



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

Ciências Ambientais

ISAÍAS MUTOMBO MAFAVISSE

**MAPEAMENTO E ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE CARGAS ANTRÓPICAS
POTENCIALMENTE POLUIDORAS DA MINERAÇÃO DE CARVÃO DE
MOATIZE, MOÇAMBIQUE**

SOROCABA

2018

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

**ciências
ambientais**



unesp
Sorocaba

ISAÍAS MUTOMBO MAFAVISSE

**MAPEAMENTO E ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE CARGAS ANTRÓPICAS
POTENCIALMENTE POLUIDORAS DA MINERAÇÃO DE CARVÃO DE
MOATIZE, MOÇAMBIQUE**

Tese apresentado como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista “Filho de mesquita” na área de Concentração Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Valquíria de Campos

Coorientador: Prof. Dr. Roberto W. Lourenço

SOROCABA

2018

PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

ciências ambientais

unesp
Sorocaba

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Unesp
Instituto de Ciencia e Tecnologia – Câmpus de Sorocaba

M187m Mafavisse, Isaías Mutombo
Mapeamento e estratégia de controle de cargas antrópicas potencialmente poluidoras da mineração de carvão de Moatize, Moçambique / Isaías Mutombo Mafavisse. Sorocaba, 2018.
139 f. : il.

Tese de Doutorado – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba – Universidade Estadual Paulista
Orientador: Dr^a Valquíria de Campos
Co-orientador: Dr Roberto Wagner Lourenço

1. Minas e recursos minerais - Moçambique. 2. Ar - Poluição. 3. Gestão ambiental - Moçambique. 4. Impacto ambiental. 5. Controle de poeira. I. Título.

Bibliotecário responsável: Bruna B. Guimaraes – CDD 628.53



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Mapeamento e estratégia de controle de cargas antrópicas potencialmente poluidoras da mineração de carvão de Moatize, Moçambique

AUTOR: ISAÍAS MUTOMBO MAFAVISSE

ORIENTADORA: VALQUÍRIA DE CAMPOS

COORIENTADOR: ROBERTO WAGNER LOURENÇO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIAS AMBIENTAIS, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Prof.ª. Dr.ª. VALQUÍRIA DE CAMPOS
Engenharia Ambiental / Unesp - ICT Sorocaba

Prof. Dr. VIDAL DIAS DA MOTA JUNIOR
Engenharia Ambiental / Universidade de Sorocaba (UNISO)

Prof. Dr. PAULO SÉRGIO TONELLO
Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP – Sorocaba

Prof. Dr. DARLLAN COLLINS DA CUNHA E SILVA
Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade de Sorocaba (UNISO)

Prof. Dr. NOBEL PENTEADO DE FREITAS
Coordenação de Ciências Biológicas / Universidade de Sorocaba (UNISO)

Sorocaba, 21 de junho de 2018

“Dedico aos meus pais, Mutombo Magona Mafavisse e Isabel Saranhe Ribeiro Sande (*in memoriam*) por todo amor e ensinamentos que recebi durante a minha vida”.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, na pessoa do diretor do Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba Prof. Dr. Alexandre da Silva Simões.

À Profª Drª Valquíria de Campos, pela orientação sábia, metódica, profissional, pela amizade e pela paciência sempre.

Ao Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço, pela dedicação, pela amizade e pela paciência sempre.

À CAPES/PEC-PG pela concessão da bolsa de estudo, edital 062/2013 processo nº 12503134.

À UP, Delegação em Nampula, pela permissão para continuação dos meus estudos, particularmente à pessoa do Prof. Dr. Mário Jorge Brito dos Santos.

À Vale Moçambique, S.A pelo fornecimento das amostras, pela autorização da visita técnica ao empreendimento minerário e pela disponibilização do laboratório, particularmente à pessoa do Cristiano Santana de Souza, Enoque Mendes Vicente, Sérgio e Osório Bacar e aos técnicos do laboratório INTERTEK Abelardo, Cremildo e António pelo auxílio prestado.

À RCLF Medições Ambientais LTDA à pessoa do Reynaldo Gomide Filho pelo apoio em equipamentos de medição de material particulado e pela assistência prestada.

Ao Instituto Granado de Tecnologia da Poliacrilonitrila (IGTPAN) e a seu presidente M^e Nilton Pereira Alves Granado, pelo auxílio na execução do projeto de pesquisa.

À Quimlab Produtos Científicos Ltda. e a sua equipe de profissionais, que nos apoiaram no desenvolvimento deste trabalho.

À minha família: meus pais, Mutombo Magona Mafavisse e Isabel Saranhe Ribeiro Sande (*in memoriam*), pelos ensinamentos, e por terem me dado todas as condições e assistência desde os primórdios de minha vida, aos meus irmãos, que sempre me apoiaram e me deram força para que eu continuasse seguindo em frente, mesmo que distante de vocês.

À minha pequena princesa Brianna, minha filha, meu bem mais precioso, presente de Deus.

À minha esposa Francisca pelo apoio incessante, sempre compreensível e carinhosa.

À família Nogueira pelo apoio, atenção, amizade fraternal e acolhimento em Sorocaba.

Ao Inácio Jossitala Junior pelo acolhimento na cidade de Tete, pelo apoio incondicional na coleta de amostras em campo, pelo convívio fraterno e pela amizade.

Aos amigos do ICT-UNESP Diego Ortega, Francisco da Silva, Tsegaye, Darllan Collins, Leda, Alex, Ignácio, Diego Cola, Fabrício, Luís Ricardo. Aos amigos de Moçambique, Vanito Frei, Eduardo Helder, José Junior Kamphambe, Eduardo Bata, Brito Henriques Caetano e a todos amigos que torceram por mim e sempre estiveram ao meu lado.

A todos que de alguma forma tornaram possível esse trabalho.

MAFAVISSE, I. M. **Mapeamento e estratégias de controle de cargas antrópicas potencialmente poluidoras da mineração de carvão de Moatize**, Moçambique. 2018. 132 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, UNESP – Univ Estadual Paulista, Sorocaba, 2018.

RESUMO

A poluição do ar é considerada uma situação-tipo para o setor mineiro, apresentando aspectos clássicos de degradação do meio ambiente biótico e abiótico. O objetivo do trabalho é identificar áreas impactadas por material particulado da mineração do carvão e suas principais fontes emissoras em Moatize, propondo uma nova formulação de supressor de poeira de base vegetal como alternativa para reduzir a emissão de material particulado em mina a céu aberto. Através de metodologia cartográfica, buscou-se representar as áreas críticas contendo carga potencial poluidora, neste caso, partículas totais em suspensão (PTS) e material particulado respirável (MP₁₀) procedentes do processo e logística da exploração do carvão. As variações na qualidade do ar em torno das áreas de mineração do carvão em Moatize foram avaliadas durante o período de 2015 em cinco locais e em duas estações do ano. Os dados de campo mostraram que as áreas mais impactadas pelas emissões difusas de partículas totais em suspensão (PTS) e material particulado com diâmetro ≤ 10 (MP₁₀) devido à atividade de mineração do carvão em Moatize são Liberdade, Carbomoc, Minas Moatize e 25 de setembro. Este último é o mais impactado. Os dados revelaram ainda níveis de concentração de material particulado acima dos padrões estabelecidos no Regulamento de Normas de Qualidade Ambiental e Decreto de Emissão de Efluentes nº 67/2010 vigente em Moçambique. As concentrações de PTS atingiram 569 $\mu\text{g m}^{-3}$ no mês mais crítico. As análises de elementos principais e de elementos maiores e traço no carvão bruto foram realizadas por Análise Elementar CHN e Espectroscopia de Emissão óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP OES). Na formulação básica do supressor de poeira foi examinado o supressor de extrato de *Pinus* e ácido γ -poliglutâmico (γ -PGA). A nova formulação contendo ácido γ -poliglutâmico resultou em supressor de poeira de base vegetal, biodegradável. A interface entre a matriz de carvão mineral e a película supressora foi examinada por microscopia confocal de varredura a laser. Na caracterização do supressor de poeira foram utilizadas técnicas de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia no infravermelho. O gênero *Pinus* é uma matéria-prima abundante, renovável e de baixo custo, que possui potencial químico para o desenvolvimento de novos produtos de alto valor agregado. Os resultados iniciais são promissores e representam não apenas uma vantagem ambiental, mas também um ganho importante para as comunidades localizadas nas imediações das minas de carvão.

Palavras-chave: carvão mineral, Moatize, material particulado, qualidade do ar, supressor de poeira.

MAFAVISSE, I. M. **Mapping and strategies to control potentially polluting anthropogenic from coal mining in Moatize, Mozambique**. 2018. 132 f. Thesis (Doctorate in Environmental Sciences) - Sorocaba Institute of Science and Technology, UNESP - Univ Estadual Paulista, Sorocaba, 2018.

ABSTRACT

Air pollution is considered a standard situation for the mining sector, presenting classic aspects of degradation of the biotic and abiotic environment. The objective of this work is to identify areas impacted by coal mining particulate matter and its main source sources in Moatize, proposing a new formulation of a dust suppressant which is plant base with an alternative to suppress the particulate matter in an open pit mine. By means of cartographic methodology, we intend to represent the critical areas with potential pollutant load, in this case, total suspended particulate (TSP) matter and respirable particulate matter (PM₁₀) from the process and logistic of the coal exploitation. The variations in air quality around the coal mining areas at Moatize were assessed over the 2015 period at five sites and two seasons. The field data showed that the areas most impacted by the diffuse emissions of TSP matter and PM₁₀ particulate due to the coal mining activity in Moatize are Liberdade, Carbomoc, Minas Moatize on September 25. The latter is the most impacted. The data also revealed a high concentration of particulate matter in these areas, with levels above the standards established in the Regulation of Environmental Quality Standards and Wastewater Emission Decree No. 67/2010 in force in Mozambique. The PTS concentrations reached 569 $\mu\text{g m}^{-3}$ in the most critical month. The analyzes of major elements and major elements and trait in crude coal were performed by CHN elementary and inductively coupled plasma optical emission spectrometers (ICP OES). In the basic formulation of the dust suppressant the extract suppressor of *Pinus* and γ -polyglutamic acid (γ -PGA) was examined. The new formulation containing γ -polyglutamic acid resulted in a biodegradable plant-based dust suppressant. The interface between the charcoal matrix and the suppressor film was examined by a laser scanning confocal microscopy. In the characterization of the dust suppressor, scanning electron microscopy and infrared spectroscopy techniques were used. The *Pinus* genus is an abundant, renewable and low-cost raw material that has chemical potential for the development of new products with high added value. The initial results are promising and represent not only an environmental advantage, but also a significant gain for communities located in the vicinity of coal mines.

Keywords: mineral coal, Moatize, particulate matter, air quality, dust suppressant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Breu comercial utilizado na formulação de supressor de poeira.	47
Figura 2 - Fórmula estrutural do breu	47
Figura 3 - Estruturas dos ácidos diterpênicos.....	48
Figura 4 - Distrito de Moatize, Moçambique.	52
Figura 5 - Área de estudo, Posto Administrativo de Moatize.	53
Figura 6 - Valores de precipitação média mensal, 1985-2015 – Estação meteorológica de Tete.	54
Figura 7 - Umidade relativa média mensal do ar, 1985-2015 – Estação Meteorológica de Tete.	55
Figura 8 - Relevo de Posto Administrativo de Moatize, Moçambique.....	57
Figura 9 - Sequência estratigráfica da Bacia Carbonífera de Moatize.....	66
Figura 10 - Diagrama simplificado de produção do carvão – Vale, Moatize	68
Figura 11 - Operações de lavra à céu aberto de carvão e emissão de PTS	69
Figura 12 - Localização de pontos de amostragem, PA.....	71
Figura 13 - Fluxograma de atividades da pesquisa realizadas em campo, gabinete e laboratório	80
Figura 14 - Pontos amostrais de PTS, minerações de carvão.....	82
Figura 15 - Áreas de maior influência da mineração.....	83
Figura 16 - Relevo da área de influência direta da mineração.	84
Figura 17 - Área sem influência direta da mineração, Cateme.	85
Figura 18 - Comparação das áreas impactadas por PTS no PA de Moatize – 2015.....	86
Figura 19 - Concentração diária de PTS no primeiro trimestre, Bairro 25 de setembro – 2015.	87
Figura 20 - Concentração diária de PTS no segundo trimestre, Bairro 25 de setembro – 2015.	87
Figura 21 - Concentração diária de PTS no terceiro trimestre, Bairro 25 de setembro – 2015.	88
Figura 22 - Concentração diária de PTS no quarto trimestre, Bairro 25 de setembro – 2015.	89
Figura 23 - Meses com concentrações de PTS excedidas, PA de Moatize – 2015.	90
Figura 24 - Concentração diária de PTS no mês de agosto de 2015.	91
Figura 25 - Concentração de MP ₁₀ média anual em 2015.....	92
Figura 26 - Rosa dos ventos – Moatize - 2003 a 2016.....	94

