 – Concentração de alumínio na Estação Santana do Deserto | 53 |
| Tabela 7.3 – Concentração de alumínio na Estação Novo Soberbo..... | 53 |
| Tabela 7.4 – Concentração de arsênio na Estação Rio Doce | 55 |
| Tabela 7.5 – Concentração de arsênio na Estação Santana do Deserto..... | 55 |
| Tabela 7.6 – Concentração de arsênio na Estação Novo Soberbo | 56 |
| Tabela 7.7 – Concentração de cobre na Estação Rio Doce | 62 |
| Tabela 7.8 – Concentração de cobre na Estação Novo Soberbo | 63 |
| Tabela 7.9 – Concentração de ferro na Estação Rio Doce | 65 |
| Tabela 7.10 – Concentração de ferro na Estação Santana do Deserto | 65 |
| Tabela 7.11 – Concentração de ferro na Estação Novo Soberbo | 65 |
| Tabela 7.12 – Concentração de manganês na Estação Rio Doce | 67 |
| Tabela 7.13 – Concentração de manganês na Estação Santana do Deserto | 67 |
| Tabela 7.14 – Concentração de manganês na Estação Novo Soberbo | 68 |
| Tabela 7.15 – Concentração de níquel na Estação Rio Doce | 71 |
| Tabela 7.16 - Concentração de silício em Rio Doce | 72 |
| Tabela 7.17 - Concentração de silício em Santana do Deserto | 72 |
| Tabela 7.18 - Concentração de silício em Novo Soberbo | 72 |
| Tabela 7.19 - Concentração de zinco em Rio Doce | 74 |
| Tabela 7.20 - Concentração de zinco na Estação de Santana do Deserto | 74 |
| Tabela 7.21 - Concentração de zinco na Estação de Novo Soberbo | 75 |



| | | | |
|--|---|------------------------|-----------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 5/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

| | |
|--|-----|
| Tabela A.1 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em fontes emissoras – Campanha 7 | 95 |
| Tabela A.2 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em fontes emissoras – Campanha 8 | 100 |
| Tabela A.3 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de nylon | 104 |
| Tabela A.4 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM10 – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de MCE | 107 |



| | | | |
|--|---|------------------------|-----------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 6/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

LISTA DE SIGLAS E/OU SÍMBOLOS



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

| | | | |
|--|---|------------------------|-----------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 7/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

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



| | | | |
|--|---|------------------------|-----------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 8/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

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

| | | | |
|--|---|------------------------|-----------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 9/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

SUMÁRIO

| | |
|---|------------|
| SUMÁRIO EXECUTIVO..... | 10 |
| 1. Introdução..... | 11 |
| 2. Objetivos | 14 |
| 3. Metodologia..... | 15 |
| 3.1. Coleta e preparação de amostras..... | 15 |
| 3.1.1. Amostras em fontes emissoras..... | 15 |
| 3.1.2. Amostras em pontos receptores | 16 |
| 3.2. Análises químicas | 22 |
| 3.2.1. Métodos analíticos | 22 |
| 3.2.2. Análises de dados..... | 22 |
| 4. Caracterização das localidades analisadas | 22 |
| 5. Análises químicas pelo método PIXE | 27 |
| 6. Modelagem CMB..... | 36 |
| 6.1. Descrição do modelo CMB | 36 |
| 6.2. Análise do modelo CMB | 39 |
| 7. Potenciais efeitos para a saúde..... | 50 |
| 7.1. Alumínio..... | 51 |
| 7.2. Arsênio | 54 |
| 7.3. Cádmio | 56 |
| 7.4. Chumbo..... | 59 |
| 7.5. Cobre | 61 |
| 7.6. Ferro | 63 |
| 7.7. Manganês | 66 |
| 7.8. Níquel | 68 |
| 7.9. Silício | 71 |
| 7.10. Zinco..... | 73 |
| 8. Conclusão | 76 |
| 9. Equipe Técnica | 78 |
| 10. Referências Bibliográficas | 79 |
| APÊNDICE A – Resultados das Análises Químicas de PM₁₀ – Método PIXE | 95 |
| A.1. Resultados do Método PIXE – Amostras em Fontes Emissoras | 95 |
| A.2. Resultados do Método PIXE – Amostras em Pontos Receptores..... | 104 |
| ANEXO A – Arquivos de Saída do Modelo CMB | 110 |

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 10/117 |
| | RTC220104 | | 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 que população da área diretamente afetada está exposta.

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

Diversas amostragens ao longo do período de estudo, novembro de 2018 a agosto de 2021, foram realizadas para caracterizar quimicamente as fontes emissoras da região (vias de tráfego, rejeito, solo intacto e obra) e a qualidade do ar, totalizando 24 amostras que foram analisadas em laboratório por meio do método PIXE (*Proton Induced X-Ray Emission*). Já para os pontos receptores, foram realizadas 12 coletas realizadas sempre nas estações de monitoramento de qualidade do ar.

Através das análises PIXE, utilizou-se o modelo CMB (*Chemical Mass Balance*) para tentar estabelecer qual o grau de contribuição das fontes emissoras nos receptores, 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 e discutidas sob a perspectiva médica sobre os potenciais efeitos na saúde do ser humano, de modo a compreender se há potencial risco para a saúde da população da região de Rio Doce (MG) e Santa Cruz do Escalvado (MG).

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 11/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

1. Introdução

O rompimento da Barragem de Fundão (EVENTO), localizada no Complexo Germano da Samarco, 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) a Linhares (ES). Entretanto, cerca de metade desse material -aproximadamente 20 milhões de metros cúbicos - depositou-se ao longo do trajeto até a Usina Hidrelétrica (UHE) Risoleta Neves (Candonga), localizada entre os limites das cidades de Rio Doce (MG) e Santa Cruz do Escalvado (MG) (Fundação Renova, 2019). Neste trajeto percorrido, a cidade de Rio Doce (MG) e seu distrito Santana do Deserto tiveram suas áreas afetadas pelo EVENTO, como também o leito do rio Doce margeando a cidade de Santa Cruz do Escalvado (MG), que se tornou um ponto importante de acesso para manejo de rejeito.

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

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

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

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

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 12/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |



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

Com o objetivo de expandir as análises e a área de estudo para uma região mais ampla impactada pelo EVENTO, além de abranger a região entre Mariana (MG) e Santa Cruz do Escalvado (MG), que apresenta influência das obras de movimentação de sedimento, buscou-se a implantação de novos pontos de monitoramento da qualidade do ar, por meio de estações fixas automáticas. Seguindo esta premissa de ampliação da área de estudo, além das estações de Barra Longa (Centro e Volta da Capela), Paracatu e Gesteira, foram instaladas mais três estações de monitoramento: estação Santana do Deserto (em abril de 2019), estação Rio Doce (em fevereiro de 2020) e estação Novo Soberbo (em novembro de 2020). Os pontos de monitoramento foram definidos avaliando a proximidade com os núcleos urbanos e comunidades onde houve maior deposição do sedimento e com maior intensidade de atividades realizadas pela Fundação Renova. Todos os equipamentos de monitoramento das estações utilizam método de referência (atenuação de raio beta) e permitem o acompanhamento ininterrupto das condições de qualidade do ar em Rio Doce (Centro e Santana do Deserto) e em Santa Cruz do Escalvado (Novo Soberbo) de forma adequada.

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

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

As análises químicas foram realizadas em amostras de PM₁₀ na região de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado coletadas em pontos receptores (amostras da qualidade do ar) e em materiais presentes nas fontes emissoras de material particulado. Como receptores foram caracterizadas as estações de qualidade do ar de Rio Doce, Santana do Deserto e de Novo Soberbo. Para representação das fontes emissoras, foram coletadas amostras de rejeito e solo natural não-afetado, bem como partículas depositadas nas superfícies das vias de tráfego



| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 13/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

(pavimentadas e não-pavimentadas) e partículas das áreas em obras. Para as análises químicas dos constituintes do PM₁₀, foi utilizada a técnica analítica: *Proton Induced X-Ray Emission* (PIXE).

O conhecimento sobre a composição química do PM₁₀ possibilita avanços nas discussões acerca da atribuição de responsabilidades quanto à origem do PM₁₀ que chega até os receptores de Rio Doce Centro (MG), Santana do Deserto (MG) e Novo Soberbo (*source apportionment*). Neste estudo, as análises de composição química de fontes emissoras e receptores, realizadas por PIXE, foram utilizadas para a definição dos perfis de especiação utilizados no modelo receptor *Chemical Mass Balance* (CMB), utilizado para o cálculo da contribuição das diferentes fontes para as concentrações de PM₁₀ medidas nas estações de qualidade do ar.

Ressalta-se que os resultados apresentados devem ser analisados considerando as limitações impostas pelos métodos utilizados. As principais fontes emissoras de PM₁₀ 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 emissoras, 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 em Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado (MG).



| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 14/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

2. Objetivos

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

São objetivos específicos:

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

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 15/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

3. Metodologia

3.1. Coleta e preparação de amostras

3.1.1. Amostras em fontes emissoras

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



Os materiais amostrados podem ser resumidos de forma geral em:

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

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

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

Para as amostras de fontes emissoras, foram utilizadas 2 campanhas, na qual o trabalho de coleta e obtenção de amostras foi dividido entre as seguintes datas: Campanha 7 - foi realizada no período de dia 15/04/2021 a 27/04/2021, e Campanha 8 - início em 02/08/2021 e término em 11/08/2021. Ao todo, foram coletadas 24 amostras, sendo 12 referentes à cada campanha. 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 e 3.2 apresentam as localidades onde foram coletadas as amostras durante as referidas campanhas.

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 16/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

3.1.2. Amostras em pontos receptores

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

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

Onde:

C_i : Concentração do elemento i no receptor avaliado.

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

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

Para os pontos receptores, foram coletadas 6 amostras na campanha 7 (02/11/2020 a 27/05/2021) e 6 amostras na campanha 8 (14/06/2021 a 11/08/2021), totalizando 12 amostras de receptores. A Tabela 3.1 expõe maiores informações sobre cada campanha, apresentando a quantidade de amostras e seus respectivos locais e datas de coleta. As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam as localidades onde foram coletadas as amostras durante as referidas campanhas.



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO
EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE
2021

Nº 1

PÁGINA
17/117

RTC220104

REV.
2

Tabela 3.1 – Amostras de PM₁₀ coletadas em materiais em fontes emissoras e em pontos receptores definidos pelas estações Rio Doce, Santana do Deserto e Novo Soberbo.

| CAMP. | CÓDIGO DA AMOSTRA | DESCRIÇÃO DA AMOSTRA | LOCAL | COORDENADAS (LATº; LONº) | TIPO | CATEGORIA | DATA | ANÁLISE |
|-------|-------------------|---|-------------------------|--------------------------|--------------|-----------|------------|---------|
| 7 | 11 | Via Pavimentada - Estação Novo Soberbo | Santa Cruz do Escalvado | -20,250423 -42,878848 | Sólido em pó | Fonte | 27/05/2021 | PIXE |
| 7 | 12 | Solo Intacto – Novo Soberbo | Santa Cruz do Escalvado | -20,250293; -42,874363 | Sólido em pó | Fonte | 27/05/2021 | PIXE |
| 7 | 13 | Via Não Pavimentada – Novo Soberbo | Santa Cruz do Escalvado | -20,249911; -42,876070 | Sólido em pó | Fonte | 27/05/2021 | PIXE |
| 7 | 14 | Via Pavimentada - Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,246102; -42,895759 | Sólido em pó | Fonte | 23/04/2021 | PIXE |
| 7 | 15 | Solo Intacto – Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,240767; -42,900774 | Sólido em pó | Fonte | 23/04/2021 | PIXE |
| 7 | 16 | Material Afetado – Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,238605; -42,884190 | Sólido em pó | Fonte | 23/04/2021 | PIXE |
| 7 | 17 | Via Não Pavimentada – Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,247818; -42,889042 | Sólido em pó | Fonte | 23/04/2021 | PIXE |
| 7 | 18 | Via Pavimentada - Estação S. do Deserto | Rio Doce | -20,197404; -42,834888 | Sólido em pó | Fonte | 15/04/2021 | PIXE |
| 7 | 19 | Solos e Vias – Fazenda Floresta | Rio Doce | -20,187662; -42,850586 | Sólido em pó | Fonte | 15/04/2021 | PIXE |
| 7 | 20 | Material Afetado – Fazenda Floresta | Rio Doce | -20,185434; -42,854841 | Sólido em pó | Fonte | 15/04/2021 | PIXE |
| 7 | 21 | Via Não Pavimentada – Estação S. Deserto | Rio Doce | -20,191786; -42,840252 | Sólido em pó | Fonte | 15/04/2021 | PIXE |
| 7 | 22 | Solo Intacto – Estação Santana do Deserto | Rio Doce | -20,198370; -42,832776 | Sólido em pó | Fonte | 15/04/2021 | PIXE |
| 8 | 11 | Via Pavimentada - Estação Novo Soberbo | Santa Cruz do Escalvado | -20,250423; -42,878848 | Sólido em pó | Fonte | 02/08/2021 | PIXE |
| 8 | 12 | Solo Intacto – Novo Soberbo | Santa Cruz do Escalvado | -20,250293; -42,874363 | Sólido em pó | Fonte | 02/08/2021 | PIXE |
| 8 | 13 | Via Pavimentada - Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,246102; -42,895759 | Sólido em pó | Fonte | 02/08/2021 | PIXE |
| 8 | 14 | Solo Intacto – Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,240767; -42,900774 | Sólido em pó | Fonte | 10/08/2021 | PIXE |



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO
EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE
2021

Nº 1

PÁGINA
18/117

RTC220104

REV.
2

| CAMP. | CÓDIGO DA AMOSTRA | DESCRIÇÃO DA AMOSTRA | LOCAL | COORDENADAS (LATº; LONº) | TIPO | CATEGORIA | DATA | ANÁLISE |
|-------|-------------------|---|----------|--------------------------|-----------------|-----------|-------------------------|---------|
| 8 | 15 | Material Afetado – Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,238605; -42,884190 | Sólido em pó | Fonte | 10/08/2021 | PIXE |
| 8 | 16 | Via Não Pavimentada – Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,247818; -42,889042 | Sólido em pó | Fonte | 10/08/2021 | PIXE |
| 8 | 17 | Via Pavimentada - Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,246102; -42,895759 | Sólido em pó | Fonte | 10/08/2021 | PIXE |
| 8 | 18 | Via Pavimentada - Estação S. do Deserto | Rio Doce | -20,197404; -42,834888 | Sólido em pó | Fonte | 10/08/2021 | PIXE |
| 8 | 19 | Solos e Vias – Fazenda Floresta | Rio Doce | -20.187662; -42.850586 | Sólido em pó | Fonte | 11/08/2021 | PIXE |
| 8 | 20 | Material Afetado – Fazenda Floresta | Rio Doce | -20.185434; -42.854841 | Sólido em pó | Fonte | 11/08/2021 | PIXE |
| 8 | 21 | Via Não Pavimentada – Estação S. Deserto | Rio Doce | -20,191786; -42,840252 | Sólido em pó | Fonte | 10/08/2021 | PIXE |
| 8 | 22 | Solo Intacto – Estação Santana do Deserto | Rio Doce | -20,198370; -42,832776 | Sólido em pó | Fonte | 10/08/2021 | PIXE |
| 7 | C34 | Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,246109; -42,895814 | Filtro de MCE | Receptor | 06/11/2020 a 23/04/2021 | PIXE |
| 7 | N34 | Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,246109; -42,895814 | Filtro de nylon | Receptor | 06/11/2020 a 23/04/2021 | PIXE |
| 8 | C42 | Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,246109; -42,895814 | Filtro de MCE | Receptor | 14/06/2021 a 11/08/2021 | PIXE |
| 8 | N42 | Estação Rio Doce | Rio Doce | -20,246109; -42,895814 | Filtro de nylon | Receptor | 14/06/2021 a 11/08/2021 | PIXE |
| 7 | C35 | Estação Santana do Deserto | Rio Doce | -20,198164; -42,834317 | Filtro de MCE | Receptor | 02/11/2020 a 15/04/2021 | PIXE |



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO
EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE
2021

Nº 1

PÁGINA
19/117

RTC220104

REV.
2

| CAMP. | CÓDIGO DA AMOSTRA | DESCRIÇÃO DA AMOSTRA | LOCAL | COORDENADAS (LATº; LONº) | TIPO | CATEGORIA | DATA | ANÁLISE |
|-------|-------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|-----------|-------------------------|---------|
| 7 | N35 | Estação Santana do Deserto | Rio Doce | -20,198164; -42,834317 | Filtro de nylon | Receptor | 02/11/2020 a 15/04/2021 | PIXE |
| 8 | C41 | Estação Santana do Deserto | Rio Doce | -20,198164; -42,834317 | Filtro de MCE | Receptor | 14/06/2021 a 11/08/2021 | PIXE |
| 8 | N41 | Estação Santana do Deserto | Rio Doce | -20,198164; -42,834317 | Filtro de nylon | Receptor | 14/06/2021 a 11/08/2021 | PIXE |
| 7 | C37 | Estação Novo Soberbo | Santa Cruz do Escalvado | -20,250345; -42,878843 | Filtro de MCE | Receptor | 19/03/2021 a 27/05/2021 | PIXE |
| 7 | N37 | Estação Novo Soberbo | Santa Cruz do Escalvado | -20,250345; -42,878843 | Filtro de nylon | Receptor | 19/03/2021 a 27/05/2021 | PIXE |
| 8 | C40 | Estação Novo Soberbo | Santa Cruz do Escalvado | -20,250345; -42,878843 | Filtro de MCE | Receptor | 14/06/2021 a 02/08/2021 | PIXE |
| 8 | N40 | Estação Novo Soberbo | Santa Cruz do Escalvado | -20,250345; -42,878843 | Filtro de nylon | Receptor | 14/06/2021 a 02/08/2021 | PIXE |



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021

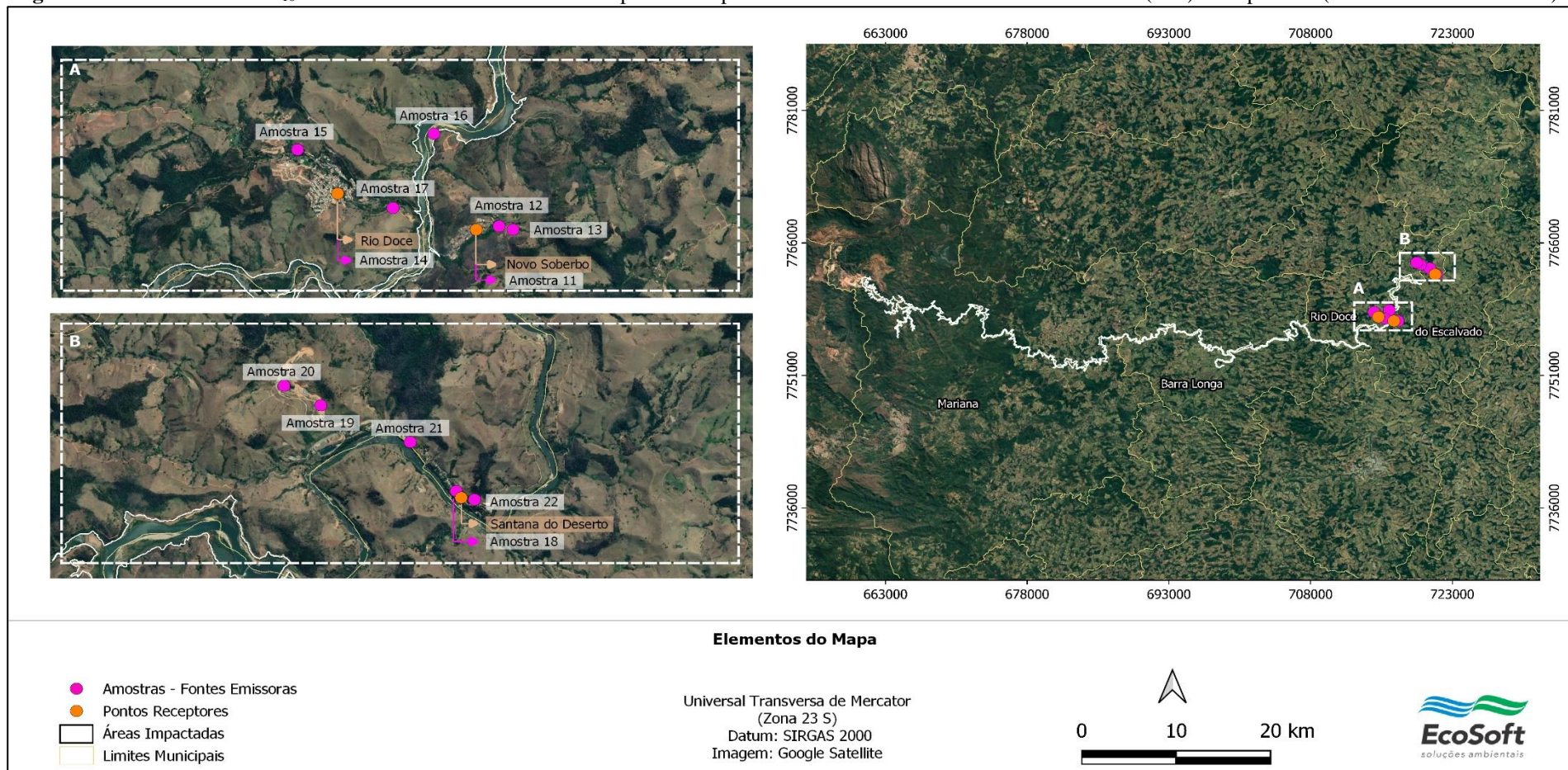
Nº 1

PÁGINA
20/117

RTC220104

REV.
2

Figura 3-1 – Amostras de PM₁₀ coletadas em fontes emissoras e em pontos receptores em Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado (MG). Campanha 7 (02/11/2020 a 27/05/2021)³.



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



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO
EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE
2021

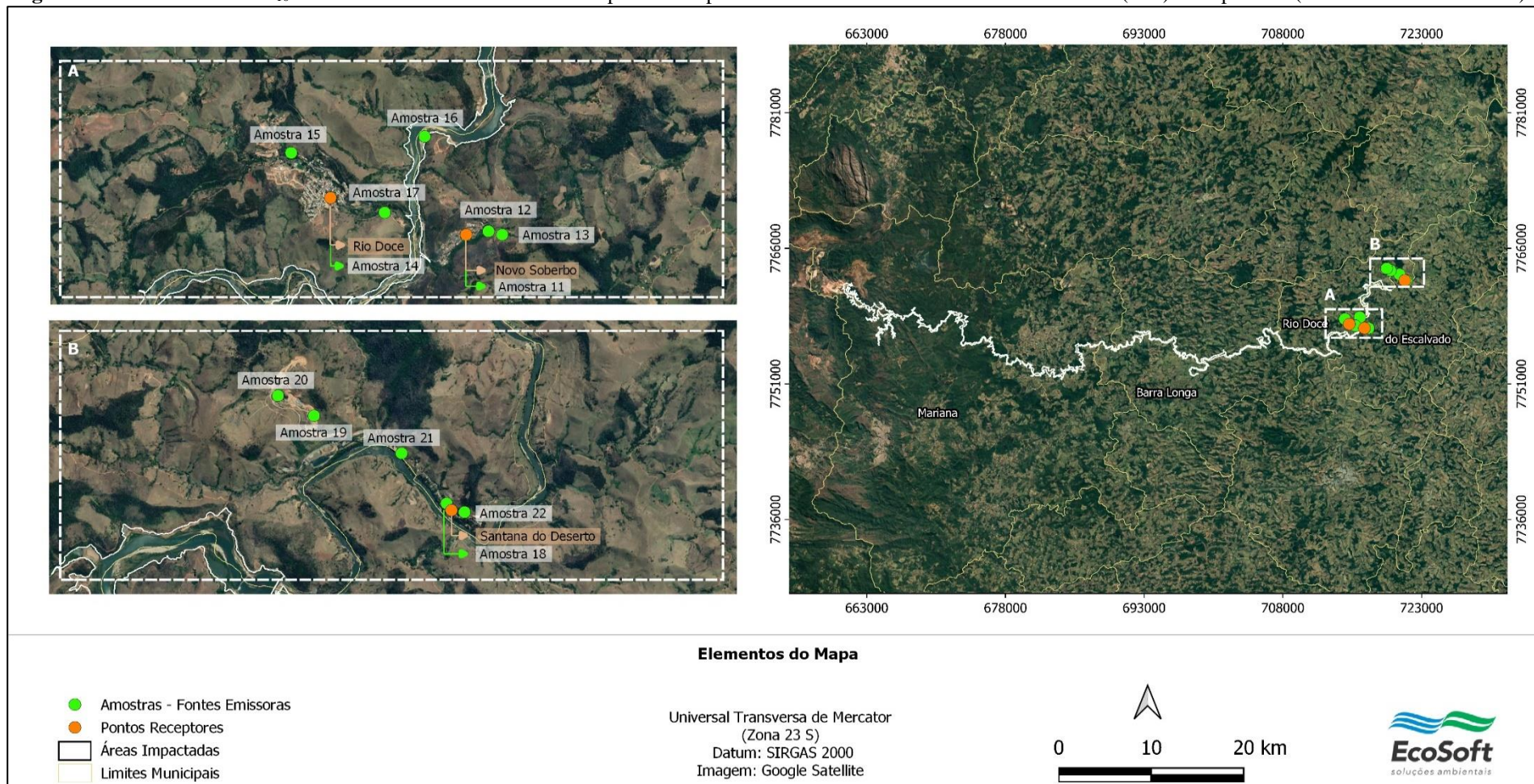
Nº 1

PÁGINA
21/117



RTC220104

REV.
2

Figura 3-2 – Amostras de PM₁₀ coletadas em fontes emissoras e em pontos receptores em Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado (MG). Campanha 8 (14/06/2021 a 11/08/2021)⁴.



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

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 22/117 |
| | RTC220104 | | REV. 1 |

3.2. Análises químicas

3.2.1. Métodos analíticos

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

3.2.2. Análises de dados



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

4. Caracterização das localidades analisadas

O centro do município de Rio Doce (MG), situado a aproximadamente 90 km de Mariana, foi um dos núcleos urbanos afetados pelo rompimento da Barragem de Fundão, bem como o distrito de Santana do Deserto, localizado a 106 km de Mariana e 10 km do centro de Rio Doce. O centro urbano da cidade de Santa Cruz do Escalvado não foi diretamente afetado pelo rejeito ocasionado pelo EVENTO, contudo a cidade possui limite e fornece acesso para a recuperação do leito do rio Doce, sendo, portanto, afetada pelas obras de remoção de rejeitos e pelo fluxo intenso de veículos ocasionado pela rotina de recuperação.

Na área urbana de Rio Doce e beira rio em Santa Cruz do Escalvado foram realizadas diferentes atividades para remoção, transporte e destinação do material sedimentado nas regiões, além de obras de construção civil. Tais ações foram desenvolvidas com o objetivo de recuperar as áreas afetadas principalmente, visando também a recuperação da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (Candonga), propiciando, entretanto, uma modificação da dinâmica das regiões, ocasionando na geração de material particulado proveniente do aumento do fluxo de veículos e decorrente das frentes de trabalho com movimentação de materiais (ECOSOFT, 2017).

As atividades de recuperação realizadas na área da região de Rio Doce (MG) e Santa Cruz do Escalvado (MG) foram mais intensas em anos anteriores, contudo, ainda foram

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 23/117 |
| | RTC220104 | | REV. 1 |

percebidas atividades responsáveis pela alteração da dinâmica do cotidiano das localidades, principalmente aquelas relacionadas ao tráfego de veículos prestando serviço para a FUNDAÇÃO, à operação de máquinas e equipamentos e à movimentação de materiais.

Para prover informações contínuas sobre as condições de qualidade do ar na região, a FUNDAÇÃO mantém três estações automáticas de monitoramento: Estações Rio Doce Centro, Santana do Deserto e Novo Soberbo. Todas as três estações são equipadas com analisadores de concentrações de partículas da marca MET ONE, modelos BAM 1022 e E-BAM plus, analisadores que utilizam atenuação de raios beta como princípio de medição e monitoram continuamente as médias horárias de PTS, PM₁₀ e PM_{2.5}.

Embora o plano completo das campanhas de monitoramento de análises químicas se concentre no período de agosto de 2018 a agosto de 2021, as estações de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado somente tiveram início do monitoramento de qualidade do ar a partir de abril de 2019 e novembro de 2020, respectivamente. Sendo assim, a evolução das concentrações de partículas nas estações, assim como as médias diárias e mensais, medidas no período de novembro de 2019 a agosto de 2021 é apresentada na Figura 4.1. 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, 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).



| | | | |
|---|---|------------------------|---------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 24/117 |
| | | RTC220104 | REV. 1 |

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

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

Notas:



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

O monitoramento das três frações de material particulado não foi simultâneo, onde o monitoramento de PM₁₀ iniciou-se em Santana do Deserto em abril/2019, em Rio Doce em fevereiro/2020 e em Novo Soberbo em novembro/2020, ao passo que o monitoramento de PM_{2,5} iniciou-se em Santana do Deserto e Rio Doce em março/2020 e em Novo Soberbo em dezembro/2020.

Notou-se um aumento das concentrações de PM₁₀ nos períodos mais secos, entre junho e agosto, nas três estações monitoradas com ambas concentrações atingindo seu pico no mês de setembro. Em seguida, é possível verificar uma redução entre os meses de novembro a dezembro, início do período chuvoso.

As concentrações de MP na Estação Rio Doce são ligeiramente mais elevadas do que nas demais estações quando se leva em consideração a média de todo o período, contudo, quando são comparadas aos padrões instituídos pela Resolução CONAMA 491/2018, não ultrapassam dos limites vigentes estabelecidos pela legislação.

Estas variações de concentrações não podem ser atribuídas isoladamente às fontes emissoras e atividades antropogênicas em Rio Doce e em Santa Cruz do Escalvado. Como citado anteriormente, os fatores meteorológicos, principalmente ocorrência de chuvas, podem contribuir significativamente para a redução das concentrações de partículas. De acordo com padrão sazonal da região os meses de verão (janeiro a março) são mais chuvosos (INMET, 2019).

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 25/117 |
| | RTC220104 | | REV. 1 |

Embora ainda ocorram as ações de recuperação promovidas pela FUNDAÇÃO, os limites de concentrações definidos pelos padrões vigentes de qualidade do ar foram plenamente atendidos (100% do tempo) (Figura 4.1).

O padrão final (PF) de PM₁₀, estabelecido pela Resolução CONAMA 491/2018, é idêntico aos limites definidos pelos *Air Quality Guidelines* da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2000), sinalizando uma intenção do CONAMA em promover uma maior proteção à saúde da população brasileira, igualando aos limites internacionalmente praticados por países em estágio de desenvolvimento mais avançado, contudo, o mesmo ainda não é vigente em território nacional.