Figura 27 - Rosa dos ventos do verão – Moatize – 2015.....	95
Figura 28 - Rosa dos ventos de inverno – Moatize – 2015.....	96
Figura 29 - Eletromicrografias obtidas em detector de elétrons secundário no microscópio eletrônico de varredura, apresentando morfologia externa do carvão bruto	103
Figura 30 - Eletromicrografias obtidas em detector de elétrons retroespalhados no microscópio eletrônico de varredura para análise de composição química em camadas profundas do material	104
Figura 31 - Espectrogramas de EDS obtido de uma amostra de carvão mineral, Moatize	105
Figura 32 - Espectrogramas de EDS obtido de uma amostra de carvão mineral, Moatize	105
Figura 33 - Análise de DRX do carvão bruto.....	106
Figura 34 - Curvas TGA e DTG do pinus.	108
Figura 35 - Espectro de infravermelho do breu procedente <i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i> como matéria-prima para formulação do supressor de poeira.	109
Figura 36 - Eletromicrografia de varredura do breu.	111
Figura 37 - Tempo de molhagem para supressor de base vegetal sobre superfície do carvão mineral.....	113
Figura 38 - Espectro de infravermelho do copolímero fluorado.	114
Figura 39 - Espectro de infravermelho comparativo da formulação do supressor de poeira com as bandas indicando a presença de breu e γ -PGA.....	115
Figura 40 - Espectro de infravermelho da formulação do supressor de poeira, primeira formulação.....	116
Figura 41 - Espectro de infravermelho da formulação do supressor de poeira, segunda formulação.....	117
Figura 42 - Sequência de imagens obtidas para determinação do comprimento de onda de excitação ideal para o supressor de poeira.	118
Figura 43 - Micrografia confocal a laser do supressor de poeira de base vegetal, primeira formulação.....	119
Figura 44 - Micrografia confocal a laser do supressor de poeira sobre o material particulado, poeira de carvão, primeira formulação.....	121
Figura 45 – Imagem obtida em microscópio confocal com aumento de a) 50x e b) 500x. Esta técnica foi utilizada para caracterização topográfica de superfície do carvão mineral após receber camada de supressor de poeira.	122

Figura 46 - Imagem confocal aumento a) 100x e b) 100 x ISM 75%. Esta opção permite o uso do microscópio para captação de imagem do supressor de poeira sobre os grãos de carvão mineral.....	124
Figura 47 - Supressor de poeira em erlenmeyer de 125mL e pó de carvão em base de 19cm de diâmetro.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrões de qualidade do ar, Moçambique	38
Tabela 2 - Padrões de qualidade do ar em vigor em Moçambique e no Brasil Para material particulado	39
Tabela 3 - Principais empresas na pesquisa e exploração do carvão em Tete	65
Tabela 4 - Pontos amostrais de partículas totais em suspensão.....	70
Tabela 5 - Matriz de correlação envolvendo materiais particulados e parâmetros meteorológicos.....	97
Tabela 6 - Categorias de avaliação da correlação de Pearson.....	98
Tabela 7 - Análise de carvão bruto	99
Tabela 8 - Determinação de elementos no carvão bruto	99
Tabela 9 - Elementos no carvão bruto em mg kg ⁻¹	101
Tabela 10 - Elemento na poeira do carvão em % e ppm.....	101
Tabela 11 - Distância interplanar dhkl (em nm).....	106
Tabela 12 - Resultados de CHN de Pinus em percentagem.....	107
Tabela 13 - Análise de rendimento de breu, terebintina e impureza em %, além do n° de acidez após destilação da resina de Pinus elliottii var. elliottii	110
Tabela 14 - Análise CHN em % do breu.....	110
Tabela 15 - Bandas observadas em FTIR (cm ⁻¹) para e γ -PGA sódico da Shandong Freda Biotchenology, como material de referência e da formulação do supressor de poeira, contendo breu e γ -PGA.	115

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes e condição de estabilidade atmosférica	28
Quadro 2 - Benefícios de ecossistemas e efeitos de material particulado sobre seus componentes	32
Quadro 3 - Fonte, características e efeitos ambientais do material particulado	33
Quadro 4 - Efeitos de partículas totais em suspensão na saúde humana	35
Quadro 5 - Estrutura do índice de qualidade do ar e efeitos de poluentes à saúde humana.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS

Al	= Alumínio
ANOVA	= Analysis of Variance
ASTM	= <i>American Society of Testing Materials</i>
AW	= Clima Tropical chuvoso de Savana
BSw	= Clima do tipo Seco de Estepe com inverno seco
CIT	= Convergência intertropical
DRX	= Difração de Raio X
EDS	= Sistema de Energia Dispersiva
FTIR	= Fourier Transform Infrared Spectroscopy
HRPM	= High-risk respireble fraction
ICP OES	= Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry
INAM	= Instituto Nacional de Meteorologia
IPM	= Inhalable Particulate Matter
IQAr	= Índice de qualidade do ar
KBr	= Brometo de Potássio
MEV	= Microscopia Eletrônica de Varredura
MP	= Material particulado
MP ₁₀	= Material particulado tamanho aerodinâmico ≤ 10
Mt	= Milhões de toneladas
OMM	= Organização Mundial de Meteorologia
OMS	= Organização Mundial da Saúde
PA	= Posto Administrativo
pH	= Potencial Hidrogeniônico
PQAr	= Padrão de qualidade do ar
PTS	= Particulado Total em Suspensão
ROM	= Run of maine
USEPA	= United States Environmental Protection Agency
γ -PGA	= Ácido γ -poliglutâmico
μm	= Micrômetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
2 OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	21
3.1 CARVÃO MINERAL OU NATURAL	21
3.1.1 MINERAÇÃO DO CARVÃO.....	22
3.1.2 MINERAÇÃO DO CARVÃO E MEIO AMBIENTE	22
3.2 MATERIAL PARTICULADO.....	24
3.3 PRINCIPAIS CONDIÇÕES NA POLUIÇÃO DO AR POR MATERIAL PARTICULADO	25
3.3.1 PARÂMETROS METEOROLÓGICOS NA POLUIÇÃO DO AR POR MATERIAL PARTICULADO	26
3.4 EFEITOS AMBIENTAIS DO MATERIAL PARTICULADO.....	31
3.5 EFEITOS DO MATERIAL PARTICULADO NA SAÚDE	34
3.6 ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR.....	36
3.7 PADRÕES LEGAIS DE QUALIDADE DO AR.....	37
3.8 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA, SUPRESSOR DE POEIRA.....	39
3.8.1 EXTRATO VEGETAL DE <i>PINUS ELLIOTTII</i>	45
3.8.2 ÁCIDO γ -POLIGLUTÂMICO.....	49
3.8.3 ALGINATO DE SÓDIO.....	50
4 ÁREA DE ESTUDO	52
4.1 MEIO FÍSICO	54
4.1.1 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE MOATIZE.....	54
4.1.2 VEGETAÇÃO.....	56
4.1.3 ENQUADRAMENTO GEOMORFOLÓGICO	56
4.1.4 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO	57
4.1.5 MINERALOGIA.....	59
4.1.6 SOLOS.....	60
4.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO CARVÃO DE MOATIZE.....	61
4.3 HISTÓRICO DE MINERAÇÃO DO CARVÃO DE MOATIZE.....	62
4.4 PROCESSO DE MINERAÇÃO DO CARVÃO EM MOATIZE	64
5 MATERIAL E MÉTODOS	70
5.1 AMOSTRAS OBTIDAS	70

5.2 LOCAL DE AMOSTRAGEM.....	70
5.3 EQUIPAMENTO DE AMOSTRAGEM	72
5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	73
5.5 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO DE MOATIZE	74
5.5.1 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CARVÃO DE MOATIZE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	74
5.5.2 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO ESTRUTURAL DO CARVÃO POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.....	75
5.5.3 DETERMINAÇÃO DE ELEMENTOS DO CARVÃO E NA POEIRA DO CARVÃO POR CHN E ICP OES	75
5.6 OBTENÇÃO DA RESINA DE <i>PINNUS</i> E EXTRAÇÃO DO BREU	75
5.6.1 DETERMINAÇÃO DA ESTRUTURA MORFOLÓGICA DO BREU POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	76
5.6.2 DETERMINAÇÃO DE GRUPOS FUNCIONAIS DO BREU POR ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO	76
5.6.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	77
5.6.4 CARACTERIZAÇÃO DO SUPRESSOR DE POEIRA POR MICROSCOPIA CONFOCAL DE VARREDURA A LASER.....	77
5.7 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL – FORMULAÇÃO DO SUPRESSOR DE POEIRA.....	78
5.7.1 AGENTES EXPERIMENTAIS	78
5.8 SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DO SUPRESSOR DE POEIRA.....	78
5.8.1 PREPARAÇÃO DE SUPRESSOR DE POEIRA DE CARVÃO.....	79
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
6.1 ÁREAS CONTENDO MATERIAIS PARTICULADOS ORIUNDO DA EXPLOTAÇÃO DE CARVÃO EM MOATIZE.....	81
6.1.1 PARTÍCULAS TOTAIS EM SUSPENSÃO NO POSTO ADMINISTRATIVO DE MOATIZE.....	81
6.1.2 CARGAS PTS NO BAIRRO 25 DE SETEMBRO.....	86
6.1.3 CARGAS MP ₁₀ NO POSTO ADMINISTRATIVO DE MOATIZE	91
6.1.4 REGIME DOS VENTOS DA ÁREA DE ESTUDO	93
6.1.5 ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES MÁSSICAS DE PTS E PARÂMETROS METEOROLÓGICOS NO PA DE MOATIZE	96
6.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO CARVÃO BRUTO.....	98
6.2.1 ANÁLISE DE ELEMENTOS NO CARVÃO DE MOATIZE.....	98
6.2.2 ANÁLISE DO CARVÃO BRUTO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	103

6.2.3 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	106
6.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DO SUPRESSOR DE POEIRA.....	107
6.3.1 CARACTERÍSTICAS DO BREU.....	107
6.3.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICO DO <i>PINUS</i>	107
6.3.3 ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO DO BREU	108
6.3.4 ANÁLISE POR CHN DO BREU.....	109
6.3.5 FORMULAÇÃO DO SUPRESSOR DE POEIRA.....	112
6.3.7 ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO DO SUPRESSOR DE POEIRA.....	115
6.3.8 ANÁLISE POR MICROSCOPIA CONFOCAL DE VARREDURA A LASER DO SUPRESSOR DE POEIRA	117
7 CONCLUSÕES.....	127
REFERÊNCIAS.....	129

1 INTRODUÇÃO

Embora a humanidade desfrute de algumas vantagens dos progressos tecnológicos alcançados nas últimas décadas nos mais variados campos em que o homem atua, hoje é confrontada com problemas ambientais em escala local e global que tiveram origem no padrão de produção e de consumo dos países industriais, os quais tem gerado a degradação ambiental, afetando a capacidade da natureza de prover os serviços e funções essenciais à vida.

A degradação da qualidade do ar representa um importante fator de ameaça à saúde humana. De acordo com a Agencia Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) Agência da Organização Mundial da Saúde, em 2013, classificou a poluição do ar como carcinogênica para humanos (Grupo 1) e concluiu que o material particulado, separadamente, é comprovado quanto à carcinogenicidade e foi classificado também como Grupo 1.

Os impactos da poluição atmosférica sobre os ecossistemas também merecem atenção. A deposição dos poluentes atmosféricos na vegetação pode levar à redução da sua capacidade de fotossíntese, provocando na agricultura, por exemplo, a queda da produtividade agrícola. A acidificação das águas da chuva e da poeira contaminam os recursos hídricos, os biomas aquáticos e o solo, também são uma consequência da introdução antrópica dos poluentes na atmosfera.

A energia é em grande parte produzida pela queima de combustíveis fósseis, entre os quais se destacam o carvão, petróleo e gás natural (VEZIROGLU e SAHIN, 2008). O carvão fornece 30% das necessidades globais de energia primária e gera cerca de 42% da eletricidade do mundo. Também é utilizado na produção de mais de 70% do aço do mundo. A produção total mundial de carvão atingiu um nível recorde de mais de 7212 milhões de toneladas (WORLD COAL ASSOCIATION, 2017).

Moçambique possui quantidades consideráveis de recursos naturais, dos quais a maior parte ainda não foi efetivamente explorada. “E em função dessa constatação, o Governo está determinado em facilitar a extração e exportação dos recursos naturais o mais rapidamente possível, supondo que estes irão contribuir positivamente para o crescimento econômico e na redução da pobreza” (BUCUANE e MUELDER, 2007). A prospecção e exploração em grande escala, de recursos naturais extrativos em Moçambique, poderá levar a impactos ambientais negativos irreversíveis. A poluição do ar, solo e água devido à mineração e transportes, o desmatamento, a perda da biodiversidade, o aumento das emissões na atmosfera e mudanças nas terras aráveis do Rio Zambeze, estão entre os graves problemas ambientais que poderão resultar da indústria extrativa em Moatize (UNITED NATIONS MOZAMBIQUE, 2013).

Nos últimos anos, tem-se verificado a intensificação do processo de lavra de carvão na Zona Franca Industrial de Moatize. A mineração de carvão é a principal atividade extrativa em Moatize e desempenha um papel importante na economia local e do país. Contudo, estas atividades de mineração contribuem direta ou indiretamente para a poluição do ar.

A área de estudo foi escolhida devido ao conhecimento prévio da sua importância econômica, por ostentar bastante carvão mineral e pela existência de uma gama de empresas transnacionais instaladas que desenvolvem atividades de exploração do carvão, entre várias companhias mineradoras instaladas em Moatize destaque vão para Vale Moçambique, *International Coal Venture Limited*, *Beacon Hill Resources Company*, Rio Tinto Zabeze, Minas de Rovubué, *Eta Star*, *Coal Indian African* e *Capitol Resources* e conta com maior concentração do Investimento Direto Estrangeiro destinado aos recursos minerais do país, bem como pela degradação do ar gerada pelas atividades de mineração.

As fontes de poluição do ar nas áreas de mineração de carvão geralmente incluem as etapas de perfuração, explosão, jateamento, trituração, transporte do carvão, plantas de manuseio de carvão, fachadas expostas e oficinas (CMRI, 1998). Os principais poluentes atmosféricos devidos à mineração a céu aberto são partículas totais suspensas (PTS) e materiais em partículas respiráveis (MP₁₀) (SINHA e BANERJEE, 1997; CMRI, 1998).

A qualidade do ar e as variações sazonais em Moatize são descritas revelando um elevado potencial de poluição devido às partículas totais em suspensão. Um dos principais desafios consiste em minimizar estas emissões para atmosfera causadas pelas atividades mineradoras do carvão. Portanto, a prevenção dos efeitos deletérios da poluição atmosférica em Moatize passa por identificar os materiais particulados, os níveis expressos em termos de valores de sua concentração no ar, áreas críticas e propor estratégia para manter níveis de concentração minimamente seguros de proteção das condições de saúde da população e do meio ambiente.

Nesta pesquisa se pretendeu identificar as áreas potencialmente impactadas por material particulado da mineração do carvão, propondo uma nova formulação de supressor de poeira de base vegetal como estratégia alternativa de redução de material particulado em mina a céu aberto em Moatize.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Identificar áreas potencialmente impactadas por material particulado da mineração do carvão, propondo uma nova formulação de supressor de poeira de base vegetal como estratégia de controle de material particulado em mina a céu aberto em Moatize.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar área de exploração do carvão mineral do Distrito de Moatize;
- Determinar os níveis em valores de concentrações de partículas totais em suspensão no ar oriundas da atividade mineradora;
- Analisar os regimes dos ventos locais na dispersão e transporte do material particulado gerado nas minerações;
- Representar a cartografia de áreas críticas contendo carga potencial poluidora, neste caso, PTS e MP₁₀ procedentes da exploração do carvão;
- Determinar a composição em elementos maiores e elementos traço nas amostras do carvão e da poeira do carvão de Moatize;
- Elaborar nova formulação do supressor de poeira de base vegetal, utilizando-se ácido γ -poliglutâmico e *Pinus elliottii* var. *Elliottii*, como matéria prima.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Carvão mineral ou natural

A norma ISO 11760 (2005) adota a seguinte definição para carvão: “rocha sedimentar carbonosa, fundamentalmente derivada da acumulação e preservação de restos vegetais, com matéria mineral associado correspondendo a um teor em cinzas inferior ou igual a 50%, em massa, expresso na base seco (SOUSA et al., 2012).

Carvão mineral é um combustível fóssil, em rocha sedimentar, de mistura heterogênea e complexa de constituintes orgânicos e inorgânicos, extraída da terra por meio da mineração. A sua formação é decorrente de restos de vegetação que foi consolidado entre outras camadas de rocha e alterados pelos efeitos combinados de diversos fatores como temperatura, chuva, vento, pressão e calor que sofrem alterações, numa fase inicial biogeoquímicas e posteriormente geoquímicas, ao longo do tempo geológico (COLLAZZO, 2013).

Outras definições referem que o carvão é considerado rocha combustível, essencialmente constituída por restos vegetais geradas em bacias sedimentares pouco profundas e mais ou menos confinados ao abrigo do ar, sob ação de bactérias anaeróbicas em um período longo de evolução (CARVALHO, 2006). Para Suguio (1998), é uma rocha combustível, resultante de restos vegetais continentais e subaquáticos, acumulados em antigos ambientes paludiais, sob atuação de processos diagenéticos induzidos por calor e pressão, principalmente devidos ao soterramento profundo.

O carbono é o principal componente do carvão, mas este contém quantidades variadas de outros componentes como o hidrogênio, oxigênio, enxofre e outras impurezas, formando cinzas.

Os principais parâmetros utilizados para definir o carvão são o poder calorífico, cinzas, umidade e enxofre. O carvão mineral é subdividido de acordo com o poder calorífico e a incidência de impurezas, podendo ser classificado como linhito e sub-betuminoso, considerado de baixa qualidade e betuminoso ou hulha e antracito, considerado de alta qualidade. A formação do carvão mineral obedece quatro etapas distintas, das quais a turfa é composição inicial, medida pelo reduzido teor de carbono, o linhito, o betuminoso e o antracito seguem em ordem crescente de acordo com *rank* (CANO, 2009). Portanto, a qualidade do carvão é determinada pelo conteúdo de carbono, que aumenta com os estágios de carbonificação (WCI, 2007).

3.1.1 Mineração do carvão

O carvão é um dos combustíveis fósseis mais abundantes disponíveis em todo o mundo e atende a uma grande parte da necessidade de energia para o consumo humano. É usado em várias indústrias, como usina de energia, aço, cimento, alumina e para uso doméstico, fornecendo cerca de 42% da eletricidade para o mundo (XIA; XIE; PENG, 2015). Mais de 7212 milhões de toneladas de carvão são atualmente produzidas em nível global (WORLD COAL ASSOCIATION, 2017).

Existem basicamente dois tipos de atividades de mineração de carvão, mineração a céu aberto e mineração subterrânea. A mineração a céu aberto também é conhecida como mina aberta ou mineração de superfície. Envolve a remoção de terra e pedras para chegar ao carvão enterrado perto da superfície. Em muitos casos, as rochas são literalmente explodidas para alcançar costuras de carvão finas, em um processo do qual resulta alterações permanentes na paisagem. A mineração de superfície representa cerca de 40% das minas de carvão do mundo, e em alguns países, como Austrália, as minas abertas representam 80% das minas. Embora seja altamente destrutivo, a indústria muitas vezes prefere a extração de superfície, pois requer menos mão-de-obra e produz mais carvão do que a mineração subterrânea. A mineração de carvão gera danos ambientais ao abastecimento de água, *habitats* destruídos e má qualidade do ar (DONTALAA, REDDYB, VADDEC, 2015).

Os principais poluentes do ar devido à mineração a céu aberto são partículas totais em suspensão e partículas respiráveis (PM₁₀) (SINHA e BANERJEE, 1997; CMRI, 1998), em contraste com as emissões de veículos onde o chumbo e os poluentes gasosos são a maior preocupação (MEENALBAL e AKIL, 2000; ALMBAUER et al., 2001).

3.1.2 Mineração do carvão e meio ambiente

Historicamente a mineração do carvão mineral sempre foi problemática devido a degradação do meio ambiente associada às atividades de extração, beneficiamento e queima do carvão, embora o mesmo seja um dos recursos energéticos mais importantes. Entre os impactos gerados pela exploração do carvão, destacam-se a degradação paisagística, emissão de partículas de poeira, drenagem ácida, poluição das águas e combustão espontânea do carvão.

As atividades de extração causam além do desmatamento, alteração da superfície topográfica e da paisagem. Este impacto é mais notório, porque pode ser percebido mesmo que não se tenham feitos estudos ou investigações a respeito. A degradação paisagística não só

causa alterações da paisagem, mas também, causam mudanças no sistema nutritivo do ecossistema. A atividade de mineração, em particular, envolve a remoção da cobertura vegetal dos solos, escavações no subsolo, construção de túneis, valas, poços e sarjas, que resultam na alteração do habitat natural assim como da paisagem. Esta situação ocorre também nas minas de carvão de Moatize, onde ainda há poucos estudos feitos sobre a degradação paisagística das explorações mineiras que estão em curso e que tendem a crescer (MANHARAJE, 2014).

A mineração do carvão com frequência contribui diretamente ou indiretamente para o problema da poluição do ar em função da emissão de particulados suspensos para o meio ambiente, produzidas pela atividade de lavra, beneficiamento e transporte, o que afeta significativamente as condições do ambiente e da população circunvizinha. Em relação aos carvões da bacia carbonífera de Moatize, pouco se sabe sobre os impactos das poeiras destas minas, tanto na saúde do trabalhador, como na saúde das populações vizinhas, haja vista que a mina esteve parada aproximadamente durante duas décadas e após a sua reativação em 2004, não se encontram disponíveis estudos feitos sobre esta temática (MANHARAJE, 2014).

A indústria extrativista de carvão faz parte do grupo de indústrias potencialmente poluidoras das águas subterrâneas. Dentre vários, um dos problemas ambientais decorrente da contaminação das águas subterrâneas em minas de carvão é a drenagem ácida (PONDJA, 2013).

Outro problema ambiental decorrente da extração do carvão é a explosão espontânea de uma mina devido a concentração de metano. A combustão espontânea pode ocorrer em locais cujo ambiente de trabalho é favorável a criação de uma “Atex” (Atmosfera explosiva). O metano é o gás mais comum em minas de carvão, podendo também ser encontrado em outras minas tais como minas de potássio, calcário, sal e xisto. Durante a formação da camada de carvão, o metano é produzido junto com o dióxido de carbono, hidrocarbonetos e outros gases inertes. A quantidade de metano depende da temperatura, pressão, grau de fraturamento, permeabilidade do carvão e da camada adjacente. Pode existir como gás nas fissuras da rocha ou estar adsorvido na superfície do próprio carvão. O metano é liberado devido à diminuição da pressão, particularmente causada por extrações em áreas vizinhas, o que causa um distúrbio nas condições de equilíbrio. O metano em mistura com o ar na proporção de 5% a 15% torna-se altamente explosivo sendo que em outras proporções tem uma dificuldade de ignição e simplesmente provoca uma situação de desconforto no ambiente subterrâneo (MCPHERSON, 2001).

3.2 Material particulado

São denominados material particulado todas as partículas sólidas ou líquidas (aerossóis), encontradas sob uma extensa gama de tamanhos, emitidas por fontes de poluição do ar ou mesmo aquelas formadas na atmosfera. Quando elas estão dispersas no ar, formam os chamados aerossóis (GODISH, 1991). As partículas em suspensão ou material particulado em suspensão são formados por uma combinação de frações sólidas e ou líquidas no ar ambiente (LANDSBERGER e BIEGALSKI, 1995).

Material particulado é um poluente do ar que consiste em uma mistura de partículas sólidas e líquidas suspensas no ar. Essas partículas suspensas variam em tamanho, composição e origem (WHO, 2013). Para Lima (2007), o termo material particulado geralmente é utilizado quando se trata de partículas sólidas em suspensão. Quanto a sua origem pode ser natural (ressuspensão do solo, *spray* marinho e etc.) ou ainda proveniente das atividades humanas. As fontes antropogênicas mais comuns são as automotivas ou veiculares (móveis), as industriais, mineração e agrícolas (estacionárias ou fixas).

Material particulado em suspensão é qualquer substância, exceto água pura, que existe no estado sólido ou líquido na atmosfera, que sob condições normais, possui dimensões microscópicas, mas maior do que as dimensões moleculares (VASCONCELLOS, 1996). Em função da sua origem, o Material Particulado (MP) pode ser dividido em dois grupos: primário e secundário. As partículas primárias são produzidas através de processos químicos e físicos diretamente de fontes de poluição, enquanto que as partículas secundárias são formadas na atmosfera em decorrência de reações químicas envolvendo gases existentes.

As partículas são geralmente classificadas por suas propriedades aerodinâmicas porque: (a) essas propriedades governam o transporte e a remoção de partículas do ar; (b) elas também governam sua deposição dentro do sistema respiratório; e (c) estão associadas à composição química e às fontes de partículas. Estas propriedades são convenientemente resumidas pelo diâmetro aerodinâmico, que é o tamanho de uma esfera de densidade unitária com as mesmas características aerodinâmicas. As partículas são amostradas e descritas por sua concentração de massa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) com base em seu diâmetro aerodinâmico, geralmente chamado simplesmente de tamanho de partícula. Outros parâmetros importantes são a concentração numérica e área de superfície (WHO, 2013).

Essas partículas variam consideravelmente em tamanho, morfologia, propriedades físicas e composição química. A sua composição e tamanho dependem das fontes de emissão e dos processos físico-químicos que ocorrem no ambiente. Seu tamanho pode variar de

nanômetro (nm) a dezenas de micrômetros (μm) de diâmetro em suspensão no ar (MANAHAN, 2005). O tamanho é um dos parâmetros mais importantes para a caracterização do comportamento das partículas. As partículas mais estudadas são aquelas com diâmetro aerodinâmico $\leq 10 \mu\text{m}$, ou seja, material particulado inalável (MP_{10}), cujas partículas classificam-se em partículas grossas ($\text{MP } 2,5\text{-}10 \mu\text{m}$), partículas finas ($\text{MP } \leq 2,5 \mu\text{m}$) e partículas ultrafinas ($\text{MP } \leq 0,1 \mu\text{m}$) (FERREIRA; FORTI; ALVALÀ, 2011). Segundo Deriso (1992), existe o parâmetro poeira total em suspensão, definido como sendo composto de partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a $100\mu\text{m}$. É denominado poeira, toda partícula sólida, de qualquer tamanho, natureza ou origem, formada por ruptura de material original sólido, suspenso ou capaz de se manter suspensa no ar. Essas partículas geralmente possuem formas irregulares e são maiores que $0,5 \mu\text{m}$ (SANTOS e AMARAL, 2001). Entende-se por diâmetro aerodinâmico de partícula, o diâmetro de uma esfera de densidade unitária que possua a mesma velocidade de sedimentação da partícula em estudo (MANAHAN, 1994).

3.3 Principais condições na poluição do ar por material particulado

A concentração de material particulado e a magnitude do impacto deste na qualidade do ar é o resultado final de processo, sujeito a vários fatores, que compreendem não somente a emissão pelas fontes, como também suas interações físicas (diluição) e químicas (reações) na atmosfera.

Em determinada região, estes processos sempre dependem das condições atmosféricas dominantes, as quais são responsáveis pelo transporte, transformação e dispersão dos poluentes emitidos para a atmosfera, bem como pelas possíveis ocorrências de situações críticas de poluição do ar, provenientes de fontes industriais ou não (NEVES, 1999).

Os fatores que influem na severidade da poluição do ar podem ser classificados em duas grandes categorias, uma associada às atividades humanas e a outra ao meio natural. As pessoas planejam as tecnologias e selecionam as fontes de energia que conduzem às descargas poluidoras. Mas existe um conjunto de fatores naturais que influenciam a localização e severidade de um problema de poluição. Os mais importantes são meteorológicos, relacionados com a atmosfera e seus fenômenos, especialmente, o clima (SEWELL, 1978).

Eagleman (1991) destaca que as principais condições meteorológicas que podem afetar o processo de dispersão dos poluentes são os seguintes: pluviosidade, nebulosidade, altura da camada de mistura da atmosfera, temperatura, pressão atmosférica, estabilidade atmosférica,

direção e velocidade predominante dos ventos. É a interação entre os parâmetros meteorológicos e os poluentes suspensos no ar, as suas fontes de emissão que definem a qualidade do ar em determinada região. Essas interações, entretanto, variam no espaço e no tempo. Dessa forma, em uma determinada localidade ou região, para uma mesma emissão, mantidas as mesmas condições de lançamento para a atmosfera, pode-se obter concentrações diversas, dependendo das condições meteorológicas presentes e o tempo de duração do fenômeno, assim como essas variações de concentrações serão influenciadas por outros parâmetros ambientais (relevo da região, vegetação, edifícios existentes e das fontes emissoras).