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO
RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021

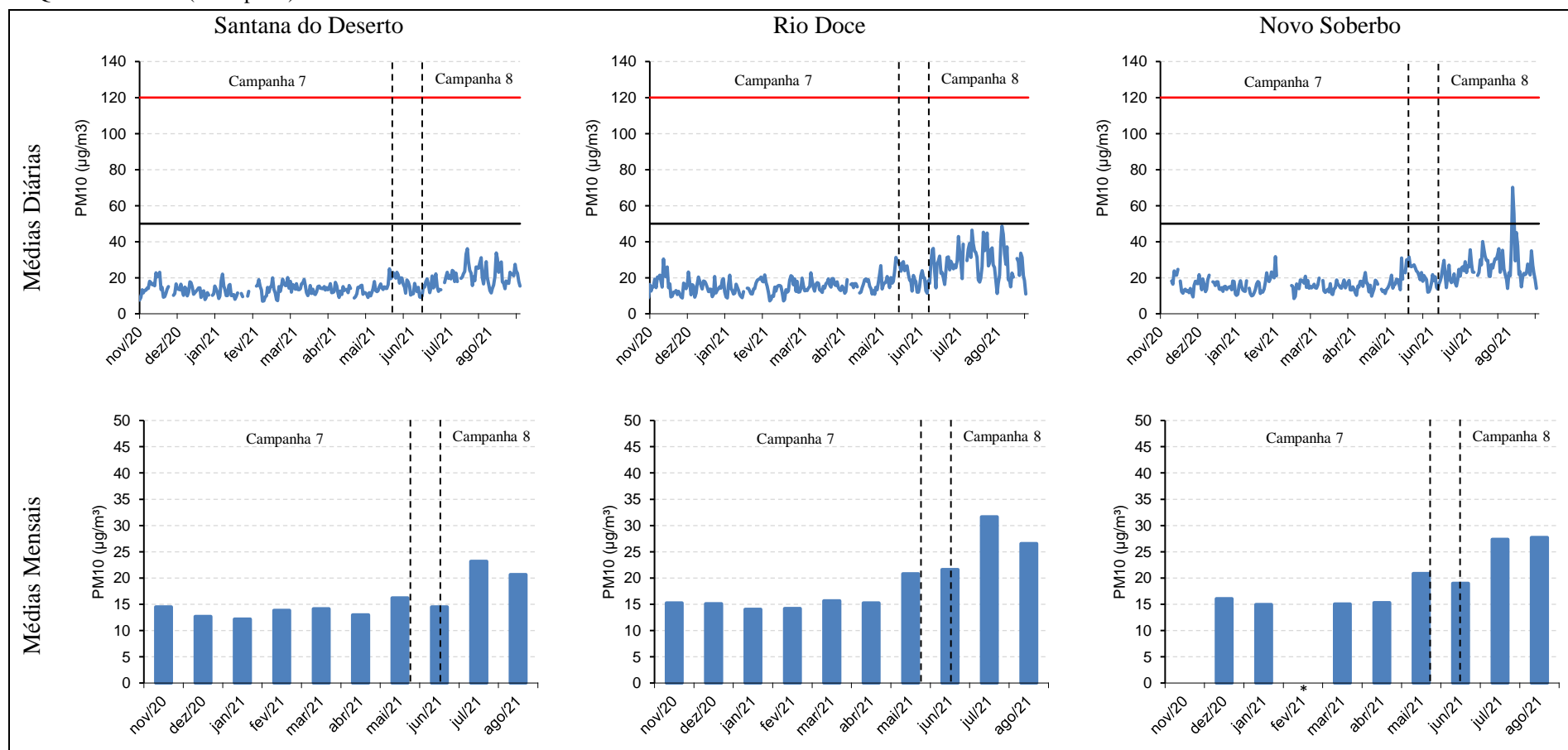
Nº 1



PÁGINA
26/117

RTC220104

REV.
1

Figura 4-1 . Concentrações de MP10 medidas em Santana do Deserto, Rio Doce e Novo Soberbo. PI-1: Padrão de qualidade do ar intermediário 1 (linha vermelha), Padrão Final de Qualidade do Ar (linha preta) CONAMA 491/2018.



| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 27/117 |
| | RTC220104 | | REV. 1 |

5. Análises químicas pelo método PIXE

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

Os resultados para as amostras de fontes emissoras e pontos receptores coletados durante a campanha 7 são apresentados nas Tabelas A.1, A.3 e A.4 do Apêndice A, respectivamente. E, os resultados referentes a campanha 8 estão dispostos nas Tabelas A.2, A.3 e A.4 do Apêndice A.



Na Campanha 7 foi detectada uma média de 18 elementos para as amostras coletadas. Os elementos químicos mais abundantes identificados nas amostras foram o silício, o alumínio, e o ferro como pode ser observado na Figura 5.1. Outros elementos identificados, em menor quantidade, foram: Cálcio, Manganês, Potássio, Magnésio, Titânio, Enxofre, Cobalto, Zircônio, Cloro, Zinco, Estrôncio, Rubídio, Cobre, Níquel, Arsênio e Gálio.

A amostra de solo intacto de Novo Soberbo apresentou o maior teor de Si (26,17%) e a menor concentração na amostra de material afetado de Fazenda Floresta (20,05%). O teor de silício nas amostras de vias pavimentadas e não pavimentadas variou de 21,06% a 23,61%.

O alumínio foi detectado em maior abundância na amostra de solo de Santana do Deserto (19,42%). Por outro lado, a menor quantidade de alumínio foi detectada na amostra de via pavimentada de Novo Soberbo (12,72%). As amostras de vias pavimentadas e não pavimentadas apresentaram teores de alumínio entre 12,72% e 16,79%.

A amostra de via pavimentada de Novo Soberbo apresentou o maior teor de ferro (11,39%), enquanto a menor concentração foi registrada na amostra de solo intacto de Santana do Deserto (6,36%).

Por fim, na Campanha 8 foi detectada uma média de 20 elementos para as amostras coletadas. Os elementos químicos mais abundantes identificados nas amostras também foram o silício, alumínio e o ferro, como pode ser observado na Figura 5.2. Outros elementos

| | | | |
|--|---|------------------------|--|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | PÁGINA 28/117 | |
| | RTC220104 | REV. 1 | |

identificados, em menor quantidade, foram: Cálcio, Potássio, Magnésio, Titânio, Sódio, Manganês, Fósforo, Enxofre, Cloro, Zircônio, Zinco, Cromo, Estrôncio e Itrio.

Para o elemento silício, a maior quantidade foi observada na amostra de via não pavimentada de Novo Soberbo (25,07%), enquanto a amostra de material afetado de Fazenda Floresta apresentou o menor teor do elemento (19,50%).

Para o alumínio, a amostra de material afetado de Rio Doce apresentou o maior percentual do elemento (19,29%), enquanto a amostra de solo de Novo Soberbo apresentou o menor percentual (13,59%).

Nesta campanha, o elemento ferro apresentou maiores concentrações nas amostras de vias pavimentadas de Novo Soberbo (11,04%), seguido da amostra de material afetado de Fazenda Floresta (10,45%) e teve seu menor percentual ocorrendo no solo de Novo Soberbo (6,53%).

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

Tabela 5.1 – Concentrações em ordem decrescente dos elementos ferro, silício e alumínio nas amostras de fontes emissoras durante as Campanhas 7 e 8 localizadas em Rio Doce/MG e Santa Cruz do Escalvado/MG.

| CAMPANHA | | PERÍODO | SILÍCIO | | ALUMÍNIO | | FERRO | |
|----------|-------------------------------|---------|--------------------------|--------|----------------------|--------|------------------|--|
| 7 | 15/04/2021 a 27/04/2021 | SI NS | 26,169% | SI SD | 19,417% | VP NS | 11,388% | |
| | | VNP RD | 23,609% | SV FF | 18,478% | SI RD | 10,565% | |
| | | VNP NS | 23,608% | MA FF | 18,368% | SV FF | 10,546% | |
| | | SI SD | 23,398% | MA RD | 18,149% | MA RD | 10,395% | |
| | | SV FF | 22,835% | SI RD | 17,798% | VNP RD | 10,132% | |
| | | MA RD | 22,170% | VNP RD | 16,791% | VP RD | 10,059% | |
| | | VNP SD | 22,071% | VP RD | 16,125% | MA FF | 9,310% | |
| | | VP SD | 21,775% | VP SD | 15,825% | VNP SD | 8,736% | |
| | | VP RD | 21,199% | SI NS | 14,776% | VP SD | 8,387% | |
| | | VP NS | 21,065% | VNP NS | 14,337% | SI NS | 7,718% | |
| | | SI RD | 20,939% | VNP SD | 13,843% | VNP NS | 7,337% | |
| | | MA FF | 20,049% | VP NS | 12,719% | SI SD | 6,361% | |
| 8 | 02/08/2021 a 11/08/2021 | VNP NS | 25,075% | MA RD | 19,295% | VP NS | 11,040% | |
| | | VNP SD | 24,792% | SI RD | 19,013% | MA FF | 10,454% | |
| | | SI NS | 24,625% | SV FF | 17,555% | MA RD | 10,153% | |
| | | VNP RD | 24,178% | MA FF | 16,356% | VP SD | 9,990% | |
| | | VP RD | 24,046% | VP RD | 15,994% | SI RD | 9,686% | |
| | | VP NS | 23,709% | VP NS | 15,374% | VP RD | 9,672% | |
| | | SI SD | 23,638% | VP SD | 14,403% | VNP RD | 9,636% | |
| | | MA RD | 22,546% | VNP NS | 14,199% | SV FF | 9,564% | |
| | | VP SD | 22,331% | VNP SD | 13,891% | SI SD | 8,452% | |
| | | SI RD | 21,774% | VNP RD | 13,646% | VNP SD | 8,344% | |
| | | SV FF | 20,566% | SI SD | 13,612% | VNP NS | 7,065% | |
| | | MA FF | 19,497% | SI NS | 13,588% | SI NS | 6,530% | |
| Nota: | VP: Via Pavimentada | | VNP: Via Não Pavimentada | | MA: Material Afetado | | SV: Solos e Vias | |
| | SI: Solo Intacto | | SD: Santana do Deserto | | RD: Rio Doce | | NS: Novo Soberbo | |



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021

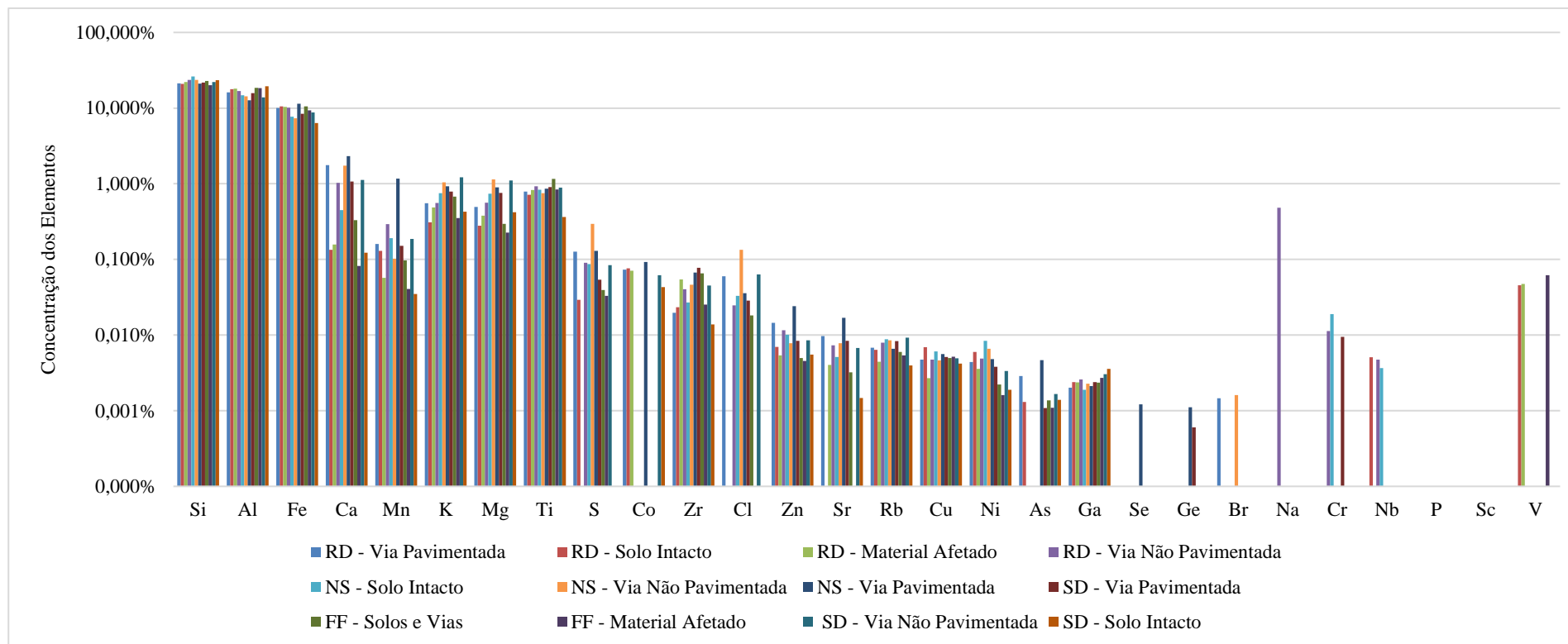
Nº 1

PÁGINA
29/117

RTC220104

REV.
2

Figura 5-1 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 7 (15/04/2021 a 27/04/2021).



Nota: RD: Rio Doce

FF: Fazenda Floresta

SD: Santana do Deserto

NS: Novo Soberbo



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO
EM BARRA LONGA E GESTEIRA -NOVEMBRO DE 2020 A
AGOSTO DE 2021

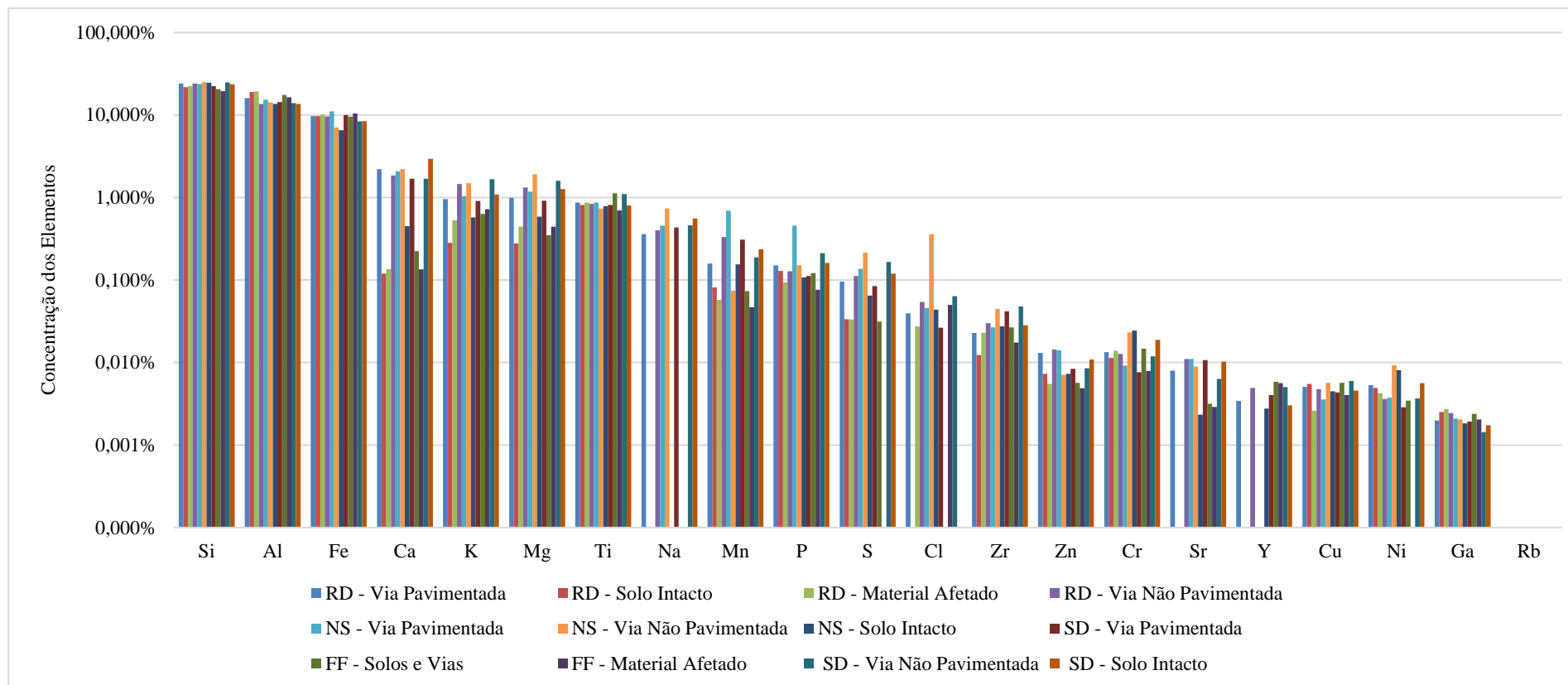
Nº 1

PÁGINA
30/117

RTC220104

REV.
1

Figura 5-2 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em fontes emissoras – Campanha 8 (02/08/2021 a 11/08/2021).





Nota: RD: Rio Doce

FF: Fazenda Floresta

SD: Santana do Deserto

NS: Novo Soberbo

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 31/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

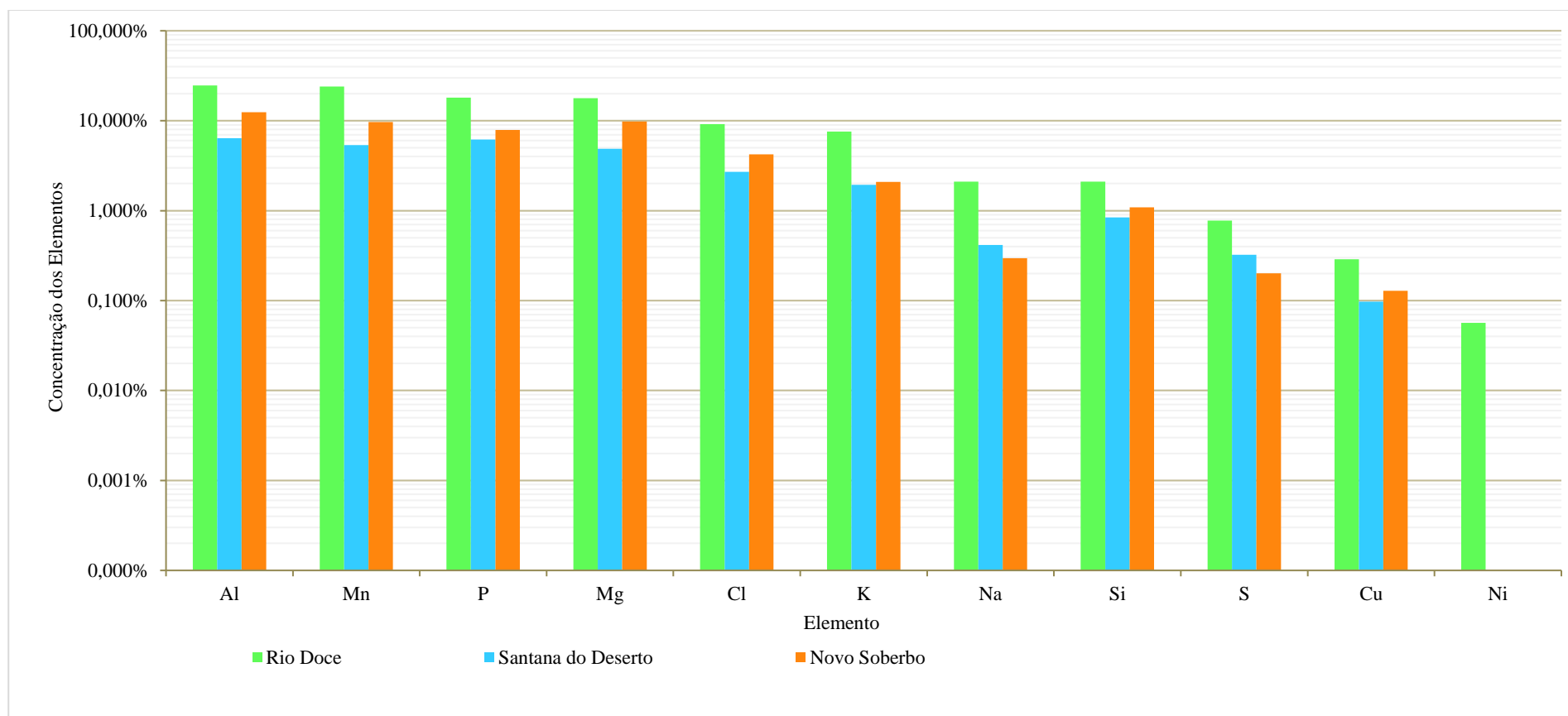
Em relação às amostras de PM₁₀ coletadas em filtros de Nylon e MCE nas Estações Rio Doce, Santana do Deserto e Novo Soberbo nas duas campanhas (7 e 8), o alumínio (Al), o manganês (Mg), o fósforo (P), o magnésio (Mg), o cloro (Cl), o potássio (K) e o sódio (Na) foram os elementos mais abundantes observados em todas as amostras (Figuras de 5.3 a 5.6).

Além desses elementos, também foram identificados, com menor representatividade, os seguintes elementos: Si, S, Cu, Ni, C, Ti, Fe, Z, As, Se, Br, Sr.

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

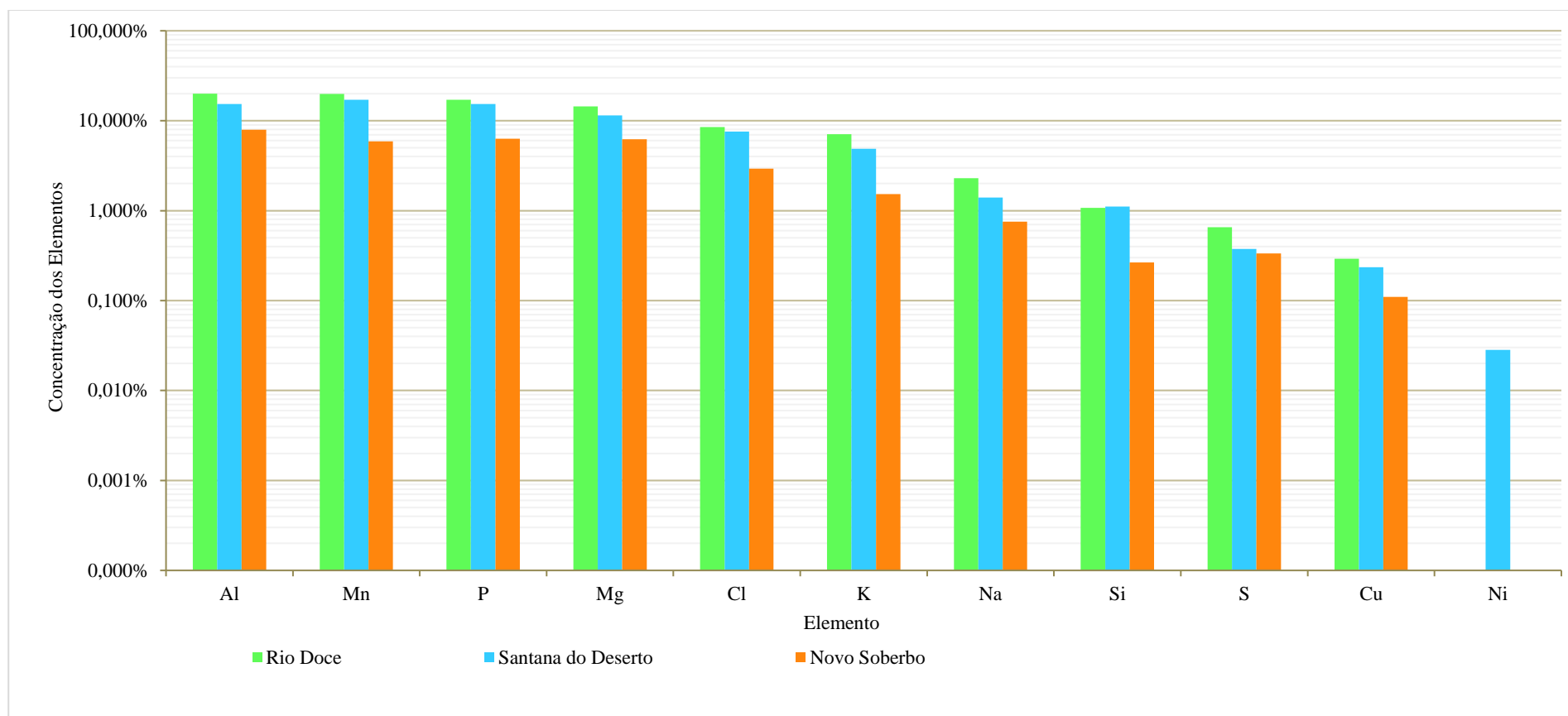
| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 32/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

Figura 5-3 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros de nylon – Campanha 7 (02/11/2020 a 27/05/2021).



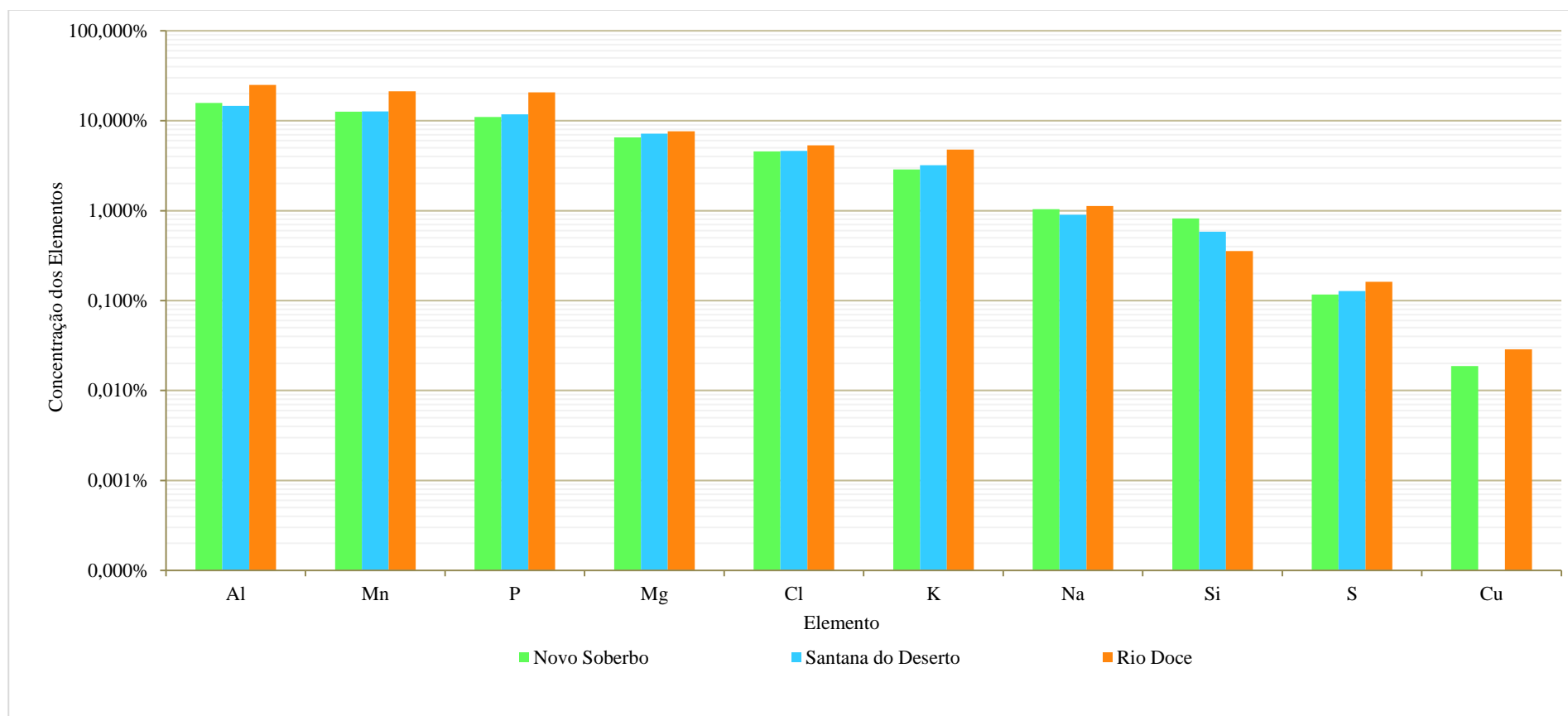
| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 33/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

Figura 5-4 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros MCE – Campanha 7 (02/11/2020 a 27/05/2021).



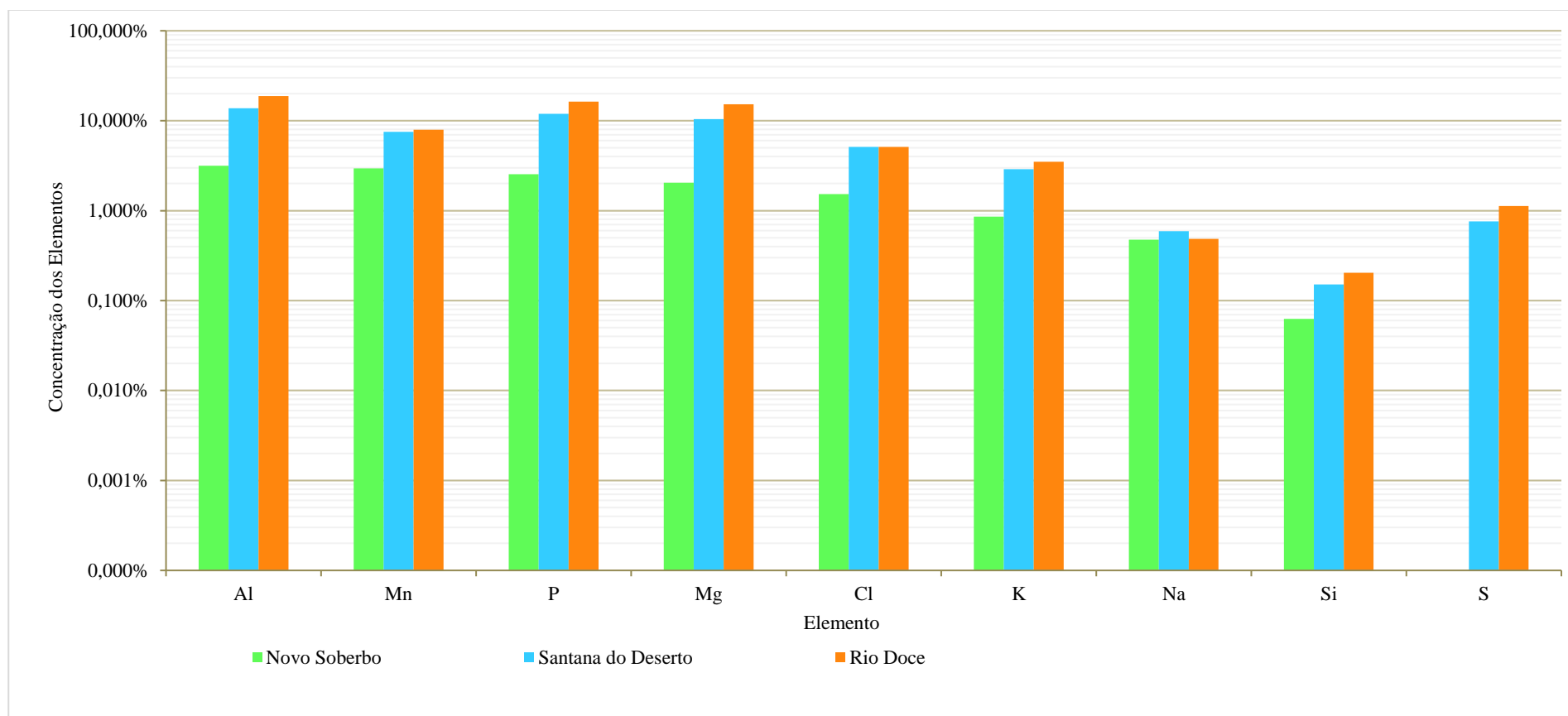
| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 34/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |



Figura 5-5 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros de nylon – Campanha 8 (14/06/2021 a 11/08/2021).



| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 35/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

Figura 5-6 – Concentração dos principais elementos químicos detectados pelo PIXE – Amostras em pontos receptores com filtros MCE – Campanha 8 (14/06/2021 a 11/08/2021).



| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 36/117 |
| | | RTC210104 | REV. 2 |

6. Modelagem CMB

6.1. Descrição do modelo CMB

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



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

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

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

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

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

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 37/117 |
| | | RTC210104 | 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), ou seja, não consegue diferenciar perfis químicos de fontes emissoras que são colineares.

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

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 38/117 |
| | | RTC210104 | REV. 2 |

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

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

Sendo:

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

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

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

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

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



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

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

Onde:

C_i : concentração no ambiente da espécie i ;

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

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 39/117 |
| | RTC210104 | | 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 nas localidades.

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 foi aplicado 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 Rio Doce (MG) e Santa Cruz do Escalvado (MG). Para uma aplicação mais ampla do CMB, seria necessário identificar e caracterizar quimicamente todas as demais fontes emissoras significativas de partículas existentes em Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado e nos seus arredores, o que não seria de execução viável no presente trabalho contratado.

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

Fontes Emissoras

No presente estudo, foram consideradas as amostras de fontes emissoras referentes as campanhas 7 e 8, períodos nos quais houve o monitoramento de qualidade do ar na região dos pontos receptores.

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 40/117 |
| | RTC210104 | | REV. 2 |



Tendo em vista a grande similaridade existente entre todos os perfis químicos para as diferentes tipologias de fontes, optou-se pela adoção de 1 grupo representante dos tipos de fontes similares, ao invés de trabalhar com cada perfil químico de forma isolada. Essa abordagem é necessária em função da colinearidade entre os perfis das fontes emissoras, uma vez que o modelo CMB não é capaz de diferenciar fontes com assinatura química muito similares entre si.