O fator topográfico é de extrema importância na dispersão devido ao diferenciado comportamento térmico e variação da temperatura com a altitude, sendo que os topos de montanhas podem se aquecer e se resfriar mais rapidamente que os vales, reforçando circulações locais e inversão durante a noite. A presença de um vale é geralmente desfavorável à dispersão dos poluentes. As camadas de ar frio mais denso se acumulam no fundo dos vales acentuando a estabilidade e, portanto, facilitando o acúmulo dos poluentes.

Benson (1989) e Taseiko et al. (2009), fazem referência a morfologia do terreno que também afeta diretamente o processo de dispersão, de tal forma que os modelos de dispersão utilizados consideram a rugosidade do terreno e o tipo de solo e são levados em consideração na maioria dos modelos. A turbulência mecânica provocada pelo vento na sua instabilidade direcional e de velocidade, bem como a turbulência térmica, resultante das parcelas de ar superaquecido que sendo menos denso ascende da superfície sendo substituídas pelo ar mais frio, mais denso, em sentido descendente, são fatores determinantes no movimento dos poluentes na baixa troposfera, além da topografia e rugosidade do terreno (CAVALCANTI, 2010).

3.3.1 Parâmetros meteorológicos na poluição do ar por material particulado

O comportamento dos poluentes no ar, como foi referido anteriormente, está estritamente relacionado com as condições meteorológicas de uma determinada localidade ou região, seja ela urbana, rural ou industrial. Para Hughton (1998), o efeito da poluição atmosférica é determinado por um conjunto de parâmetros meteorológicos que atuam simultaneamente no sentido de aumentar, reduzir ou frear os níveis desta poluição em uma determinada localidade ou região. Observa-se que os elementos do clima estão interagindo continuamente com as massas aquáticas, os continentes e as atividades humanas.

A pressão atmosférica se refere ao peso de uma coluna de ar sobre determinada área da superfície terrestre, ou a força que o ar exerce sobre uma determinada área imediatamente adjacente ao solo. No geral, a pressão atmosférica é um importante parâmetro no que concerne à caracterização dos sistemas de circulação de larga e mesoescala.

As variações temporais da pressão atmosférica se dão sazonalmente, os seus valores são maiores no inverno do que no verão. Isso se dá porque durante o verão o aquecimento é mais intenso na superfície, criando movimentos verticais ascendentes, com formação de nuvens, contrapondo-se ao peso do ar atmosférico e reduzindo a pressão atmosférica sobre a superfície.

É importante destacar que as pressões atmosféricas mais altas contribuem para piora das condições de dispersão de poluentes. O ar frio, mais contraído, é mais pesado do que o ar quente. Uma massa de ar de altas pressões é geralmente composta de ar frio e pesada. Por outro lado, uma massa de ar de baixa pressão é composta de ar mais quente e menos pesada. O gradiente de pressão faz o ar se deslocar de zonas de alta pressão para zonas de baixa pressão, produzindo o vento (AHRENS, 1993). Gradiente de pressão é gerado por fatores térmicos e/ou mecânicos, embora estes nem sempre sejam distinguíveis (AYOADE, 2013).

O vento de superfície é o ar em movimento horizontal em relação à superfície terrestre. O vento é o elemento básico em todas as escalas de circulação atmosférica, decorrente do gradiente de pressão, da rotação da terra, temperatura e das diversas formas de energia, às quais a atmosfera é submetida. A direção do vento é definida como a direção de onde o vento sopra, ou seja, vento sul significa que o vento está soprando do sul para norte, considerando o observador como referencial fixo. O vento pode, eventualmente, soprar nas 16 direções existentes durante um ciclo de 24 horas, porém, ele passa a maior parte do tempo soprando em uma das direções conhecidas como direção preferencial ou predominante.

A representação gráfica do comportamento do vento é conhecida como a rosa dos ventos, que reúne, simultaneamente, a velocidade e a direção do vento e a frequência de ocorrência, apresentando os setores preferenciais de predominância do campo do vento sobre uma determinada região. O vento nesse caso, é o principal parâmetro para a dispersão do poluente em uma pluma gaussiana, quer pelo movimento médio do ar carregando os poluentes como pela difusão turbulenta do espaço tridimensional.

Vale ressaltar que a velocidade do vento é extremamente importante na diluição de contaminantes presentes no ar atmosférico. A ocorrência de ventos fracos, por exemplo, certamente irá influenciar na dispersão de poluentes, porventura presentes no ar de determinada região (CAVALCANTI, 2010). A turbulência é o movimento irregular do vento e frente a esta

condição meteorológica na atmosfera, os poluentes dispersam ou separam-se. A turbulência pode ser causada pela rugosidade da superfície sobre a qual o ar passa. Portanto, as árvores, edifícios e relevo do terreno podem provocar turbulência, e quanto mais altos estes elementos, maior a turbulência (LYRA, 2008).

Estabilidade está estritamente relacionado ao grau de equilíbrio de uma parcela de ar, que em seu movimento vertical tende a se elevar ou descer, dependendo da sua temperatura, pressão e densidade. Portanto, observa-se que quanto maior for a instabilidade da atmosfera, maior será sua capacidade de dispersão dos poluentes e que, em condições estáveis como por exemplo inversões térmicas, irão restringir a dispersão na direção vertical. A determinação das classes de estabilidade pode ser realizada, segundo dois métodos, Sigma – A e método de *Turner* (LYRA, 2008). Método do SIGMA-A (sA) - baseado na turbulência atmosférica, ou seja, no desvio padrão da variação horizontal do vento, descrito na publicação da U.S.EPA, denominada “*On-Site Meteorological Program Guidance For Regulatory Modeling Applications*” (EPA, 1987).

Existem seis classes de estabilidade atmosférica, que medem a turbulência horizontal, ou seja, o desvio padrão da direção do vento, apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Classes e condição de estabilidade atmosférica

Classes	Condição	Observação
1	Muito instável	Refere-se a condições instáveis que, em geral, ocorrem durante o dia.
2	Instável	
3	Pouco instável	
4	Neutra	À noite ou durante o dia
5	Pouco estável	Durante a noite
6	Estável	

Fonte: Adaptado da USEPA (1976)

O método empírico de *Turner* é baseado em uma estimativa do aquecimento da atmosfera, proveniente da radiação solar e da cobertura de nuvens. Este método apresenta alguns inconvenientes, como por exemplo, a dificuldade para obtenção de dados, entretanto, é muito eficiente se aplicado em estudo da meteorologia em tempo real. Os dados necessários para calcular as classes de estabilidade para cada hora, através do método de *Turner*, para uma determinada região, podem ser adquiridos através da OMM – Organização Mundial de Meteorologia. Já para o método Sigma-A, utilizam-se dados de estações meteorológicas locais (AWMA, 2000).

A estabilidade atmosférica é o parâmetro meteorológico utilizado para definir as condições de dispersão de uma área. É baseada no poder de diluição natural que o ambiente possui, em função da variação da temperatura com a altura (estabilidade estática), das trocas de calor entre a superfície do solo e o ar adjacente (turbulência térmica) e da velocidade do vento e o atrito, devido à rugosidade do terreno (turbulência mecânica) (CAVALCANTI, 2010).

Segundo Ayoade (2013), um volume ou uma massa de ar é considerado estável, neutro, ou instável quando submetido a algum impulso perturbador, respectivamente, retorna a sua posição original, permanece em sua posição perturbada ou se afasta de sua posição original quando desaparecer o impulso de perturbação. Num volume ou massa de ar estável a razão ambiental é menor do que a razão adiabática seca. Isto significa que se o ar é forçado a elevar-se, ele será sempre mais frio e mais denso do que o ar circundante e tenderá a retornar a seu nível original. Se tal ar é também forçado a descer, ele ganhará temperatura na razão adiabática seca e sempre mais quente e menos denso que o ar circundante. Desse modo tenderá a retornar a sua posição anterior, a menos que seja impedido de fazê-lo por alguma razão.

As condições para ocorrência de instabilidade são alta radiação solar e ventos de baixa velocidade. A condição de estabilidade ocorre na ausência de radiação solar, ausência de nuvens e ventos leves. Céu nublado ou ventos fortes caracterizam condição neutra da atmosfera.

Em meteorologia, o termo “precipitação” é utilizado para se referir a qualquer deposição em líquido ou sólido e derivado da atmosfera. Portanto, refere-se às várias formas líquidas e congeladas de água, como chuva, neve, granizo, orvalho, geada e nevoeiro (AYOADE, 2013). A precipitação desempenha a função de remover os poluentes presentes no ar, proporcionalmente à frequência e intensidade das chuvas. Geralmente este fenômeno é associado às penetrações de frentes frias que, além de ocasionar precipitações pluviométricas, promovem a intensificação dos ventos. Em locais onde o escoamento do ar é obstruído por barreiras formadas por grandes edifícios, serras, montanhas, a precipitação pluviométrica passa a ser o único mecanismo capaz de remover os poluentes do ar, uma vez que sob tais circunstâncias estes não sofrem a ação dos ventos. Portanto, importa ressaltar que, com a lavagem da atmosfera pela chuva, existe a transposição dos poluentes para o solo e águas superficiais (CAVALCANTI, 2010).

A evaporação é o processo contínuo de perda de água do solo nu, das superfícies aquáticas e através da transpiração das plantas (evapotranspiração) para a atmosfera. Faz-se geralmente uma distinção entre a evaporação e evapotranspiração. A chuva e a evaporação são os parâmetros que constituem o balanço hídrico de uma região, do qual se pode obter informações climatológicas importantes. Cavalcanti (2010), destaca que a evaporação atua

diretamente sobre os índices de umidade do ar, ou seja, a quantidade de água presente na atmosfera local, influenciando nas reações químicas de alguns poluentes.

Umidade é o termo usado para referir-se a quantidade de vapor d'água contido na atmosfera. Ele não abrange as outras formas nas quais a água pode estar presente na atmosfera, como na forma líquida e na forma sólida. Para Ayoade (2013), embora o vapor de água represente somente 2% da massa total da atmosfera e uma concentração máxima de 4% de seu volume, ele é o componente mais importante na determinação do tempo e do clima e, sua quantidade na atmosfera varia no tempo e no espaço, até 0%, em áreas quentes e áridas, até um máximo de 3% nas latitudes médias e 4% nos trópicos úmidos.

A umidade relativa é uma medida do quanto o ar está próximo do ponto de saturação. No âmbito da poluição atmosférica a umidade aumenta a massa e densidade das partículas, aumentando sua velocidade de queda. Segundo Cavalcanti (2010), alguns estudos destacam uma correlação entre o poluente ozônio e a umidade relativa do ar em algumas localidades. CETESB (2002), revelou que índice de umidade relativa do ar variando entre 30 e 70%, podem ser relacionados a episódios de poluição por ozônio na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). De uma forma geral, a umidade relativa na sua interação com as concentrações de poluentes na atmosfera, pode contribuir para maiores ou menores concentrações de determinados compostos e ou de partículas em suspensão em determinado momento em algumas localidades. Nisso, faz-se necessário ter em conta dois conceitos quanto à contaminação do ar atmosférico em dada região, em tempo determinado e distância percorrida pelo poluente: emissão e imissão dos contaminantes atmosféricos. Entre a emissão e imissão decorre em certo lapso de tempo, durante o qual se processa a propagação do contaminante na atmosfera, por um lado e por outro lado, a concentração ativa da substância nociva no local da imissão, pode não mais ser tão elevada como no local da emissão.

A concentração da imissão deve ser tanto menor quanto mais distante estiver o local da fonte de emissão e quanto maiores forem as possibilidades de diluição (fatores meteorológicos) das substâncias tóxicas no ar (CUNHA e GUERRA, 2012). Daí que foram definidos os conceitos de Concentração Máxima de Emissão (CME) e Concentração Máxima de Imissões (CMI), onde os valores de CME determina a quantidade máxima, de uma substância tóxica que pode ser expelida para a atmosfera, por uma fonte de emissão. Portanto, aqui também, deve-se considerar duas condições: a possibilidade técnica de purificação do ar desprendido e a toxidez das substâncias.

3.4 Efeitos ambientais do material particulado

Efeito visível do material particulado no meio ambiente é a deposição de partículas, principalmente poeira sobre os materiais e a vegetação. Nas edificações e monumentos, as partículas depositadas provocam descoloração, erosão, corrosão e decomposição de materiais de construção.

As condições de visibilidade na atmosfera são influenciadas pelas partículas em suspensão, podendo, dessa forma, afetar inclusive o clima, absorvendo as radiações solares e diminuindo sua incidência sobre a superfície terrestre (MELO, 1997).

Os efeitos potenciais de material particulado sobre a vegetação e os ecossistemas incluem desde impactos sobre as propriedades do sistema (estrutural e funcional) quanto nos diferentes níveis de organização biológica (organismos, população, comunidade e sistema) (SIGAL e SUTER, 1987).

São conhecidos os benefícios, bens e serviços providos pelos diferentes ecossistemas, tanto na esfera ambiental, como social e econômico (Quadro 2). Contudo, os efeitos do material particulado podem gerar enormes danos sobre estes. O impacto mais prejudicial do material particulado, a longo prazo pode vir a ser as consequências ambientais, como a redução da biodiversidade e a perda de “bens e serviços do ecossistema” (WESTMAN, 1977 e DAILY, 1997).