Analizando os perfis químicos das amostras de fontes de Santa Cruz do Escalvado (MG) (via pavimentada, via não pavimentada, solo e material afetado), observa-se grande similaridade nas concentrações da maioria dos elementos químicos presentes nas amostras, em especial entre os elementos predominantes, que foram o silício, o alumínio e o ferro. Esse comportamento é reflexo da interação entre as fontes, em que através da ação do vento e pelo transporte de sedimento pela ação da chuva, partículas de diversas fontes podem estar se depositando em localidades diferentes daquelas nas quais essas partículas foram geradas. Além disso, junto da ação das variáveis meteorológicas, a dinâmica de tráfego no local e as intervenções/obras realizadas pela FUNDAÇÃO e Samarco na região (movimentação/remoção de solo e outros materiais), também podem contribuir para que os perfis químicos apresentem características semelhantes entre si.

Os perfis químicos das amostras de fontes da localidade de Rio Doce (via pavimentada, via não pavimentada e solo) também apresentaram muita semelhança, indicando que todos as amostras possuem a mesma composição, sendo, portanto, colineares.

Desta forma, os perfis de fontes de Santa Cruz do Escalvado foram agrupados em um perfil médio de similaridade (Novo Soberbo) enquanto os perfis de fontes de Rio Doce foram agrupados em outros dois perfis médios (Rio Doce e Santana do Deserto).

Ademais, em virtude da similaridade presente também entre as campanhas, a composição dos perfis médios foi obtida considerando a média entre as amostras das campanhas 7 e 8 (Tabela 6.1). As amostras de rejeito coletadas na Barragem de Fundão não foram consideradas no CMB, mas apenas utilizadas neste estudo para compreender as características do solo afetado pelo rejeito proveniente da barragem.

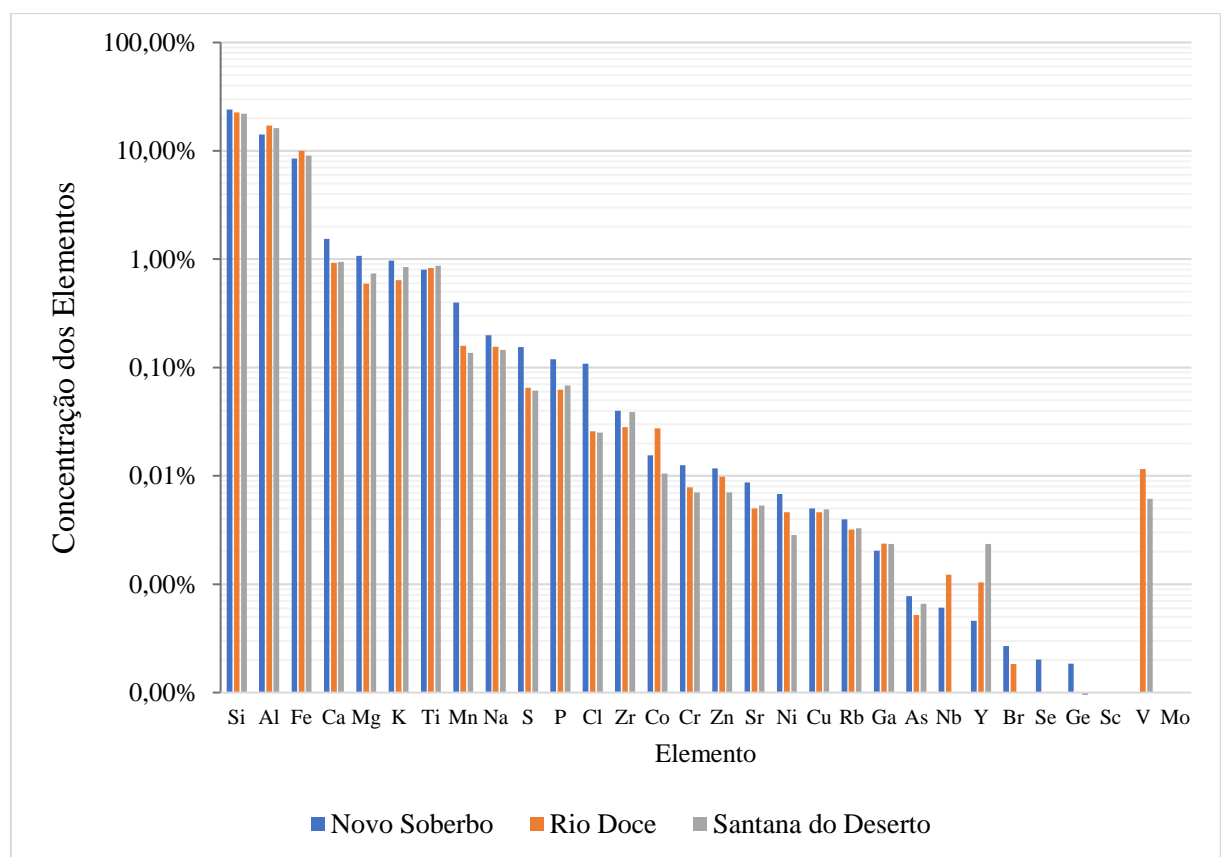
| | | | |
|--|---|------------------------|--|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | PÁGINA 41/117 | |
| | RTC210104 | REV. 2 | |

Pontos receptores

Foi utilizada a média entre os perfis químicos de PM₁₀ coletados em filtros de Nylon e MCE nos pontos receptores amostrados (Estações Rio Doce, Santana do Deserto e Novo Soberbo), apresentados na Tabela 6.2.

A Figura 6.1 apresenta um gráfico comparativo dos perfis químicos das amostras coletadas nas fontes emissoras de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, descritas acima e apresentadas na Tabela 6.1.

Figura 6-1 – Perfis médios dos elementos químicos detectados pelo método PIXE nas amostras coletadas em fontes emissoras das Campanhas 7 e 8 nas localidades em Rio Doce (MG) (Centro e Santana do Deserto) e Santa Cruz do Escalvado (MG) (Novo Soberbo).





| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 42/117 |
| | | RTC210104 | REV. 2 |

Tabela 6.1 – Composição química e incerteza do perfil médio das amostras de PM₁₀ em fontes emissoras avaliadas na modelagem CMB.

| ELEMENTO | Agrupamento médio das fontes de Rio Doce | | Agrupamento médio das fontes de Novo Soberbo | | Agrupamento médio das fontes de Santana do Deserto | |
|----------|--|---------------------|--|---------------------|--|---------------------|
| | M [%] ^a | IC [%] ^b | M [%] ^a | IC [%] ^b | M [%] ^a | IC [%] ^b |
| Si | 22,558 | 1,264 | 24,042 | 1,737 | 22,095 | 1,678 |
| Al | 17,101 | 1,862 | 14,166 | 0,926 | 16,175 | 2,187 |
| Fe | 10,037 | 0,348 | 8,513 | 2,131 | 9,014 | 1,249 |
| Ca | 0,924 | 0,901 | 1,538 | 0,865 | 0,941 | 0,951 |
| Ti | 0,831 | 0,063 | 1,075 | 0,470 | 0,869 | 0,235 |
| K | 0,642 | 0,389 | 0,971 | 0,312 | 0,848 | 0,393 |
| Mg | 0,594 | 0,373 | 0,804 | 0,057 | 0,737 | 0,468 |
| Na | 0,156 | 0,217 | 0,397 | 0,441 | 0,145 | 0,236 |
| Mn | 0,159 | 0,104 | 0,199 | 0,320 | 0,136 | 0,093 |
| P | 0,063 | 0,069 | 0,155 | 0,086 | 0,068 | 0,080 |
| S | 0,065 | 0,047 | 0,120 | 0,178 | 0,061 | 0,053 |
| Zr | 0,028 | 0,013 | 0,108 | 0,128 | 0,039 | 0,021 |
| Cl | 0,026 | 0,024 | 0,040 | 0,016 | 0,025 | 0,026 |
| Co | 0,027 | 0,038 | 0,015 | 0,038 | 0,011 | 0,023 |
| Cr | 0,008 | 0,007 | 0,013 | 0,011 | 0,007 | 0,007 |
| Zn | 0,010 | 0,004 | 0,012 | 0,007 | 0,007 | 0,002 |
| V | 0,012 | 0,021 | 0,009 | 0,005 | 0,006 | 0,019 |
| Sr | 0,005 | 0,005 | 0,007 | 0,002 | 0,005 | 0,004 |
| Cu | 0,005 | 0,001 | 0,005 | 0,001 | 0,005 | 0,001 |
| Rb | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,004 |
| Ni | 0,005 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,003 | 0,002 |
| Ga | 0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,004 | 0,002 | 0,001 |
| Y | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,003 |
| As | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Pb | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,002 |

Nota:

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





| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 43/117 |
| | RTC210104 | | REV. 1 |

Tabela 6.2 – Composição química média e incerteza entre as amostras de PM₁₀ no ponto receptor avaliado na modelagem CMB – Campanhas 7 e 8 – Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado.

| ELEMENTO | Campanha 7 | | | | | | Campanha 8 | | | | | |
|----------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | RIO DOCE | | SANTANA DO DESERTO | | NOVO SOBERBO | | RIO DOCE | | SANTANA DO DESERTO | | NOVO SOBERBO | |
| | M [%] ^a | IC [%] ^b | M [%] ^a | M [%] ^a | IC [%] ^b | M [%] ^a | M [%] ^a | IC [%] ^b | M [%] ^a | IC [%] ^b | M [%] ^a | IC [%] ^b |
| Na | 1,289 | 0,331 | 1,277 | 0,308 | 1,819 | 0,038 | 1,616 | 0,805 | 2,412 | 1,308 | 1,233 | 0,123 |
| Mg | 0,457 | 0,082 | 0,371 | 0,027 | 0,584 | 0,059 | 0,624 | 0,251 | 0,559 | 0,196 | 0,476 | 0,048 |
| Al | 3,303 | 0,111 | 2,612 | 0,816 | 5,041 | 0,830 | 10,012 | 2,249 | 8,458 | 3,596 | 5,769 | 0,577 |
| Si | 4,583 | 0,142 | 3,475 | 1,135 | 6,404 | 1,002 | 11,619 | 2,475 | 9,746 | 4,153 | 7,256 | 0,726 |
| P | 0,320 | 0,113 | 0,242 | 0,096 | 0,180 | 0,015 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| S | 3,562 | 0,308 | 3,317 | 1,265 | 4,331 | 0,026 | 4,163 | 1,827 | 4,911 | 2,478 | 2,817 | 0,282 |
| Cl | 0,079 | 0,014 | 0,007 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,059 | 0,058 | 0,177 | 0,069 | 0,233 | 0,023 |
| K | 1,819 | 0,117 | 1,621 | 0,693 | 2,256 | 0,225 | 2,871 | 1,080 | 3,422 | 1,791 | 2,089 | 0,209 |
| Ca | 1,443 | 0,076 | 0,983 | 0,381 | 0,945 | 0,171 | 2,004 | 0,286 | 1,845 | 0,647 | 1,217 | 0,122 |
| Ti | 0,241 | 0,185 | 0,156 | 0,165 | 0,256 | 0,133 | 0,717 | 0,058 | 0,530 | 0,490 | 0,524 | 0,052 |
| Mn | 0,128 | 0,019 | 0,077 | 0,029 | 0,056 | 0,080 | 0,152 | 0,019 | 0,143 | 0,062 | 0,112 | 0,011 |
| Fe | 4,486 | 0,073 | 3,491 | 1,760 | 4,870 | 0,968 | 9,451 | 1,813 | 7,488 | 2,817 | 5,058 | 0,506 |
| Cu | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,009 | 0,001 |
| Zn | 0,004 | 0,006 | 0,053 | 0,018 | 0,076 | 0,004 | 0,006 | 0,008 | 0,099 | 0,056 | 0,054 | 0,005 |

Nota:

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

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 44/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |



A Tabela 6.3 apresenta os resultados da modelagem CMB, contendo as contribuições de PM₁₀ para os pontos receptores analisados em Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado. 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

| PONTO RECEPTOR | CAMPANHA | CONTRIBUIÇÃO [%] PERFIL MÉDIO C7 E C8 |
|--------------------|----------|--|
| Rio Doce | 7 | 42,25% |
| | 8 | 83,48% |
| Santana do Deserto | 7 | 18,63% |
| | 8 | 60,24% |
| Novo Soberbo | 7 | 33,55% |
| | 8 | 41,49% |

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 Rio Doce e em Santa Cruz do Escalvado que contribuem para concentração de PM₁₀ que não estão relacionadas às ações da FUNDAÇÃO e não foram mapeadas, sendo representadas a seguir, 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 (PM₁₀) e, assim, possui maior tempo de residência na atmosfera.

Além disso, nos atuais níveis de concentração de PM₁₀ na região, apenas a análise elementar pode não estar sendo suficiente para a caracterização química do receptor, uma vez que a massa das amostras que é representada por essa análise é em grande parte inferior a 43% (exceto na Campanha 8). Adicionalmente, partículas finas, como é o caso do PM₁₀, podem ter a participação de aerossóis secundários – aqueles formados na atmosfera, como os nitratos e sulfatos, por exemplo – que não são contemplados pela análise elementar. Portanto, os resultados do CMB apresentados devem ser avaliados a luz das limitações inerentes à técnica de modelagem receptora e das limitações relacionadas ao escopo contratual (que prevê apenas análise química elementar).

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 45/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

Nas Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 são apresentadas as concentrações de PM₁₀ observadas nos respectivos períodos de análise, bem como as contribuições de material particulado (percentual e concentração⁵) das fontes emissoras resultantes do modelo CMB referentes aos pontos receptores Estações de Monitoramento da Qualidade do ar Rio Doce Centro, Santana do Deserto e Novo Soberbo, respectivamente.



Analizando os gráficos referentes a campanha 7 em Rio Doce (Figura 6.2), Santana do Deserto (Figura 6.3) e em Novo Soberbo (Figura 6.4) observa-se que as maiores concentrações médias de 24h de PM₁₀ foram de 40, 35 e 32 µg/m³, o que representa cerca de 33, 29 e 26% do limite estabelecido na Resolução CONAMA nº 491/2018, respectivamente para cada ponto receptor. Enquanto isso, as menores concentrações de 24h de PM₁₀ foram de 7, 7 e 8 µg/m³ para em Rio Doce, Santana do Deserto e em Novo Soberbo, nessa ordem.

Para a campanha 8 em Rio Doce (Figura 6.2), Santana do Deserto (Figura 6.3) e em Novo Soberbo (Figura 6.4) observa-se que as maiores concentrações médias de 24h de PM₁₀ foram de 49, 36 e 70 µg/m³, o que representa cerca de 41, 30 e 58% do limite estabelecido na Resolução CONAMA nº 491/2018, respectivamente para cada ponto receptor. Enquanto isso, as menores concentrações de 24h de PM₁₀ foram de 11, 9 e 14 µg/m³ para em Rio Doce, Santana do Deserto e em Novo Soberbo, nessa ordem.

Os resultados do modelo CMB indicaram que o grupo médio de fontes teve uma contribuição crescente nas concentrações de PM₁₀ com o passar das campanhas, saindo de 42,25% de contribuição na campanha 7 e alcançando 83,48% de contribuição na campanha 8 para o receptor de Rio Doce, de 18,63% para 60,24% em Santana do Deserto e de 33,55% para 41,49% em Novo Soberbo, ou seja, ao longo das campanhas realizadas, observou-se um aumento gradual nas contribuições dos grupos de fontes ao longo da campanha 7 para campanha 8, sugerindo que este aumento pode estar relacionado também ao aumento gradual das concentrações de MP₁₀.

De forma similar, foi observado esse mesmo comportamento com a média das concentrações de 24h de PM₁₀, sugerindo que o aumento das contribuições dos grupos de fontes é reflexo do aumento das concentrações de material particulado na localidade em questão. Adicionalmente, observa-se que a maior parte da contribuição para as concentrações de PM₁₀

⁵ A concentração foi estimada através do produto entre o percentual de contribuição resultante do CMB e a concentração monitorada média diária do período analisado.

| | | | |
|--|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 46/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

é proveniente das fontes emissoras que não foram mapeadas em Novo Soberbo em ambas as campanhas, em Santana do Deserto na campanha 7 e em Rio Doce durante a campanha 7. Na campanha 8, a contribuição de fontes emissoras mapeadas no estudo foi superior a 60% nos receptores de Santana do Deserto e Rio Doce.



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021

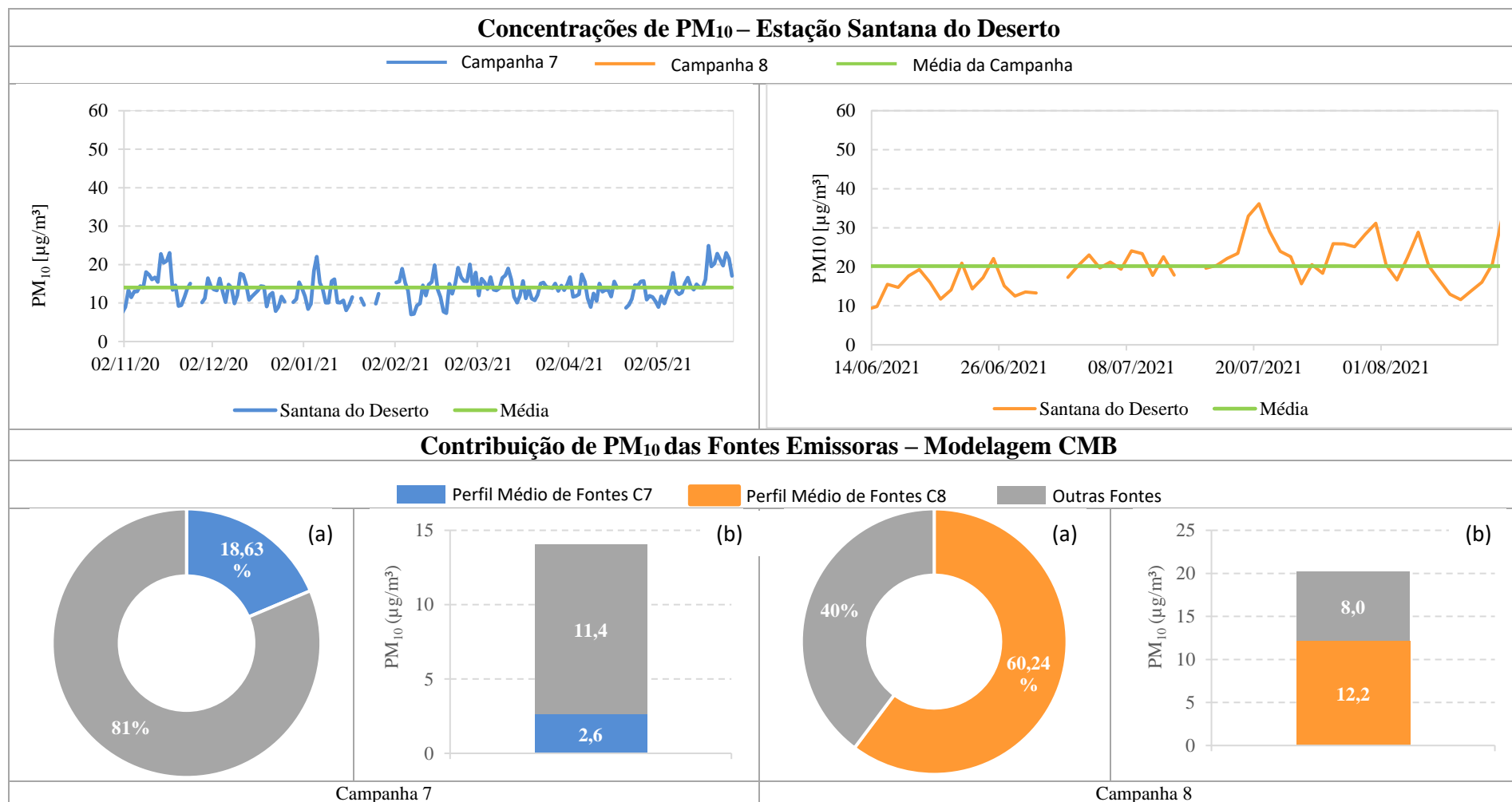
Nº 1

PÁGINA
48/117

RTC220104

REV.
2

Figura 6-3 – Evolução das concentrações diárias de PM₁₀ e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor Estação Santana do Deserto.



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



FUNDAÇÃO RENOVA

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021

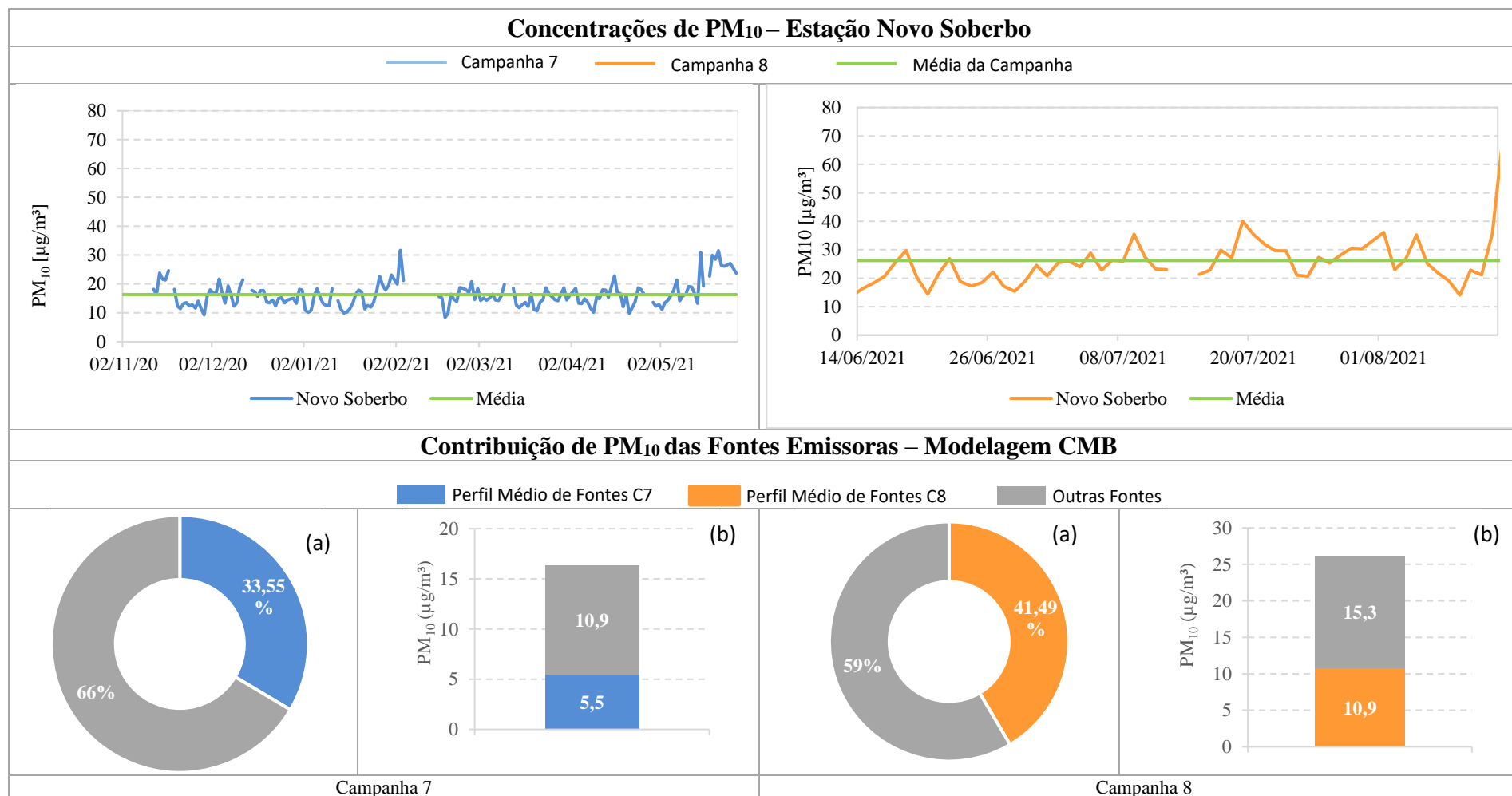
Nº 1

PÁGINA
49/117



RTC220104

REV.
2

Figura 6-4 – Evolução das concentrações diárias de PM₁₀ e contribuição das fontes emissoras resultante da modelagem CMB – Receptor Estação Novo Soberbo.



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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 50/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

7. Potenciais efeitos para a saúde

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



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

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

Na ausência de MRLs, foram utilizados padrões de concentração em esfera federal e de referências internacionais. Através do exposto, tornou-se possível avaliar a possibilidade da ocorrência de impactos negativos à saúde da população, através das concentrações encontradas nas Estações Rio Doce, Santana do Deserto e Novo Soberbo.

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 51/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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

7.1. Alumínio



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

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

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 52/117 |
| | RTC220104 | | 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 nas estações receptoras na campanha 7 foram 4,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 3,35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 9,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para as estações Rio Doce, Santana do Deserto e Novo Soberbo, respectivamente e na campanha 8 foram 27,96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 15,84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 10,57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para os respectivos receptores (Tabelas de 7.1 a 7.3), 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 PM_{10} também foram muito inferiores quando comparados ao padrão do $\text{PM}_{2.5}$ (5.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), o que também representa uma abordagem conservadora em favor da segurança da análise.



| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 53/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

Tabela 7.1 – Concentração de alumínio na Estação Rio Doce

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO [µg/m³] | |
|------------------------|----------------------------------|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 4,67 | 27,96 |
| Máxima de 24 horas | 0,53 | 2,66 |
| Média do Período | 0,51 | 2,49 |



Tabela 7.2 – Concentração de alumínio na Estação Santana do Deserto

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO [µg/m³] | |
|------------------------|----------------------------------|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 3,35 | 15,84 |
| Máxima de 24 horas | 0,74 | 3,98 |
| Média do Período | 0,43 | 2,25 |

Tabela 7.3 – Concentração de alumínio na Estação Novo Soberbo

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO [µg/m³] | |
|------------------------|----------------------------------|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 9,50 | 10,57 |
| Máxima de 24 horas | 1,76 | 3,55 |
| Média do Período | 0,87 | 1,33 |

Portanto, pode-se dizer que as concentrações de alumínio obtidas para as Estações Rio Doce, Santana do Deserto e Novo Soberbo não apresentam níveis mínimos de riscos à saúde da população quando comparados com a recomendação feita pela NIOSH.

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 54/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

7.2. Arsênio

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



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

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

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 55/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

Visando minimizar os impactos decorrentes da exposição aos poluentes atmosféricos e buscando garantir a saúde da população, a União Europeia determinou padrões de concentração a serem seguidos para diversos poluentes. Para o arsênio, a concentração limite é de 6 mg/m³ (0,006 µg/m³) para a média do período de um ano (EUROPEAN COMISSION, 2019). As Tabelas de 7.4 a 7.6 indicam os valores de concentração obtidos nas Estações de Monitoramento Rio Doce, Santana do Deserto e Novo Soberbo, na região do estudo.

Tabela 7.4 – Concentração de arsênio na Estação Rio Doce

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE ARSENIO [µg/m ³] | |
|------------------------|--|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 0,014 | < LD |
| Máxima de 24 horas | 0,002 | < LD |
| Média do Período | 0,002 | < LD |

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

Tabela 7.5 – Concentração de arsênio na Estação Santana do Deserto

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE ARSENIO [µg/m ³] | |
|------------------------|--|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | < LD | < LD |
| Máxima de 24 horas | < LD | < LD |
| Média do Período | < LD | < LD |

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



| | | | |
|---|---|------------------------|--|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | PÁGINA 56/117 | |
| | RTC220104 | REV. 2 | |

Tabela 7.6 – Concentração de arsênio na Estação Novo Soberbo

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE ARSENIO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] | |
|------------------------|--|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | < LD | < LD |
| Máxima de 24 horas | < LD | < LD |
| Média do Período | < LD | < LD |

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

Verifica-se que as concentrações médias obtidas pelas três estações de monitoramento são inferiores a $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 $5 \text{ mg}/\text{m}^3$, pode ocasionar a destruição das células epiteliais pulmonares, provocando edema pulmonar, traqueobronquite e pneumonia. Uma única exposição com concentração elevada de cádmio pode comprometer alguma função pulmonar no longo prazo.

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 57/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |



peroxidase. Normalmente, existe hiperplasia dos pneumócitos tipo 2, em decorrência dos danos e necrose das células do tipo 1.

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

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

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



| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 58/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 59/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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



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

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

7.4. Chumbo

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



| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 60/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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

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

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

Segundo a Organização Mundial da Saúde, em *Air Quality Guidelines for Europe* (WHO, 2000), para orientar quanto às concentrações de chumbo presentes no ar, são utilizadas comparações baseadas na quantidade de chumbo contido no sangue do indivíduo. Isto posto, analisando a comparação mais restritiva, o documento considera que a cada 1 μg de chumbo por metro cúbico (m^3) 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 $\mu\text{g}/\text{dL}$ estudado seja equivalente a concentração de 2,63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 61/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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 $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ao longo do período de 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 $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a média do período, sendo este menor em relação à concentração de $2,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para qual foram observados efeitos adversos à saúde e considerado, portanto, mais restritivo.

O elemento chumbo 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 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, nodulação e aumento da vascularização na mucosa nasal (ASKERGREN e MELLGREN, 1975; SUCIU et al., 1981).

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

A inalação do elemento cobre também pode ocasionar decréscimo nos níveis de hemoglobina e hemácias. Estudos que comprovaram tais efeitos hematológicos, verificaram

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 62/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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 PM10 monitoradas nas estações de qualidade do ar de Rio Doce e Novo Soberbo, foram calculadas as concentrações do elemento químico para cada tempo de referência. (Tabelas 7.7 e 7.8). Não foram encontradas concentrações do elemento no receptor de Santana do Deserto.

Tabela 7.7 – Concentração de cobre na Estação Rio Doce

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE COBRE [µg/m³] | |
|------------------------|-------------------------------|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 0,012 | 0,038 |
| Máxima de 24 horas | 0,001 | 0,004 |
| Média do Período | 0,001 | 0,003 |



| | | | |
|---|---|------------------------|--|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | PÁGINA 63/117 | |
| | RTC220104 | REV. 2 | |

Tabela 7.8 – Concentração de cobre na Estação Novo Soberbo

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE COBRE [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] | |
|------------------------|--|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | < LD | 0,018 |
| Máxima de 24 horas | < LD | 0,006 |
| Média do Período | < LD | 0,002 |



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

Comparando o padrão de qualidade do ar estabelecido para o cobre pelo Governo de Ontário ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e as concentrações obtidas em Rio Doce e Novo Soberbo no período da amostragem, percebe-se que não houve ultrapassagens 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, percebe-se que também não ocorrem ultrapassagens, sendo consideravelmente inferiores ao padrão. Dessa forma, para as concentrações de cobre obtidas no período de amostragem 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 na região de Rio Doce (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 Rio Doce, analisadas pelo método PIXE, apresentaram concentrações de ferro na faixa entre 9% e 11%.

O ferro é um elemento químico que possui coloração branca prateada quando encontrado no estado puro. Entretanto, quando encontrado em outras formas, tais como sulfeto, siliceto e carbureto de ferro apresenta coloração acizentada. A coloração avermelhada é observada quando o ferro está na forma de óxidos. Diversas ligas metálicas com importantes

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 64/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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.

As Tabelas de 7.9 a 7.11 apresentam os valores de concentração de ferro das Estações de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado.



| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 65/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

Tabela 7.9 – Concentração de ferro na Estação Rio Doce

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE FERRO [µg/m³] | |
|------------------------|-------------------------------|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 6,261 | 27,120 |
| Máxima de 24 horas | 0,710 | 2,583 |
| Média do Período | 0,679 | 2,413 |



Tabela 7.10 – Concentração de ferro na Estação Santana do Deserto

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE FERRO [µg/m³] | |
|------------------------|-------------------------------|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 4,972 | 13,651 |
| Máxima de 24 horas | 1,092 | 3,428 |
| Média do Período | 0,638 | 1,943 |

Tabela 7.11 – Concentração de ferro na Estação Novo Soberbo

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE FERRO [µg/m³] | |
|------------------------|-------------------------------|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 9,498 | 10,571 |
| Máxima de 24 horas | 1,759 | 3,549 |
| Média do Período | 0,866 | 1,331 |

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 é o estabelecido pelo Governo de Ontário para padrões de qualidade do ar, o qual corresponde a 4 µg/m³ em uma média de 24 horas (Government of Ontario, 2019). A partir deste limite, observa-se que os valores resultantes da análise para

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 66/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

máxima de 24 horas apresentam-se abaixo do limite de risco, para as estações Rio Doce, Santana do Deserto e Novo Soberbo, não podendo ocasionar efeitos à saúde.