Quadro 2 - Benefícios de ecossistemas e efeitos de material particulado sobre seus componentes

Ecossistema	Bens	Serviços	Danos causados
Agroecossistemas	As culturas alimentares As culturas de fibras Recursos genéticos	Manter as funções de bacias hidrográficas limitadas (infiltração, controle de fluxo e proteção parcial do solo) Fornecem o habitat para pássaros, polinizadores e organismos do solo Sequestrar carbono atmosférico Geração de emprego	Necrose do tecido das folhas, caules e frutos, redução e/ou supressão da taxa de crescimento
Ecossistemas costeiros	Algas (para alimentação e uso industrial) Sal Recursos genéticos	Incubadoras / viveiros Manter a biodiversidade Diluir e tratar resíduos Fornecer portos e rotas de transporte Fornecer habitat selvagem e humano Geração de emprego Contribuir para beleza estética e recreação	Crescimento reduzido das espécies, o aumento da suscetibilidade a doenças, até a interrupção do processo produtivo.
Ecossistemas florestais	Madeira Lenha Água potável Irrigação Forragem Produtos não madeireiros (cipós, bambus, folhas, entre outros) Alimentos (mel, cogumelos, frutas e outras plantas comestíveis; jogo) Recursos genéticos Fluxo de água	Remover poluentes do ar, emitir oxigênio Ciclo de nutrientes Manutenção de várias funções de bacias hidrográficas (infiltração, purificação, controle de fluxo, e estabilização do solo) Manter a biodiversidade Sequestrar carbono atmosférico Moderar estado de tempos extremos e impactos Formação do solo Geração de emprego Fornecer habitat humano e da vida selvagem Contribuir beleza estética e recreação	Redução da penetração da luz solar, redução da capacidade fotossintetizadora por deposição das partículas nas folhas e danos à vegetação e contaminação da água. Crescimento reduzido, menos biomassa. Composição de espécies alterada.
Água doce	Água potável e para irrigação Peixe Hidroeletricidade Recursos genéticos	Diluir e remover resíduos Ciclo de nutrientes Manter a biodiversidade Fornecer habitat aquático Fornecer corredor de transporte Geração de emprego Contribuir beleza estética e recreação	Contaminação da água, danos a biodiversidade.
Ecossistemas pastagens	Pecuária (comida, jogo, couros e fibras) água potável e para irrigação Recursos genéticos	Manutenção de várias funções de bacias hidrográficas (infiltração, purificação, controle de fluxo e estabilização do solo) Ciclo de nutrientes Remover poluentes do ar e emitir oxigênio Manter a biodiversidade Formação do solo Sequestrar carbono atmosférico Fornecer habitat humano e da vida selvagem Geração de emprego Contribuir para beleza estética e recreação	Redução da penetração da luz solar, redução da capacidade fotossintetizadora por deposição das partículas nas folhas, danos à vegetação.

Fonte: World Resources Institute, 2000

A exposição a uma dada concentração de massa de material particulado no ar sobre as folhas das plantas e por meio de deposição pode levar a respostas citotóxicas muito diferentes, dependendo da combinação específica de partículas depositadas sobre a vegetação em causa (Quadro 3).

Quadro 3 - Fonte, características e efeitos ambientais do material particulado

Poluente	Características	Fontes principais	Efeitos gerais ao Meio Ambiente
Partículas inaláveis finas (MP _{2,5})	Partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc., que podem permanecer no ar e percorrer longas distâncias. Faixa de tamanho < 2,5 µm	Processos de combustão (industriais, veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera) como sulfato e nitrato, entre outros.	Danos a vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.
Partículas inaláveis (MP ₁₀)	Partícula de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 10 µm	Processos de combustão (industriais, veículos automotores), poeira ressuspensa, aerossol secundário (formado na atmosfera)	Danos a vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.
Partículas totais em suspensão (PTS)	Partícula de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 50 µm	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira de rua ressuspensa, queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol marinho e solo.	Danos a vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.

Fonte: Adaptado de CETESB, 2014

É importante ressaltar que o material particulado não é constituído por um único poluente, mas sim uma mistura heterogênea de partículas que diferem em tamanho, origem e composição química. Esta heterogeneidade é composta em grande parte por concentrações atmosféricas de sulfatos, nitratos, sais de amônio, e íons de hidrogênio encontradas na atmosfera, quer dissolvido em névoa ou como aerossóis líquidos ou sólidos (GRANTZ; GARNER; JOHNSON, 2003).

A poluição dos ecossistemas por material particulado ocorre por meio de deposição de partículas. Esta deposição atmosférica nos ecossistemas podem ocorrer por meio de três grandes eixos: (1) deposição úmida é o processo de remoção de partículas e gases da atmosfera através da chuva, neblina ou neve; (2) a deposição seca, muito mais lenta, consistindo na transferência de partículas e gases para todos os tipos de superfície (planta, solos, rochas, água e materiais) na ausência de chuva; e (3) deposição oculta, o processo no qual os gases poluentes têm a capacidade de se dissolver nas gotículas de água de nevoeiro e das nuvens (GRANTZ; GARNER; JOHNSON, 2003).

Segundo Marques (2008), as características da topografia e da vegetação exercem uma grande influência em todos estes tipos de deposição, verificando-se que o modo de deposição seca, em oposição ao de deposição úmida é o mais sensível às características da vegetação. A deposição de partículas e efeitos sobre a vegetação, inevitavelmente, incluem: (1) nitrato e sulfato e suas associações na forma de ácido e deposição acidificantes e (2) oligoelementos e metais, incluindo chumbo (USEPA, 1996).

3.5 Efeitos do material particulado na saúde

A poluição atmosférica é hoje reconhecida como um importante risco para a saúde. Em 1990, como em 2013, a poluição atmosférica foi o quarto fator de risco mortal para a saúde em todo o mundo, resultando em 4,8 milhões de mortes prematuras (THE WORLD BANK, 2016). Segundo Saldiva et al. (2013), se não houver implementação de novas medidas para reverter o cenário atual de poluição atmosférica por material particulado, a qualidade do ar continuará a se deteriorar globalmente e por volta de 2050 a poluição por material particulado será a principal causa ambiental de mortalidade prematura mundial. De acordo com as últimas estimativas disponíveis do THE WORLD BANK (2016), em 2013, 5,5 milhões de mortes prematuras em todo o mundo, 1 em cada 10 mortes totais, foram atribuídas a poluição do ar.

A meia vida dessas partículas na atmosfera é geralmente muito alta, uma vez que elas ficam suspensas e podem ser transportadas para longe do seu ponto de origem. Essa característica é muito importante, expondo tanto a população que estiver próxima à fonte como aquela situada distante, na mesma proporção (WILSON et al., 2000).

As definições das frações relevantes de material particulado foram propostas pela ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*), tendo sido adotadas internacionalmente (BRUNO, 2005), a saber:

- Fração inalável, IPM, é a fração mássica do material particulado atmosférico que é inalado através do nariz e da boca.

- Fração respirável de alto risco, HRPM, é a fração mássica de partículas inaláveis com impacto mais sensível aos idosos, enfermos e crianças.

A respeito dos efeitos do material particulado na saúde humana, estudos indicam que as partículas com diâmetros maiores que 10 μm ficam retidas no aparelho respiratório superior (nariz, faringe, laringe e traqueia). Porém, partículas menores que 2,5 μm podem alcançar o pulmão e se sedimentar nos alvéolos e na região traqueobrônquica (HINDS, 1982). As razões das partículas pequenas serem mais prejudiciais quando inaladas que as grandes são apresentadas a seguir (BAIRD, 2002):

- Como as partículas grossas sedimentam rapidamente, a exposição humana a essas partículas por inalação é reduzida;
- Quando inaladas, as partículas grossas são filtradas de modo eficiente pelo nariz e pela garganta e geralmente não são transportadas até os pulmões. Ao contrário, as partículas finas inaladas usualmente chegam até os pulmões e,

uma vez ali, podem ser adsorvidas nas superfícies das células, em razão disso, podem causar danos à saúde;

- A área superficial por unidade de massa para as partículas grandes é menor que para as pequenas, assim, quando comparamos uma mesma massa, a capacidade das partículas maiores em transportar moléculas de gás adsorvido até os órgãos do sistema respiratório, onde podem catalisar reações químicas e biológicas, é menor;
- Provoca ataque mais distribuído em muitos alvéolos.

Estima-se que aproximadamente 3% das mortes por complicações cardiopulmonar e 5% por câncer do pulmão são globalmente atribuídos ao MP. MP₁₀ e MP_{2.5} incluem partículas inaláveis que são pequenas o suficiente para penetrar na região torácica do sistema respiratório. Os efeitos de material particulado inalável na saúde estão bem documentados. Eles são devido à exposição tanto no curto prazo (horas, dias) quanto no longo prazo (meses, anos) e incluem (WHO, 2013):

- Morbidade respiratória e cardiovascular, como agravamento da asma, sintomas respiratórios e aumento de internações hospitalares;
- Mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias e por câncer de pulmão.

Os efeitos de material particulado na saúde humana variam de acordo com a concentração e grupo de pessoas ou população exposta a ele (Quadro 4).

Quadro 4 - Efeitos de partículas totais em suspensão na saúde humana

Concentração Partículas Totais em Suspensão ($\mu\text{ m}^{-3}$)	Qualidade do ar	Efeitos à saúde
0 – 80	Boa	
81 – 120 121 – 240	Regular Moderada	Pessoas de grupos sensíveis como crianças, idosos e portadores de doenças respiratórias e cardíacas podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população em geral não é afetada.
241 – 375	Inadequada	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupo sensível podem apresentar efeitos mais sérios à saúde.
376 – 625	Má	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda apresentar falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis.
626 - 875 > 875	Péssima Crítica	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: Adaptado de CONAMA (1990)

3.6 Índice de qualidade do ar

O Índice de Qualidade do Ar (IQAr) permite o aprimoramento dos parâmetros de classificação da qualidade do ar. A Agência de Proteção Ambiental (EPA) estabeleceu índices (*PSI – Pollutant Standards Index*) que tem por finalidade a padronização e divulgação de dados de qualidade do ar pelos meios de comunicação de forma acessível à população em geral. O IQAr pode ser definido como um sistema que transforma os valores das concentrações dos poluentes em números adimensionais, os quais tem uma relação direta com a qualidade do ar de uma dada região e de fácil divulgação (boa, regular, inadequada, má, péssima e crítica). Este índice é obtido por meio de uma função linear segmentada, onde os pontos de inflexão são os padrões de qualidade do ar.

Para efeito de divulgação é utilizado o índice mais elevado, ou seja, a qualidade do ar de uma estação é determinada pelo pior caso.

Após o cálculo do índice, a qualidade do ar pode ser classificada de acordo os principais efeitos para cada poluente atmosférico. A seguir são descritos os principais efeitos à saúde para cada fração de material particulado e os níveis expressos em termos de valores de sua concentração no ar (Quadro 5).

Quadro 5 - Estrutura do índice de qualidade do ar e efeitos de poluentes à saúde humana

Qualidade	Índice	MP ₁₀ (µg/m ³) 24h	MP _{2,5} (µg/m ³) 24h
N ₁ Boa	0 - 40	0 – 50	0 - 25
N ₂ Moderada	41 – 80	>50 – 100 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço	>25 – 50 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço
N ₃ Ruim	81- 120	>100 – 150 Pessoas com doenças respiratórias ou cardíacas, idosos e crianças têm os sintomas agravados. População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço	>50 – 75 Pessoas com doenças respiratórias ou cardíacas, idosos e crianças têm os sintomas agravados. População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço.
N ₄ Muito Ruim	121-200	>150 - 250 Aumento dos sintomas em crianças e pessoas com doenças pulmonares e cardiovasculares. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral	>75 - 125 Aumento dos sintomas em crianças e pessoas com doenças pulmonares e cardiovasculares. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral
N ₅ Péssima	>200	>250 Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e cardiovasculares, como infarto do miocárdio.	>125 Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e cardiovasculares, como infarto do miocárdio.

Fonte: CETESB, 2015

3.7 Padrões legais de qualidade do ar

Os padrões de qualidade do ar exercem o papel essencial na gestão da qualidade do ar, pois se constituem no referencial básico para o estabelecimento de metas e de instrumentos legais de gestão da qualidade do ar. Dada a relevância dos padrões na gestão da qualidade do ar, é importante que os mesmos estejam em consonância com o conhecimento científico a respeito dos impactos da poluição atmosférica e dos danos à saúde humana e ao meio ambiente.

Os padrões de qualidade do ar definem legalmente os limites máximos para a concentração de poluente em componente atmosférico que garanta a proteção da saúde e do meio ambiente. São estabelecidos dois tipos de padrões de qualidade do ar: Padrão Primário e Padrão secundário e, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), cabe a cada país estabelecer seus próprios padrões de qualidade do ar em função de suas especificidades, ou seja, os governos, ao formular políticas, devem considerar suas próprias circunstâncias ao invés de empregar diretamente os *guidelines* como padrão. Portanto, variações podem ocorrer em função do nível de desenvolvimento do país, dos riscos existentes à saúde, da viabilidade tecnológica, de considerações econômicas e de outros fatores sociais e político (WHO, 2000).

Nesse caso, os padrões primários são concentrações de material particulado atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população, podendo ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de material particulados na atmosfera. Já os padrões secundários são entendidos como as concentrações de material particulado atmosférico abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano ao meio ambiente em geral (WHO, 2006).

A OMS, na sua última atualização das recomendações em 2005, dentre vários poluentes, considerou o MP₁₀ e MP_{2,5}, estabelecendo os valores-guia e adoção de valores intermediários temporários para estes, com o intuito de viabilizar a adoção progressiva dos valores-guia pelos países, conforme suas especificidades e estrutura de gestão da qualidade do ar.

Deve-se ressaltar que o processo de definição dos PQAs não se resume à identificação dos níveis de concentração obrigatória, devendo contemplar também critérios para aferição do seu atendimento em determinada região (monitoramento) e o modo de coleta, tratamento e disponibilização dessa informação para o gestor público e para a sociedade (WHO, 2006).

Nesse caso, o Governo de Moçambique através do regulamento no seu artigo 7, do decreto n.º 18/2004, de 2 de Junho no anexo I, definiu os parâmetros fundamentais que devem caracterizar a qualidade do ar para que este mantenha a sua capacidade de auto-depuração e não

tenha impacto negativo significativo para a saúde pública e no equilíbrio ecológico, estabelecendo os padrões nacionais de qualidade do ar

O decreto n.º 67/2010, altera os artigos 23 e 24, taxas de emissão de autorização especial e transgressões e multas, respetivamente, o Anexo I, referidos no artigo 7 do Regulamento sobre Padrões de Qualidade ambiental e de Emissão de Efluentes, aprovado pelo decreto n.º 18/2004, de 2 de Junho (Tabela 1).

Tabela 1 - Padrões de qualidade do ar, Moçambique

PARÂMETRO (MG/M³)	TEMPO DE AMOSTRAGEM										
	10 MIN	15 MIN	30 MIN	1 HORA		8 HORAS		24 HORAS		MÉDIA ARITMÉTICA ANUAL	
				PADRÕES							
				PRIM	SEC	PRIM	SEC	PRIM	SEC	PRIM	SEC
Dióxido	500			800				100		40	
Dióxido				190						10	
Monóxido		100 000	60 000	30 000		10 000					
Ozono				160		120		50		70	
Partículas								150		60	

Fonte: Moçambique (2010).

Prim: primário; Sec: secundário; min: minuto

Moçambique e Brasil são países com realidade económicas, sociais e ambientais distintas, bem como geográficas. O Brasil, por ser um Estado Federativo apresenta uma maior complexidade de órgão, instituições e leis ambientais que Moçambique, onde o governo é mais centralizado e o Ministério do meio ambiente aparece como coordenador das diversas instituições que abrangem as questões do meio ambiente. Portanto, os padrões de qualidade do ar estabelecidos, diferem um do outro em termos de limites máximos de concentrações de poluentes na atmosfera definidos legalmente.

A Tabela 2 ilustra resumidamente as legislações e compara os padrões de qualidade do ar em vigor em Moçambique e no Brasil, podendo se observar que contrariamente ao que estabelece o regulamento ambiental moçambicano, o regulamento brasileiro apresenta mais parâmetros para material particulado e estabelece os “valores-limite” de concentração do poluente em padrões primários e secundários.

Tabela 2 - Padrões de qualidade do ar em vigor em Moçambique e no Brasil Para material particulado

POLUENTE	TEMPO MÉDIO DE AMOSTRAGEM	CONCENTRAÇÃO (VIOLAÇÃO ACEITAS POR ANO)	
		PADRÃO PRIMÁRIO	PADRÃO SECUNDÁRIO
Legislação moçambicana (decreto n.º 67/2010)			
PTS (µg m ⁻³)	24h	150	Igual ao padrão primário
	Anual (média aritmética)	60	
Legislação brasileira (CONAMA)			
PTS (µg m ⁻³)	24h	240	150
	Anual (média geométrica)	80	60
Partículas inaláveis MP ₁₀ (µg m ⁻³)	24h	150	Igual ao padrão primário
	Anual	50	

Fonte: Moçambique (2010) e CONAMA (1990).

Isso pode ser considerado lacuna nos padrões de qualidade do ar existente na legislação ambiental moçambicana, pois, os padrões secundários são também importantes como “valores-limite” e são definidos como concentração limite de material particulado, estabelecida com base científica, que visa evitar, prevenir ou reduzir efeitos prejudiciais sobre a saúde humana e/ou o ambiente como um todo.

3.8 Estratégia de controle da poluição atmosférica, supressor de poeira

As estratégias para o controle da poluição atmosférica consistem em adotar diferentes mecanismos ou medidas que visam eliminar ou minimizar, por meio de coleta, captura ou retenção dos poluentes antes que eles alcancem a atmosfera.

As medidas de controle da poluição atmosférica podem ser indiretas ou diretas. As medidas indiretas são ações que visam a eliminação, redução, a diluição, a segregação ou afastamento dos poluentes. Neste âmbito, é importante ressaltar que a medida indireta envolve a aplicação de tecnologias e combustíveis limpos, a adequada localização de polos industriais, o planejamento urbano e as medidas correlatas. As medidas diretas correspondem a ações, que visam reduzir a quantidade de poluente emitido na atmosfera, através de instalações de equipamentos de controle ou o uso de métodos específicos. As medidas diretas seriam aplicadas, quando todos os esforços para a adoção de medidas indiretas forem esgotados, sem que tenha sido alcançada a redução necessária na emissão ou concentração do poluente (ASSUNÇÃO, 1998).

As medidas de controle envolvem planejamento e implementação de uma série de medidas de prevenção e de supressão de modo que os níveis de poluição sejam mantidos dentro de certos padrões (GHOSE e SINHA, 1990). Para isso, são estabelecidas estratégias de gestão da qualidade do ar. Quatro tipos de estratégias têm sido desenvolvidas: (1) gestão da qualidade do ar; (2) normas de emissão; (3) econômica; (4) custo benefício.

Nos diversos processos de mineração, poeiras e partículas de minérios são liberados no ar e como solução deste problema, tem sido desenvolvida tecnologia denominada de supressor de poeira. Este atua como agente minimizador de emissão de material particulado para atmosfera, atuando na umectação, penetração e aglomeração de partículas, resultando na formação de filme resistente e uniformemente superficial, impedindo a dispersão de poeiras e outros particulados que contaminem o meio ambiente. Para a aplicação do supressor de poeira é utilizado um sistema de aspersão através de bico aspersor, funcionado por meio de um compressor de ar, podendo ser usado para pulverizar em acessos de mina, na pilhas de minério e em vagões carregados de minério.

Supressores de poeira são usados para controlar a quantidade de partículas no ar, e funcionam atraindo a umidade do ar circundante, que por sua vez segura a poeira, ou por aderência de partículas. Algumas preocupações surgem quando os níveis de poeira são muito altos, incluindo:

- Segurança – as estradas não pavimentadas podem ter visibilidade reduzida devido a poeira. Isso pode conduzir a aumento de acidentes e incidentes.
- Saúde – partículas de poeira de diversos materiais podem se tornar um perigo à saúde se fixados ao pulmão.
- Vegetação – grandes quantidades de poeira podem ter efeitos debilitantes na vegetação.

Há muitos produtos usados para suprimir a poeira e a maioria dos produtos usados podem ser colocados em várias categorias amplas: água, sais/salmouras, não-petróleo orgânico, petróleo orgânico ou produtos químicos inorgânicos (PIECHOTA et al., 2004).

Grande parte de supressores de poeira, desenvolvidos e disponíveis comercialmente são produzidos a partir de derivados de petróleo. Todavia, novas matérias-primas e tecnologias de produção vêm sendo testadas para geração de novos produtos que não agredam o ambiente. De acordo com literaturas, vários tipos de supressores de poeira já são conhecidos. Os supressores de poeira comumente usados são derivados da lenhina, cloreto de cálcio, cloreto de magnésio, cloreto de sódio, adesivos resinosos, água e etc. A seleção de supressor particular,

depende não só das suas características de desempenho, mas também, do tipo e volume de tráfego, condição da estrada e custo do produto para atingir o nível desejado de controle de poeira (SANDERS e ADDO, 1993). Já de acordo com Smith, (2003) os tipos comuns de supressores de poeira são água, cloretos/sais, lignosulfonatos, enzimas, emulsões de betume, polímeros sintéticos, açúcar/melaço, emulsões de *tall oil* e aditivos de argilomineral.

A principal diferença entre os diversos tipos de supressor de poeira está nos compostos dos mesmos, quão bem o produto funciona como supressor de poeira, e o grau no qual o produto afeta o meio ambiente. Com base nessas características, é possível distinguir entre as várias classes de supressores de poeira. Várias diferenças diretas surgem se agruparmos os vários supressores de poeira em dois grupos muito amplos: o grupo I consiste em produtos mais antigos e tradicionais como água, óleo usado, cloreto de cálcio/magnésio, e Grupo II de produtos geralmente mais novos, como lignosulfonatos, polímeros acrílicos, produtos à base de látex e à base de emulsões de *tall oil*. As principais diferenças são as seguintes:

- Grupo I

Os óleos usados são pouco eficazes, geram numerosos efluentes e resíduos para o meio ambiente. Estes incluem desgaste de metais, alguns dos quais podem ser tóxicos, gerando alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e numerosos hidrocarbonetos que podem ser tóxicos para os organismos aquáticos quando o óleo é lixiviado ou transportado aos cursos de água.

A aplicação da água como supressor de poeira é uma solução de curto prazo, fazendo-se necessárias aplicações constantes, principalmente se o tempo estiver quente e seco, mas se torna menos eficiente e pouco viável, comparando com outros supressores, embora a água seja um supressor de fácil obtenção, pois se trata de um recurso natural. Sua eficiência varia com a temperatura e umidade tendo como tempo de eficiência o intervalo de 30 minutos e 12 horas, controlando apenas 40% do particulado. O uso de água torna-se mais eficiente, onde o trânsito veicular é limitado, ou seja, onde o fluxo de caminhões é de baixa intensidade. Outros fatores que a torna uma solução pouco vantajosa para esta aplicação é a sua disponibilidade em certas localidades.

Os cloretos funcionam atraindo a umidade do ar circundante, enquanto que a maioria dos supressores orgânicos, como o lignosulfonatos e os óleos vegetais, dependem principalmente da aderência de partículas.

Os sais amplamente usados como supressores de poeira são o cloreto de magnésio e o cloreto de cálcio. Apresentam características hidrofílicas e em contato com o solo/minério retira a umidade do ar originando uma camada que permanece continuamente úmida e portanto, dificulta a suspensão das partículas. Os cloretos são higroscópicos, sendo o agente de controle

de poeira mais comum usado em estradas não pavimentadas (PIECHOTA et al., 2004). Os cloretos são compostos iônicos que criam fortes atrações entre cada íon e as moléculas de água fracamente magnéticas envolventes. Esta atração reduz a taxa de evaporação e permite que a superfície retenha água. A tensão superficial também aumenta, o que liga as partículas de poeira. Os cloretos mais utilizados são o magnésio e o cálcio. Ambos os sais absorverão também a água da atmosfera (CPWA, 2005).

Após sua aplicação, os sais não apresentam formação de uma superfície impermeável, sendo facilmente lixiviados pela chuva, podendo causar a modificação da salinidade e valor de pH do solo. Portanto, para o tratamento são necessárias quantidades significativas, que variam entre 10 a 20% de sal, em relação à massa do solo a ser tratado, estando sua eficiência diretamente dependente da umidade relativa do ar, quanto mais baixa menor a eficiência. Cloreto de magnésio ocorre naturalmente como salmoura ou como subproduto da produção de potássio (WTIC, 1997). Nomes comuns são *dust guard*, *dust-off* e *chloe-text*. O cloreto de magnésio é eficaz na manutenção do agregado estável e no local (SANDERS et al., 1994), muito eficaz na redução da poeira (BOLANDER e YAMANDA, 1999), custo (EVAROSSON, 2010). Os impactos na qualidade da água são mínimos e abaixo dos limiares de USEPA (GOODRICH et al., 2009, SHI et al., 2009, EDVESBURG, 2010), menos tóxico quando comparado com produtos à base de petróleo, polímeros acrílicos e produtos de lignosulfonato (PIECHOTA et al., 2004), reduz a turvação (EVAROSSON, 2010), maior tensão superficial do que o cálcio, permanece mais higroscópico a temperaturas mais elevadas do que o cloreto de cálcio (PIECHOTA et al., 2004). Todavia, apresenta os seguintes limitantes, solúvel em água, a aplicação deve ocorrer anualmente; preocupações com os impactos a espécies de plantas sensíveis; pode ser corrosivo para o aço; requer nível mínimo de umidade (30%) para absorver a umidade do ar; as superfícies mais lisas e altas podem tornar-se escorregadias (BOLANDER e YAMANDA, 1999).

O cloreto de cálcio é um subproduto da salmoura da fábrica de carbonato de sódio e de bromo de sais naturais (WTIC, 1997). Nomes de produtos comuns incluem cloreto de cálcio líquido, flocos de cloreto de cálcio. Muito eficaz na redução da poeira (EDVAROSSON, 2010; SANDERS et al., 1994). O CaCl_2 absorve a umidade, dependendo da umidade relativa e da temperatura ambiente. É mais eficaz em locais com alta umidade e baixas temperaturas, a 25°C começa a absorver água a 29% de umidade relativa e 20% a 38°C. O cloreto de magnésio, por sua vez, aumenta a tensão e gera uma superfície mais dura que o cloreto de sódio quando a superfície se seca. No entanto isso exige um mínimo de 32% de umidade, para absorção da água ambiente independentemente da temperatura no qual cria uma superfície instável na

presença de água (CPWA, 2005). É menos tóxico quando comparado com produtos à base de petróleo, polímeros acrílicos e produtos de lignosulfonato (PIECHOTA et al., 2004). Reduz a turbidez (EDVARDSSON, 2010) e apresenta melhor performance do que o cloreto de magnésio em alta umidade (BOLANDER e YAMANDA, 1999). Contudo destacam-se algumas desvantagens do cloreto de cálcio como supressor de poeira, ou seja, este é menos eficaz para manter o agregado estável e no lugar, quando comparado com lignosulfonato e cloreto de magnésio (SANDERS et al., 1994). Solúvel em água, portanto, a aplicação precisa ocorrer anualmente, além de altamente corrosivo para o alumínio e suas ligas, as superfícies altas e finas podem tornar-se escorregadias (BOLANDER e YAMANDA 1999).

O mais barato dos cloretos, o cloreto de sódio (NaCl), é bom para a estabilização mecânica de estradas (CPWA, 2005), melhora a retenção de umidade, a durabilidade do congelamento-degelo, a capacidade de tráfego e a erosão resistida (LOHNES e COREE, 2002). Apresenta como limitantes, a necessidade de alta umidade (75%) para absorver da atmosfera (BOLANDER e YAMANDA, 1999), e quando seca, as partículas tornam-se suscetíveis à erosão do vento (CPWA, 2005), altas concentrações encontradas em águas de tempestade perto de estradas (GOODRICH et al., 2009), impactos em espécies de plantas sensíveis (BOLANDER e YAMANDA, 1999), sendo inferior ao cloreto de cálcio e magnésio como um supressor de poeira (CPWA, 2005).