7.7. Manganês



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

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

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

Mesmo que os efeitos na saúde relacionados à inalação de manganês mais comuns e significativos estejam vinculados com os sistemas respiratório e neurológico, para o sistema cardiovascular também possui 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

| | | | |
|---|---|------------------------|--|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | PÁGINA 67/117 | |
| | RTC220104 | REV. 2 | |

de efeitos na saúde humana causados 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 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 $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. As Tabelas de 7.12 a 7.14 apresentam os valores de concentração de manganês das Estações Rio Doce, Santana do Deserto e Novo Soberbo na região do estudo.

Tabela 7.12 – Concentração de manganês na Estação Rio Doce

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE MANGANES [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] | |
|------------------------|---|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 0,195 | 0,459 |
| Máxima de 24 horas | 0,022 | 0,044 |
| Média do Período | 0,021 | 0,041 |

Tabela 7.13 – Concentração de manganês na Estação Santana do Deserto

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE MANGANES [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] | |
|------------------------|---|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 0,102 | 0,269 |
| Máxima de 24 horas | 0,022 | 0,068 |
| Média do Período | 0,013 | 0,038 |



| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 68/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

Tabela 7.14 – Concentração de manganês na Estação Novo Soberbo

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE MANGANES [µg/m³] | |
|------------------------|----------------------------------|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 0,193 | 0,234 |
| Máxima de 24 horas | 0,036 | 0,079 |
| Média do Período | 0,018 | 0,029 |

Nota-se que em relação à média do período, o valor da concentração limite de exposição humana mostra-se superior se comparado as concentrações encontradas nas três estações da área de estudo, sendo assim, as concentrações nas estações se enquadram nos limites do Nível de Risco Mínimo. A concentração máxima de 1 hora se apresenta como sendo a mais crítica, por ser o maior por um período de tempo curto, mas sendo a concentração do cenário mais crítico da estação, ainda assim, se mantém inferior ao limite do Nível de Risco Mínimo anual nas estações Santana do Deserto e Novo Soberbo, contudo, atinge 0,459 µg/m³ na estação Rio Doce.



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

7.8. Níquel

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

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

Os efeitos prejudiciais mais sérios à saúde decorrentes da exposição ao níquel, como bronquite crônica, função pulmonar reduzida e cânceres de pulmão e seio nasal, ocorreram em



| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 69/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

peças 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 que foram expostos a mais de 10 mg de níquel/m³ de ar, na forma compostos de níquel de difícil dissolução (como o subsulfeto de níquel, Ni₃S₂). A exposição a altos níveis de compostos de níquel que se dissolvem facilmente em água (solúveis) 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 a exposições em concentrações muito mais elevadas do que aquelas que ocorrem no ar ambiente.

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 70/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

pontuais. Com base nos dados de qualidade do ar de 1996, a USEPA relatou a média de 2,2 ng/m³ nos EUA. Em geral, espera-se que os níveis de ar ambiente do níquel sejam mais altos no ar urbano do que no ar rural. Concentrações de níquel no ar interno são geralmente de 10 ng/m³.



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

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

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

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

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

| | | | |
|--|---|------------------------|--|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | PÁGINA 71/117 | |
| | RTC220104 | REV. 2 | |

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

Considerando os efeitos para a proteção à saúde, bem-estar da população e proteção ambiental, a Comissão Europeia (CE) estabelece o limite de 20 ng/m³ como padrão de qualidade do ar para o níquel, expresso como média anual (EUROPEAN COMMISSION, 2019). O valor descrito para concentração média anual, determinado pela Comissão Europeia, é referente a concentrações de níquel contido na fração menor que 10 µm do material particulado (PM₁₀). O mesmo valor é aplicado como padrão de qualidade do ar na Índia e no Canadá (Estado de Ontario). As concentrações de níquel na estação Rio Doce são apresentadas na tabela 7.15.

Tabela 7.15 – Concentração de níquel na Estação Rio Doce



| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE NÍQUEL [µg/m ³] | |
|---------------------|---|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | < LD | 0,027 |
| Máxima de 24 horas | < LD | 0,003 |
| Média do Período | < LD | 0,002 |

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

O elemento níquel foi detectado na campanha 8 da Estação Rio Doce, contudo em limites muito inferiores aos padrões regulamentários. Em tempo, o elemento níquel não foi detectado pelo método PIXE nas amostras de pontos receptores nas estações Santana do Deserto e Novo Soberbo, 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).

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 72/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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

Nas Tabelas de 7.16 a 7.18 estão expostas as concentrações de silício encontradas para as regiões analisadas.

Tabela 7.16 - Concentração de silício em Rio Doce



| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE SILÍCIO [µg/m³] | |
|------------------------|---------------------------------|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 6,463 | 32,764 |
| Máxima de 24 horas | 0,733 | 3,121 |
| Média do Período | 0,701 | 2,915 |

Tabela 7.17 - Concentração de silício em Santana do Deserto

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE SILÍCIO [µg/m³] | |
|------------------------|---------------------------------|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 4,491 | 18,263 |
| Máxima de 24 horas | 0,986 | 4,587 |
| Média do Período | 0,577 | 2,600 |

Tabela 7.18 - Concentração de silício em Novo Soberbo

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE SILÍCIO [µg/m³] | |
|------------------------|---------------------------------|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 12,162 | 15,165 |
| Máxima de 24 horas | 2,252 | 5,091 |
| Média do Período | 1,109 | 1,910 |

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 73/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

Devido à falta de regulamentações que indiquem os limites de exposição à inalação para o silício e, também falta de estudos em humanos que indiquem riscos potenciais a saúde, torna-se inviável discorrer acerca dos riscos existentes nas localidades de Rio Doce, Santana do Deserto e Novo Soberbo 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., 1927; BROWN, 1988).

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

Embora os efeitos gastrointestinais estejam mais relacionados a ingestão de zinco, a inalação de seus compostos também é passível de implicações danosas devido à proximidade e interligação dos sistemas respiratório e digestivo. Estudos de McCord et al. (1926) indicaram

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 74/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

uma maior incidência de problemas gastrointestinais em pessoas expostas à inalação crônica de óxido de zinco. Dentre os efeitos gastrointestinais destacam-se: dores abdominais, náuseas, vômitos e constipações (MCCORD et al., 1926).

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



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

Contudo, o governo de Ontario, no Canadá, estabelece 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como padrão de concentração para meia hora e 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 (vinte e quatro) horas (Government of Ontario, 2019). As Tabelas de 7.19 a 7.21 indicam os valores de concentração obtidos nas proximidades das estações de monitoramento em Rio Doce, Santana Deserto e Novo Soberbo.

Tabela 7.19 - Concentração de zinco em Rio Doce

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE ZINCO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] | |
|------------------------|--|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 6,463 | 32,764 |
| Máxima de 24 horas | 0,733 | 3,121 |
| Média do Período | 0,701 | 2,915 |

Tabela 7.20 - Concentração de zinco na Estação de Santana do Deserto



| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 75/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE ZINCO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] | |
|------------------------|--|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 4,491 | 18,263 |
| Máxima de 24 horas | 0,986 | 4,587 |
| Média do Período | 0,577 | 2,600 |

Tabela 7.21 - Concentração de zinco na Estação de Novo Soberbo

| REFERÊNCIA TEMPORAL | CONCENTRAÇÃO DE ZINCO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] | |
|------------------------|--|------------|
| | Campanha 7 | Campanha 8 |
| Máxima de 1 hora | 12,162 | 15,165 |
| Máxima de 24 horas | 2,252 | 5,091 |
| Média do Período | 1,109 | 1,910 |

No que tange aos padrões de qualidade do ar existentes, todas as concentrações obtidas pelas estações de monitoramento são substancialmente inferiores aos $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ estabelecidos como valor limite para qualidade do ar em Ontario, Canadá. Mesmo analisando o cenário mais crítico (máxima de uma hora), verificam-se concentrações significativamente inferiores ao valor limite. De fato, a maior concentração obtida no estudo (máxima de uma hora para Estação Rio Doce – Campanha 8) representa apenas 33% 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.

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 76/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

8. Conclusão



O presente trabalho teve como objetivos caracterizar quimicamente o material particulado menor que 10 µm (PM₁₀), estabelecer relação entre fontes emissoras e receptores, bem como discutir o risco à saúde da população pela exposição aos elementos e concentrações identificadas em Rio Doce (MG) e Santa Cruz do Escalvado (MG).

A partir dos dados obtidos das estações de monitoramento da qualidade do ar de Rio Doce (Centro e Santana do Deserto) e de Santa Cruz do Escalvado (Novo Soberbo), para o período de novembro de 2020 a agosto de 2021, foi possível perceber que, não houve ultrapassagem ao padrão intermediário I, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 491/2018, para nenhum dos poluentes monitorados no período do estudo.

As análises químicas foram realizadas para as amostras dos materiais contidos nas fontes emissoras (rejeito, solo intacto, vias pavimentadas e vias não pavimentadas) e receptores (Estações Rio Doce, Santana do Deserto e Novo Soberbo) utilizando o método PIXE.



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

A caracterização das fontes emissoras e pontos receptores obtida pelo método PIXE subsidiou a aplicação do modelo receptor CMB. Tal modelo foi utilizado como ferramenta para obtenção de uma aproximação das contribuições de fontes emissoras relacionadas às atividades realizadas pela FUNDAÇÃO nas concentrações de PM₁₀, em Rio Doce (MG) e Santa Cruz do Escalvado (MG). Nos três pontos receptores analisados, as contribuições provenientes das fontes emissoras mapeadas (vias pavimentadas, vias não pavimentadas e solo intacto) variaram entre 18% e 83%, sendo as maiores frações (acima de 60%) encontradas durante a campanha 8 nos receptores de Rio Doce e Santana do Deserto. Assim, nota-se um acréscimo expressivo nas concentrações de PM₁₀ proveniente de fontes emissoras mapeadas de acordo com o decorrer

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 77/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

das campanhas. Vale destacar que as campanhas de monitoramento foram realizadas em períodos diferentes, sendo a campanha 7 realizada, em sua maioria, no período chuvoso e a campanha 8 em um período seco, em apenas 2 meses.

O método PIXE subsidiou a discussão dos efeitos dos elementos detectados nas amostras coletadas em Rio Doce e em Santa Cruz do Escalvado, 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 (As, Cd, Pb, Cu, Mn, Ni e Zn), mesmo que tenha sido verificada uma baixa concentração nos resultados obtidos. Para grande parte destes elementos, considerando os valores de referência analisados e as concentrações observadas, não há indícios de potencial risco à saúde da população. É importante observar que as concentrações dos elementos foram estimadas considerando a maior fração mássica observada dentre as amostras em conjunto com a maior concentração obtida pelo monitoramento da qualidade do ar. Dessa forma, tal abordagem é conservadora ao utilizar os valores máximos das duas variáveis consideradas.

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 78/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

9. Equipe Técnica

Luiz Cláudio D. Santolim

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

Julius César Zamprogno Mergulhão

Engenheiro Ambiental
CREA: ES-26.913/D
IBAMA 5.433.813

Flávio Curbani



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

Gabriel Miller de Oliveira

Meteorologista
CREA: MG-209352/D
IBAMA: 6.808.339

Victória Venturini Marques

Engenheira Ambiental

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 79/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

10. Referências Bibliográficas

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

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



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

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

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 80/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 81/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 82/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 83/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

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

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

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



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

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

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 84/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 85/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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

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

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



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

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

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 86/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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

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

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

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



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

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

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 87/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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

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



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

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

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 88/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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.

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.

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 89/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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.

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 90/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

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.

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.

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 91/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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.

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 92/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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.

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.

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 93/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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.

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 94/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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/>. 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.

APÊNDICE A – Resultados das Análises Químicas de PM₁₀ – Método PIXE

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

Tabela A.1 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM₁₀ – Amostras em fontes emissoras – Campanha 7

[illegible]



| | | | |
|--|--|----------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 96/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

| | | | |
|--|--|----------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 96/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

| | | | |
|--|--|----------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 96/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

| | | | |
|--|--|----------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 96/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

| | | | |
|--|--|----------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 96/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

| | | | |
|--|--|----------------------------|------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 96/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

[illegible]



Nº 1

RTC220104

REV.
2

Continuação

[illegible]



N° 1

PÁGINA
98/117

RTC220104

REV.
2

Continuação

[illegible]



**FUNDAÇÃO
RENOVA**

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO –
NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021

Nº 1

PÁGINA
99/117

RTC220104

REV.
2

Conclusão

| CONCENTRAÇÃO [%] * | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--|---|--|---|--|--|---|--|---|---|--|---|
| ELEMENTO | Amostra 11 27/05/2021 Novo Soberbo Via Paviment. | Amostra 12 27/05/2021 Novo Soberbo Solo Intacto | Amostra 13 27/05/2021 Novo Soberbo Via Não Paviment. | Amostra 14 23/04/2021 Rio Doce Via Paviment. | Amostra 15 23/04/2021 Rio Doce Solo Intacto | Amostra 16 23/04/2021 Rio Doce Material Afetado | Amostra 17 23/04/2021 Rio Doce Via Não Paviment. | Amostra 18 15/04/2021 Santana do Deserto Via Paviment. | Amostra 19 15/04/2021 Fazenda Floresta Solos e Vias | Amostra 20 15/04/2021 Fazenda Floresta Material Afetado | Amostra 21 15/04/2021 Santana do Deserto Via Não Paviment. | Amostra 22 15/04/2021 Santana do Deserto Solo Intacto |
| Tl | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Pb | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Bi | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Th | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| U | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |

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

Tabela A.2 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM₁₀ – Amostras em fontes emissoras – Campanha 8

[illegible]



| | | | |
|--|---|----------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 101/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

| | | | |
|--|---|----------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 101/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

| | | | |
|--|---|----------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 101/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

| | | | |
|--|---|----------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 101/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

| | | | |
|--|---|----------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 101/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

| | | | |
|--|---|----------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 101/117 |
| | | RTC220104 | REV. 2 |

[illegible][illegible]

REV.
2

Continuação

[illegible]



**FUNDAÇÃO
RENOVA**

ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO –
NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021

Nº 1

PÁGINA
103/117



RTC220104

REV.
2

Continuação

| ELEMENTO | CONCENTRAÇÃO [%] * | | | | | | | | | | | |
|----------|--|---|--|---|--|--|---|--|---|---|--|---|
| | Amostra 11 10/07/2019 Novo Soberbo Via Paviment. | Amostra 12 10/07/2019 Novo Soberbo Solo Intacto | Amostra 13 10/07/2019 Novo Soberbo Via Não Paviment. | Amostra 14 10/07/2019 Rio Doce Via Paviment. | Amostra 15 10/07/2019 Rio Doce Solo Intacto | Amostra 16 10/07/2019 Rio Doce Material Afetado | Amostra 17 10/07/2019 Rio Doce Via Não Paviment. | Amostra 18 10/07/2019 Santana do Deserto Via Paviment. | Amostra 19 15/04/2021 Fazenda Floresta Solos e Vias | Amostra 20 15/04/2021 Fazenda Floresta Material Afetado | Amostra 21 10/07/2019 Santana do Deserto Via Não Paviment. | Amostra 22 10/07/2019 Santana do Deserto Solo Intacto |
| Er | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Tm | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Yb | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Lu | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Hf | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ta | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| W | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Re | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Os | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ir | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Pt | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Au | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Hg | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Tl | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Pb | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Bi | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| U | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |



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

| | | | |
|--|---|------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 104/117 |
| | | RTC220104 | REV. 1 |

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



Tabela A.3 – Concentração dos elementos químicos detectados pelo método PIXE para PM₁₀ – Amostras em pontos receptores coletadas com filtro de nylon

| CONCENTRAÇÃO [%] * | | | | | | |
|--------------------|--|--|---|---|--|--|
| FILTRO DE NYLON | | | | | | |
| ELEMENTO | CAMPANHA 7 | | | CAMPANHA 8 | | |
| | Amostra 34 06/11/2020 a 23/04/2021 RIO DOCE | Amostra 35 02/11/2020 a 15/04/2021 SANTANA DO DESERTO | Amostra 37 19/03/2021 a 27/05/2021 NOVO SOBERBO | Amostra 40 14/06/2021 a 02/08/2021 NOVO SOBERBO | Amostra 41 14/06/2021 a 11/08/2021 SANTANA DO DESERTO | Amostra 42 14/06/2021 a 14/08/2021 RIO DOCE |
| Na | 1,055 | 1,059 | 1,792 | 1,233 | 1,488 | 1,047 |
| Mg | 0,399 | 0,352 | 0,625 | 0,476 | 0,421 | 0,446 |
| Al | 3,382 | 2,036 | 5,628 | 5,769 | 5,915 | 8,422 |
| Si | 4,683 | 2,673 | 7,112 | 7,256 | 6,809 | 9,869 |
| P | 0,399 | 0,174 | 0,169 | < LD | < LD | < LD |
| S | 3,345 | 2,422 | 4,312 | 2,817 | 3,159 | 2,871 |
| Cl | 0,088 | 0,006 | < LD | 0,233 | 0,128 | 0,018 |
| K | 1,736 | 1,131 | 2,415 | 2,089 | 2,155 | 2,107 |
| Ca | 1,389 | 0,714 | 1,066 | 1,217 | 1,387 | 1,802 |
| Sc | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ti | 0,110 | 0,039 | 0,163 | 0,524 | 0,184 | 0,677 |
| V | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Cr | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Mn | 0,142 | 0,056 | 0,113 | 0,112 | 0,099 | 0,138 |
| Fe | 4,537 | 2,246 | 5,555 | 5,058 | 5,496 | 8,169 |
| Co | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ni | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | 0,008 |
| Cu | 0,009 | < LD | < LD | 0,009 | < LD | 0,011 |
| Zn | 0,055 | 0,041 | 0,074 | 0,054 | 0,060 | 0,064 |
| Ga | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ge | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| As | 0,010 | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Se | 0,006 | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Br | 0,011 | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Rb | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Sr | 0,013 | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Y | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |

| | | | |
|--|---|------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 105/117 |
| | | RTC220104 | REV. 1 |

Continuação

| CONCENTRAÇÃO [%] * | | | | | | |
|--------------------|--|--|---|---|--|--|
| FILTRO DE NYLON | | | | | | |
| ELEMENTO | CAMPANHA 7 | | | CAMPANHA 8 | | |
| | Amostra 34 06/11/2020 a 23/04/2021 RIO DOCE | Amostra 35 02/11/2020 a 15/04/2021 SANTANA DO DESERTO | Amostra 37 19/03/2021 a 27/05/2021 NOVO SOBERBO | Amostra 40 14/06/2021 a 02/08/2021 NOVO SOBERBO | Amostra 41 14/06/2021 a 11/08/2021 SANTANA DO DESERTO | Amostra 42 14/06/2021 a 14/08/2021 RIO DOCE |
| Zr | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Nb | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Mo | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Tc | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| 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 |

| | | | |
|--|---|------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | | Nº 1 | PÁGINA 106/117 |
| | | RTC220104 | REV. 1 |

Conclusão

CONCENTRAÇÃO [%] *

FILTRO DE NYLON

| ELEMENTO | CAMPANHA 7 | | | | CAMPANHA 8 | |
|----------|--|--|---|---|--|--|
| | Amostra 34 06/11/2020 a 23/04/2021 RIO DOCE | Amostra 35 02/11/2020 a 15/04/2021 SANTANA DO DESERTO | Amostra 37 19/03/2021 a 27/05/2021 NOVO SOBERBO | Amostra 40 14/06/2021 a 02/08/2021 NOVO SOBERBO | Amostra 41 14/06/2021 a 11/08/2021 SANTANA DO DESERTO | Amostra 42 14/06/2021 a 14/08/2021 RIO DOCE |
| Lu | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Hf | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ta | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| W | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Re | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| 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.





| | | | |
|--|---|------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 107/117 |
| | RTC220104 | | REV. 1 |



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

| CONCENTRAÇÃO [%]* | | | | | |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| FILTRO DE MCE | | | | | |
| ELEMENTO | CAMPANHA 7 | | | CAMPANHA 8 | |
| | Amostra 34 | Amostra 35 | Amostra 37 | Amostra 41 | Amostra 42 |
| | 06/11/2020 a 23/04/2021 | 02/11/2020 a 15/04/2021 | 19/03/2021 a 27/05/2021 | 14/06/2021 a 11/08/2021 | 14/06/2021 a 14/08/2021 |
| | RIO DOCE | SANTANA DO DESERTO | NOVO SOBERBO | SANTANA DO DESERTO | RIO DOCE |
| Na | 1,523 | 1,495 | 1,845 | 3,337 | 2,186 |
| Mg | 0,515 | 0,389 | 0,542 | 0,698 | 0,802 |
| Al | 3,224 | 3,189 | 4,455 | 11,001 | 11,602 |
| Si | 4,482 | 4,277 | 5,696 | 12,683 | 13,369 |
| P | 0,240 | 0,310 | 0,190 | < LD | < LD |
| S | 3,780 | 4,211 | 4,349 | 6,663 | 5,455 |
| Cl | 0,069 | 0,008 | < LD | 0,226 | 0,100 |
| K | 1,901 | 2,111 | 2,097 | 4,688 | 3,635 |
| Ca | 1,496 | 1,253 | 0,824 | 2,302 | 2,206 |
| Sc | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ti | 0,372 | 0,273 | 0,350 | 0,876 | 0,758 |
| V | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Cr | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Mn | 0,115 | 0,097 | < LD | 0,187 | 0,165 |
| Fe | 4,434 | 4,735 | 4,186 | 9,480 | 10,733 |
| Co | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ni | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Cu | < LD | 0,008 | < LD | < LD | < LD |
| Zn | 0,065 | 0,066 | 0,079 | 0,139 | 0,144 |
| Ga | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ge | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| As | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Se | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Br | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Rb | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Sr | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Y | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Zr | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |

| | | | |
|--|---|------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 108/117 |
| | RTC220104 | | REV. 1 |

Continuação



| CONCENTRAÇÃO [%]* | | | | | |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| FILTRO DE MCE | | | | | |
| ELEMENTO | CAMPANHA 7 | | | CAMPANHA 8 | |
| | Amostra 34 | Amostra 35 | Amostra 37 | Amostra 41 | Amostra 42 |
| | 06/11/2020 a 23/04/2021 | 02/11/2020 a 15/04/2021 | 19/03/2021 a 27/05/2021 | 14/06/2021 a 11/08/2021 | 14/06/2021 a 14/08/2021 |
| | RIO DOCE | SANTANA DO DESERTO | NOVO SOBERBO | SANTANA DO DESERTO | RIO DOCE |
| Ga | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ge | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| As | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Se | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Br | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Rb | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Sr | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Y | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Zr | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Nb | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Mo | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Tc | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ru | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Rh | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Pd | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ag | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Cd | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| In | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Sn | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Sb | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Te | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| I | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Cs | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ba | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| La | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ce | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Pr | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Nd | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Pm | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Sm | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |

| | | | |
|--|---|------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO - NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 109/117 |
| | RTC220104 | | REV. 1 |

Continuação

| CONCENTRAÇÃO [%]* | | | | | |
|-------------------|--|---|---|---|--|
| FILTRO DE MCE | | | | | |
| ELEMENTO | CAMPANHA 7 | | | CAMPANHA 8 | |
| | Amostra 34 06/11/2020 a 23/04/2021 RIO DOCE | Amostra 35 02/11/2020 a 15/04/2021 SANTANA DO DESERTO | Amostra 37 19/03/2021 a 27/05/2021 NOVO SOBERBO | Amostra 41 14/06/2021 a 11/08/2021 SANTANA DO DESERTO | Amostra 42 14/06/2021 a 14/08/2021 RIO DOCE |
| Eu | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Gd | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Tb | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Dy | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ho | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Er | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Tm | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Yb | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Lu | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Hf | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ta | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| W | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Re | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Os | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Ir | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Pt | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Au | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Hg | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Tl | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Pb | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Bi | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| Th | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |
| U | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD |

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



| | | | |
|---|---|------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 110/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

ANEXO A – Arquivos de Saída do Modelo CMB

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

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

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

| | | | |
|---|---|------------------------|-------------------|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | | PÁGINA 111/117 |
| | RTC220104 | | REV. 2 |

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

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



| | | | |
|---|--|------------------------|--|
|  |  | FUNDAÇÃO RENOVA | |
| ANÁLISE DE MODELO RECEPTOR E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM EM RIO DOCE E SANTA CRUZ DO ESCALVADO – NOVEMBRO DE 2020 A AGOSTO DE 2021 | Nº 1 | PÁGINA 114/117 | |
| | RTC220104 | REV. 2 | |

Figura A-3 – Arquivo de saída do modelo CMB – Campanha 7 (Novo Soberbo)

| FITTING STATISTICS: | | | | | | | | | |
|--|------|-------------------|-------------------|-------------------|--|-----------------|--|--------------|--|
| | | R SQUARE | | 0.92 | | % MASS | | 33.6 | |
| | | CHI SQUARE | | 1.44 | | DEGREES FREEDOM | | 6 | |
| | | FIT MEASURE | | 0.74 | | | | | |
| SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES: | | | | | | | | | |
| SOURCE | | | | | | | | | |
| EST CODE | NAME | SCE(µg/m³) | | Std Err | | Tstat | | | |
| YES MED | 0 | 0.33553 | | 0.03446 | | 9.73616 | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| 0.33553 | | | | | | | | | |
| MEASURED CONCENTRATION FOR SIZE: PM10 | | | | | | | | | |
| 1.0+- 0.1 | | | | | | | | | |
| Eligible Space Collinearity Display | | | | | | | | | |
| ===== | | | | | | | | | |
| ELIGIBLE SPACE DIM. = 1 FOR MAX. UNC. = 0.20000 (20.% OF TOTAL MEAS. MASS) | | | | | | | | | |
| 1 / Singular Value | | | | | | | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| 0.03446 | | | | | | | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| NUMBER ESTIMABLE SOURCES = 1 FOR MIN. PROJ. = 0.95 | | | | | | | | | |
| PROJ. SOURCE | | PROJ. SOURCE | | PROJ. SOURCE | | PROJ. SOURCE | | PROJ. SOURCE | |
| ----- | | | | | | | | | |
| 1.0000 MED | | | | | | | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| 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 | | 0.33553+- 0.03446 | | 0.34+- 0.05 | | -6.3 | |
| Na | IC1 | 0.01819+- 0.00038 | | 0.00067+- 0.00107 | | 0.04+- 0.06 | | -15.4 | |
| Mg | IC2 | * | 0.00584+- 0.00059 | 0.00361+- 0.00158 | | 0.62+- 0.28 | | -1.3 | |
| Al | IC3 | * | 0.05041+- 0.00830 | 0.04753+- 0.00311 | | 0.94+- 0.17 | | -0.3 | |
| Si | IC4 | * | 0.06404+- 0.01002 | 0.08067+- 0.00583 | | 1.26+- 0.22 | | 1.4 | |
| P | IC5 | | 0.00180+- 0.00015 | 0.00040+- 0.00060 | | 0.22+- 0.33 | | -2.3 | |
| S | IC6 | | 0.04331+- 0.00026 | 0.00052+- 0.00029 | | 0.01+- 0.01 | | -110.1 | |
| Cl | IC7 | | 0.00000+- 0.00000 | 0.00036+- 0.00043 | | 0.00+- 0.00 | | 0.8 | |
| K | IC8 | | 0.02256+- 0.00225 | 0.00326+- 0.00105 | | 0.14+- 0.05 | | -7.8 | |
| Ca | IC9 | * | 0.00945+- 0.00171 | 0.00516+- 0.00290 | | 0.55+- 0.32 | | -1.3 | |
| Ti | IC10 | * | 0.00256+- 0.00133 | 0.00270+- 0.00019 | | 1.05+- 0.55 | | 0.1 | |
| Mn | IC11 | * | 0.00056< 0.00080 | 0.00133< 0.00148 | | 2.38< 4.31 | | 0.5 | |
| Fe | IC12 | * | 0.04871+- 0.00968 | 0.02856+- 0.00715 | | 0.59+- 0.19 | | -1.7 | |
| Cu | IC13 | | 0.00000+- 0.00000 | 0.00002+- 0.00000 | | 0.00+- 0.00 | | 5.3 | |
| Zn | IC14 | | 0.00076+- 0.00004 | 0.00004+- 0.00002 | | 0.05+- 0.03 | | -15.8 | |
| ----- | | | | | | | | | |

| FITTING STATISTICS: | | | | | | | | | |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| | | R SQUARE | | 0.94 | | % MASS | | 83.5 | |
| | | CHI SQUARE | | 1.13 | | DEGREES FREEDOM | | 8 | |
| | | FIT MEASURE | | 0.91 | | | | | |
| SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES: | | | | | | | | | |
| SOURCE | | | | | | | | | |
| EST CODE | NAME | SCE(µg/m³) | | Std Err | | Tstat | | | |
| YES MED | 0 | 0.83483 | | 0.07265 | | 11.49130 | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| 0.83483 | | | | | | | | | |
| MEASURED CONCENTRATION FOR SIZE: PM10 | | | | | | | | | |
| 1.0+- 0.1 | | | | | | | | | |
| Eligible Space Collinearity Display | | | | | | | | | |
| ===== | | | | | | | | | |
| ELIGIBLE SPACE DIM. = 1 FOR MAX. UNC. = 0.20000 (20.% OF TOTAL MEAS. MASS) | | | | | | | | | |
| 1 / Singular Value | | | | | | | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| 0.07265 | | | | | | | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| NUMBER ESTIMABLE SOURCES = 1 FOR MIN. PROJ. = 0.95 | | | | | | | | | |
| PROJ. SOURCE | PROJ. SOURCE | PROJ. SOURCE | PROJ. SOURCE | PROJ. SOURCE | PROJ. SOURCE | PROJ. SOURCE | PROJ. SOURCE | PROJ. SOURCE | PROJ. SOURCE |
| ----- | | | | | | | | | |
| 1.0000 MED | | | | | | | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| ESTIMABLE LINEAR COMBINATIONS OF INESTIMABLE SOURCES | | | | | | | | | |
| COEFF. SOURCE | 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 | 0.83483+- | 0.07265 | 0.83+- | 0.11 | -1.3 | |
| Na | IC1 | * 0.01616+- | 0.00805 | 0.00130+- | 0.00181 | 0.08+- | 0.12 | -1.8 | |
| Mg | IC2 | * 0.00624+- | 0.00251 | 0.00495+- | 0.00311 | 0.79+- | 0.59 | -0.3 | |
| Al | IC3 | * 0.10012+- | 0.02249 | 0.14277+- | 0.01554 | 1.43+- | 0.36 | 1.6 | |
| Si | IC4 | 0.11619+- | 0.02475 | 0.18832+- | 0.01055 | 1.62+- | 0.36 | 2.7 | |
| P | IC5 | 0.00000+- | 0.00000 | 0.00052+- | 0.00057 | 0.00+- | 0.00 | 0.9 | |
| S | IC6 | 0.04163+- | 0.01827 | 0.00054+- | 0.00039 | 0.01+- | 0.01 | -2.2 | |
| Cl | IC7 | * 0.00059+- | 0.00058 | 0.00021+- | 0.00020 | 0.36+- | 0.50 | -0.6 | |
| K | IC8 | 0.02871+- | 0.01080 | 0.00536+- | 0.00325 | 0.19+- | 0.13 | -2.1 | |
| Ca | IC9 | * 0.02004+- | 0.00286 | 0.00771+- | 0.00752 | 0.38+- | 0.38 | -1.5 | |
| Ti | IC10 | * 0.00717+- | 0.00058 | 0.00694+- | 0.00053 | 0.97+- | 0.11 | -0.3 | |
| Mn | IC11 | * 0.00152+- | 0.00019 | 0.00132+- | 0.00087 | 0.87+- | 0.58 | -0.2 | |
| Fe | IC12 | * 0.09451+- | 0.01813 | 0.08379+- | 0.00290 | 0.89+- | 0.17 | -0.6 | |
| Ni | IC13 | 0.00004< | 0.00006 | 0.00004< | 0.00001 | 0.95< | 1.35 | 0.0 | |
| Cu | IC14 | * 0.00006< | 0.00008 | 0.00004< | 0.00001 | 0.68< | 0.99 | -0.2 | |
| Zn | IC15 | 0.00104+- | 0.00057 | 0.00008+- | 0.00003 | 0.08+- | 0.05 | -1.7 | |
| As | IC16 | 0.00000+- | 0.00000 | 0.00000+- | 0.00001 | 0.00+- | 0.00 | 0.5 | |
| Br | IC18 | 0.00000+- | 0.00000 | 0.00000+- | 0.00000 | 0.00+- | 0.00 | 0.4 | |
| Sr | IC19 | 0.00000+- | 0.00000 | 0.00004+- | 0.00004 | 0.00+- | 0.00 | 1.1 | |
| ----- | | | | | | | | | |