Os produtos betuminosos fazem parte de um grupo de supressores, que incluem as emulsões asfálticas. São adesivos que dispensam o uso da água, são materiais hidrófugos e termoplásticos e possuem a capacidade de aglomerar partículas finas, geralmente, formando superfície regular que mantém o material fixo. Sob as condições adequadas do solo, esta solução pode manter uma via de acesso de veículos estabilizado e encapsulado por mais de um ano, contudo, pode fragmentar-se de acordo com o fluxo. As emulsões de alto conteúdo betuminoso (superior a 50%) formam pistas altamente resistente a carga, de grande aderência e hidrorrepelência (PIECHOTA et al., 2004).

- Grupo II

Produtos lignosulfonato, *tall oil*, derivados vegetais e melaço. Estes produtos de lignosulfonato têm sido bem estudados (BOLANDER e YAMANDA, 1999). A lignina ocorre naturalmente em células de madeira e é removida durante o processo de polpação de papel. Nas plantas, fornece força às células de madeira. Durante o processamento, bissulfato de sódio, cálcio, amônio ou magnésio é usado para tornar a lenhina solúvel (CPWA, 2005). Estes produtos funcionam melhor quando incorporados nos primeiros dois centímetros da superfície

da estrada (CPWA, 2005). Os nomes comuns dos produtos incluem DC-22, *Dustac*, *Calbinder*, *Lignin Sulfonate*, *Polybinder* e *RB Ultra Plus*.

Os lignosulfonatos ligam as partículas do solo entre si. Eficaz no tratamento da poeira (SANDERS e ADDO, 1993), eficaz na manutenção do agregado estável e no local, mais barato que o cloreto de cálcio (SANDERS et al., 1994) e mais eficaz em condições secas (WTIC, 1997). Esta variação de produto possui boa solubilidade em água e tende a manter a plasticidade, permitindo a compactação do solo quando são aplicados em caminhos com alta concentração de argila. A eficiência e a superfície dos lignosulfonatos podem ser reduzidas ou completamente destruídas na presença de chuva, chuvas fortes podem destruir o produto, haja vista que este não consegue formar uma superfície hidro-repelente, o que os tornam ineficientes para algumas aplicações que necessitam de controle de poeira. Estão sujeitos a ações do tempo, tais como a chuva e tornando-se escorregadio quando molhado (WTIC, 1997). Portanto, pode afetar negativamente os níveis de oxigênio dissolvido, uma vez que é derivado da madeira (CWPA, 2005; BOLANDER e YAMANDA, 1999). Frágil quando seco (EDVARDSSON, 2010; WTIC, 1997), altamente ácido se não processado, embora seja incomum (WTIC, 1997). A longo prazo, não é tão eficaz como o cloreto de cálcio e magnésio (EDVARDSSON, 2010; SANDERS e ADDO, 1993), resultando em aplicações mais frequentes (< 1 ano). Pode ser corrosivo para o alumínio e suas ligas (WITHYCOMBE e DULLA, 2006). Em corpos hídricos, possuem altos efeitos de coloração, reduzem a atividade biológica e retardam o crescimento em peixes (PIECHOTA et al., 2004), e podem descolorir a pintura dos veículos (WTIC, 1997). Pode ser odoroso e pegajoso quando aplicado (WTIC, 1997), não se liga bem às superfícies de estrada previamente tratadas com produtos clorados (WITHYCOMBE e DULLA, 2006).

Devido aos potenciais impactos ambientais de produtos derivados do petróleo orgânico (LOHNES e COREE 2002, PIECHOTA et al., 2004), os mesmos não são a opção viável para a supressão de pó. São derivados de petróleo sulfonatado e produtos altamente iônicos. Incluem-se neste grupo óleos sulfonatados, enzimas e cloreto de amônio. Os estabilizadores eletrolíticos repelem a água adsorvida pelo sistema, diminuindo as bolhas de ar, incrementando a compactação do solo. A eficiência desses tipos de supressores depende da composição mineral do solo e argila, por que são efetivos na presença de certos minerais específicos. Apresentam propriedades adesivas que promovem a ligação das partículas do solo, fortalecendo a superfície do caminho. Após a aplicação, forma-se um filme pela superfície aplicada, este filme fixa as partículas do solo entre si, impedindo a dispersão entre elas, por ação do vento ou fluxo de veículos. A aplicação com polímeros com alta hidrofobicidade, pode resultar em problemas de aquaplanagem em tempos de chuva, onde a água pode acumular na

superfície do filme, impedindo sua rápida infiltração, fazendo-se necessário estudo para avaliar as propriedades e performance, para cada tipo de aplicação. Em geral os polímeros compactam eficientemente, mas não impedem a geração do pó, ao saturar a superfície onde foram aplicados.

Polímeros acrílicos também são usados como supressores de poeira. Alguns exemplos de polímeros sintéticos são os polímeros acrílicos e os vinílicos. Estes produtos funcionam formando um filme na superfície da estrada. O produto tem pouca penetração no agregado/areia do leito da estrada e da superfície da estrada, mas o “filme” oferece um grau de controle de poeira. Este produto não molha o material da estrada, não liga nem adiciona muita integridade estrutural, de modo que o desgaste do tráfego resulta rapidamente em áreas com pouco filme. A chuva pode causar canalização rapidamente, o que pode resultar em buracos e outros defeitos de estrada. Estes produtos degradam o meio ambiente e geram o DBO (LOHNES e COREE 2002, PIECHOTA et al., 2004).

Em mineração o supressor de poeira pode ser utilizado na aspersão em vagões carregados com minério, nos acessos da mina, além de pilhas estocadas em pátios industriais e portos.

3.8.1 Extrato vegetal de *Pinus elliottii*

O gênero *Pinus* apareceu a 230 milhões de anos atrás, no período Triássico. Existem cerca de 126 espécies do gênero *Pinus*. Uma única espécie, o *Pinus merkusii*, ocorre naturalmente no hemisfério sul (Ilha da Java), as demais espécies são originárias do hemisfério norte, com zonas de ocorrência natural na Europa, Ásia, África, Ilhas das Canárias, Filipinas, Cuba, Bahamas e América do Norte e América Central (VALERI e PAULA, 2009). O gênero *Pinus*, originário da América do Norte é o que mais se destaca, abrangendo muitas espécies amplamente distribuídas pelo hemisfério Norte até os países tropicais e subtropicais. As espécies mais produzidas no Brasil são: *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus oocarpa*, *Pinus tecunumanii*, *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, sendo que estas duas últimas espécies são as mais plantadas na região sul do país dada sua tolerância a geadas (CI FLORESTAS, 2014 *apud* (FRANÇA, 2015)).

Entre as inúmeras espécies existentes, em várias partes do mundo, apenas do gênero *Pinus* são verdadeiramente produtoras de goma resina, embora a produção varie dentro desse gênero, de espécie para espécie. O volume de goma resina e produtos dela obtidos, consumido pelo mercado mundial, são produzidos apenas por cinco espécies principais: *P. elliottii* var. *elliottii*, *P. caribaea* Morelet, englobando variedades *caribaea*, *hondurensis* e *bahamensis*, *P.*

pinaster e *P. sylvestris*, sendo a primeira a maior produtora (BERZAGHI, 1972). A espécie mais plantada no Brasil, regiões Sul e Sudeste, com clima mais ameno, é o *Pinus elliottii* var. *elliottii*, sendo uma espécie de maior produção de goma resina. Enquanto que as espécies *Pinus caribaea* var. *bahamensis* e o *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, são cultivadas em outras regiões, mais quentes do país (GARRIDO et al., 1998).

A goma resina do *Pinus elliottii* é composta de 68% de breu, 17% de terebintina, 10% de umidade e 5% de impurezas sólidas e água das chuvas (ORLANDINE, 2000). A goma resina obtida pela exsudação das arvores de *Pinus*, é uma mistura de hidrocarbonetos de cadeia longa, compostos por vários ácidos resínicos, tendo como principal deles o ácido abiético, que após destilação, torna-se a parte sólida, chamado breu e a parte volátil, composta de cíclicos aromáticos, chamada terebintina. A goma é uma mistura complexa de ácidos resínicos e neutros – colofónia ou breu (fração resínica, juntamente com a fração terpénica constituída essencialmente por compostos voláteis (mono e sesquiterpenos) – terebintina. A composição das gomas, em termos de ácidos resínicos, não se mantem inalterada quando sujeita a elevadas temperaturas como 200°C (destilação), isto é isomerização entre os ácidos abietadienóicos. Após a destilação da goma, o breu obtido pode sofrer diversas transformações quando sujeito a elevadas temperaturas e outras condições como a exposição a compostos químicos e catalizadores, podendo obter-se variados produtos finais (LOPES, 2008).

O breu é um material sólido resinoso obtido por processo de destilação da goma, proveniente da sangria de pinheiros vivos, de modo a não alterar os constituintes daquela goma. O breu extraído do *Pinus elliottii* contém ácidos diterpênicos de fórmula molecular $C_{20}H_{30}O_2$, constituído principalmente pelo ácido abiético e, em menor quantidade, os ácidos levopimárico, palústrico e neoabiético. O ácido abiético pode ser isolado como principal produto da reação de isomerização dos demais ácidos e a reação de desidrogenação da resina bruta com Pd/C leva, majoritariamente, ao ácido deidroabiético (CARVALHO, 2017). A cor do breu varia de amarelo pálido até castanho avermelhado escuro, dependendo da fonte, método de recolha, processo de malaxagem e destilação. Em temperatura ambiente é brilhante, vítreo, odor e sabor a aguarrás (Figura 1). É insolúvel em água, mas rapidamente solúvel na maioria dos óleos e solventes orgânicos, incluindo álcoois, tolueno, benzeno, éter dietílico, entre outros.

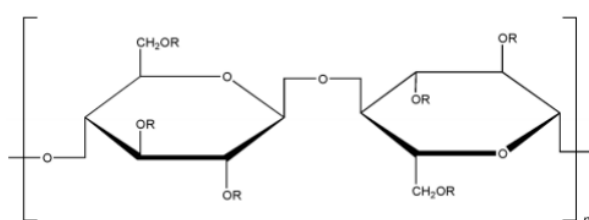
Figura 1 - Breu comercial utilizado na formulação de supressor de poeira.



Fonte: Acervo pessoal

O principal componente do breu é o ácido abiético, um ácido monocarboxílico. O breu é formado, basicamente, por ácidos resinosos, os quais são ácidos monocarboxílicos de estrutura baseada no felandreno alquilado com elevada reatividade química e biocompatibilidade (Figura 2).

Figura 2 - Fórmula estrutural do breu

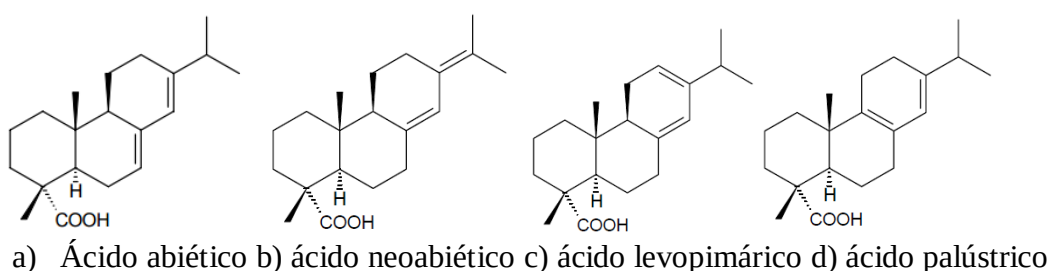


Esta matéria-prima é conhecida como sendo amorfa e pelo fato de não possuir um ponto de fusão específico, mas sim uma ampla gama de temperatura, geralmente mais de 15°C; antes de atingir o estado líquido este ponto de transição está associado à composição complexa e aos processos químicos que acontecem durante o aquecimento tais como, isomerização e/ou a reações de oxidação.

No geral, os ácidos resínicos do pinheiro são diterpenos monocarboxílicos e pertencem a três classes básicas: abiéticos, pimáricos e isopimáricos. O breu extraído do *Pinus elliottii* contém quatro ácidos diterpênicos, constituídos principalmente pelo ácido abiético (a),

neoabiético (b), levopimárico (c) e palústrico (d) (Figura 3), os quais diferem apenas na localização de suas duas duplas ligações. Todas as ligações duplas são endocíclicas exceto no caso do ácido neoabietico que possui ligações exocíclicas. Os ácidos pimáricos e isopimáricos diferem apenas no C13. O ácido isopimárico e ácidos sandaracopimáricos são classificados na mesma família, mas diferem na localização de uma ligação dupla (RUY, 2010). Uma das principais fontes de ácidos diterênicos no Brasil é a resina do *Pinus elliottii* utilizada em reflorestamento.

Figura 3 - Estruturas dos ácidos diterpênicos



O breu pode sofrer diversas reações como reação de oxidação por exposição ao oxigênio, devido à dupla ligação dos ácidos abiéticos, assim como as reações (LOPES, 2008):

- 1- Hidrogenação
- 2- Desidrogenação e dismutação
- 3- Adições de Diels-Alder
- 4- Polimerização
- 5- Esterilização
- 6- Formação de sais

A hidrogenação é um processo utilizado para estabilizar os ácidos resínicos e a resina à oxidação. Existem vários processos de hidrogenação da resina, sendo um deles a temperatura ambiente. Da hidrogenação obtêm-se os seguintes ácidos resínicos: dihidropimárico, dihidroisopimárico, tetrahidropimárico e tetrahidroisopimárico.

A desidrogenação/dismutação consiste na estabilização da resina, por aquecimento a temperaturas de 200 a 300°C, durante várias horas com catalizador de Pd/C, resultando numa mistura dos ácidos desidro-, dihidro- e tetrahidroabiético. Adição de Diels-Alder, consiste na adição de composto carbonilo com α , β - insaturado a dieno conjugado. Por adição de anidrido maléico, aos quatro ácidos abietadienólicos apenas o ácido levopimárico reage, isomerizando

rapidamente. Assim, quando a mistura de ácidos resínicos presentes numa resina é aquecida acima de 100°C, ou é dissolvida num solvente inorgânico em meio ácido, dá-se a reação com o anidrido maléico formando, principalmente, aducto com o ácido pimárico.

Polimerização, os ácidos resínicos, tipo abiético, por ação do calor e/ou ácidos fortes polimerizam. Esta polimerização resulta na formação de dímeros ($C_{40}H_{60}O_4$), mas também se geram pequenas quantidades de trímeros. A resina polimerizada tem a vantagem de ter ponto de amolecimento mais elevado e também mais elevada a resistência à oxidação.

Na esterificação, os ésteres dos ácidos resínicos formam-se de simples reação com álcoois a temperaturas elevadas. Normalmente usam-se para tal poliálcoois como, por exemplo etilenoglicol, dietilenoglicol, glicerol ou pentaeritritol. Todos os ésteres obtidos a partir de breu são solúveis em solventes orgânicos. Os ácidos resínicos formam sais com sódio, cálcio, zinco e magnésio. Os sais de sódio com o ácido abiético, neoabiético e isopimárico são solúveis em água enquanto que os de levopimáricos e pimáricos quase não o são. O breu é amplamente utilizado como aditivo nas indústrias de cola, adesivos, vernizes, desinfetante, sabões, polímeros, tintas diversas, indústria alimentícia, farmacêutica, entre outras aplicações. As funcionalidades carboxílicas e olefinicas dos ácidos resínicos são vantajosamente modificadas por hidrogenação, disproportionação, formação de aductos com ácidos di-carboxílicos, dimerização, polimerização, esterificação e saponificação. Algumas das aplicações requerem uma combinação de reações para obter o produto com a qualidade desejada (ROSA, 2014).

3.8.2 Ácido γ -poliglutâmico

O ácido γ -poliglutâmico (γ -PGA) é um biopolímero aniônico que ocorre naturalmente na forma de uma homopoliamida composta por unidades de D- e L- ácido glutâmico. O γ -PGA é biodegradável, atóxico para meio ambiente, comestível e solúvel em água. Esse biopolímero pode ser utilizado na indústria alimentícia, química e farmacêutica, sendo utilizado na indústrias química como absorvedor de metais-traço e flocculante e na indústria farmacêutica, como veículo para medicamentos (SHIH; VAN. 2001).

O γ -PGA é um produto exclusivo do metabolismo microbiano, obtido por síntese enzimática, quando produzido por *Bacillus* geralmente apresenta massa molecular elevada, na faixa entre 10^5 a 10^8 Da e polidispersividade entre 2 e 5 (DO; CHANG; SHIH; VAN, 2001).

A massa molecular, a polidispersividade e a estrutura química dos materiais poliméricos são as principais responsáveis pelas suas propriedades e, conseqüentemente, pela sua utilização em inúmeras aplicações (LUCAS; SOARES; MONTEIRO, 2001).

No γ -PGA as unidades monoméricas estão conectadas por ligação amida entre o grupo α -amino e o γ -ácido carboxílico (SHIH; VAN, 2001). Por possuir essa ligação amida entre os grupos α e γ , o ácido γ -poliglutâmico apresenta resistência às proteases, que é o processo de quebra das ligações peptídicas, vistos que estas são capazes de agir apenas sobre ligações entre grupos α , como no caso das proteínas (CANDELA; FOUET, 2006).

Os polímeros com massa molecular elevada são úteis como espessantes. A massa molecular do polímero definirá, portanto, em grande parte, a sua aplicação. A conformação da molécula de γ -PGA também pode influenciar a viscosidade das suspensões, assim como a capacidade do polímero em complexar metais (HE; NEU; VANDERBEG, 2000).

3.8.3 Alginato de sódio

Alginato de sódio é um polissacarídeo autodegradável quando aquecido por tempo prolongado (CAMPESE et al., 2007). Ele é um carboidrato coloidal hidrofílico extraído com álcali diluído de várias espécies de algas *Phaeophyceae*. As principais algas marinhas para produção comercial de alginato são *Macrocystis pyrifera*, *Laminaria hyperborea*, *Laminaria digitata* e *Ascophyllum nodosum*, que são encontradas mundialmente (CAMPESE et al., 2007). Alginatos são de grande interesse como componente estrutural de filmes e coberturas por causa de suas propriedades coloidais únicas, na qual inclui compactação, estabilização, suspensão, formação de filme, produção de gel e estabilização da emulsão (KING, 1983).

É solúvel em água e forma soluções viscosas com propriedade que dependem da massa molar, dos componentes e dos íons presentes. A viscosidade é a propriedade fundamental das soluções de alginatos, pois proporciona a estes compostos usos diferentes como espessantes, estabilizantes e geleificantes. A viscosidade da solução diminui com o aumento da temperatura, forma gel estável em pH de 5,0 a 10,0 (CAMPESE et al., 2007).

Quando associado a íons Na^+ , recebe o nome de alginato de sódio (alginato-Na), cujo composto apresenta grande solubilidade em soluções aquosa. A interação entre grupos carboxílicos do ácido algínico e cátions divalentes como, por exemplo, o cálcio (Ca^{2+}), induz a formação de géis em soluções aquosas, nesse caso, a rede polimérica passa a ser identificada como alginato de cálcio (alginato-Ca) (RUBIRA et al., 2009).

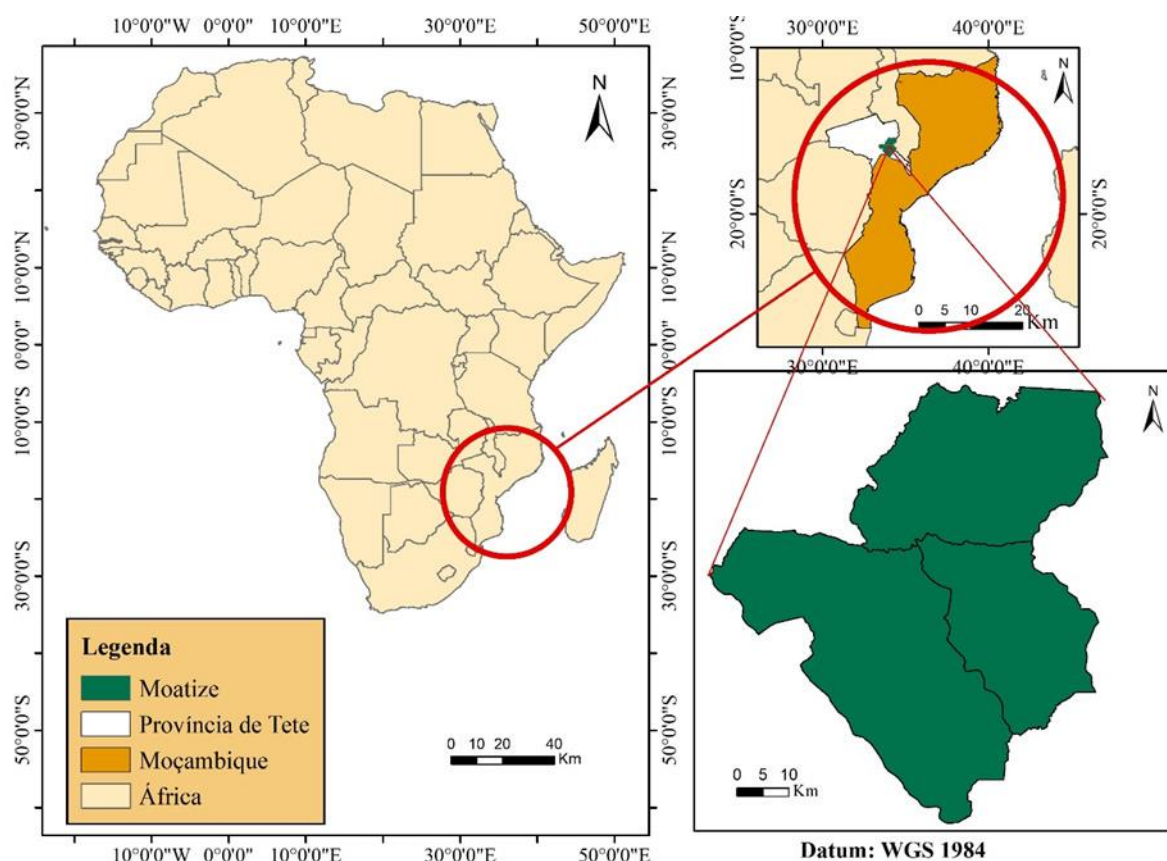
A principal vantagem do gel de alginato é a sua habilidade de ser termoeestável podendo ser armazenado à temperatura ambiente. Além dessa característica, hidrogéis de alginato apresentam grande hidroflicidade, porosidade, baixo custo e biodegradabilidade (MOURA, 2005).

Os alginatos são insolúveis em solventes miscíveis com água em geral, como álcoois e cetonas (DAY, 1998). Em soluções aquosas (1%), os alginatos precipitam após adição de aproximadamente 30 % destes solventes orgânicos (O`NEIL, 2001).

4 ÁREA DE ESTUDO

O Distrito de Moatize está localizado na província de Tete, região central de Moçambique, África. Dista 20 km do Município de Tete, situando-se a nordeste deste, entre os paralelos 15°37' e 16°38' de latitude sul e entre os meridianos 33°22' e 34°28' de longitude Leste, com superfície de 8.455 km² (Figura 4). É limitado a Norte pelos distritos de Chiúta e Tsangano; a Leste pela República do Malawi; a Sul pelos distritos de Tambara, Guro, Changara e Município de Tete, através do rio Zambeze e Mutarara através do Mecombezi; e a Oeste pelos distritos de Chiúta e Changara (MAE, 2005).

Figura 4 - Distrito de Moatize, Moçambique.

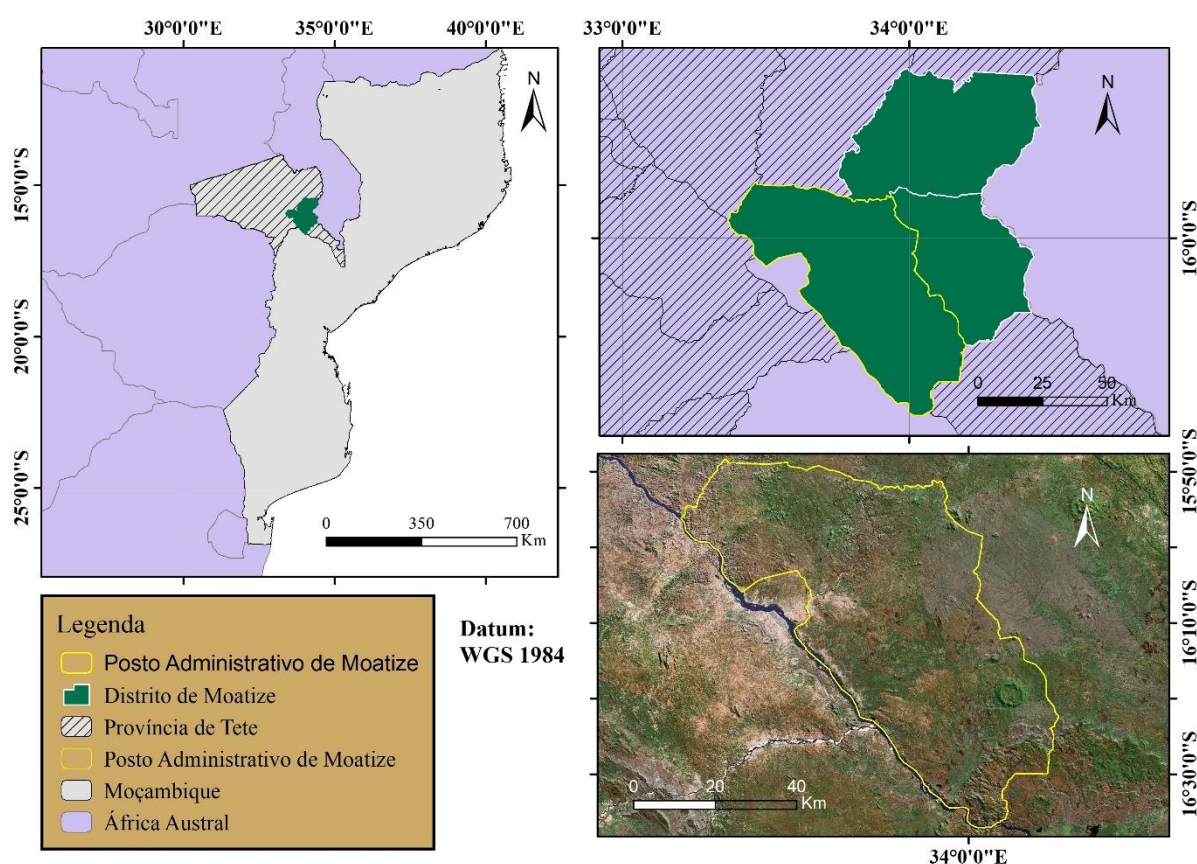


Fonte: Autoria própria

Sob o ponto de vista administrativo, o distrito de Moatize está dividido em três Postos Administrativos: Moatize, Kambulatsitsi e Zobue que, por sua vez, estão subdivididos em localidades, sendo que o recorte espacial da área de estudo é o Posto Administrativo de Moatize.

O Posto Administrativo de Moatize está localizado no distrito com mesmo nome, numa região classificada como Zona Franca Industrial (Figura 5). Esta área foi delimitada para a pesquisa por tratar-se de região com expressiva concentração de megaprojetos transnacionais, de extração de carvão mineral, destacando-se o da brasileira Vale Moçambique, da sul africana Minas Moatize Ltda, o consórcio indiano *Internatinal Coal Ventures Limited* (ICVL) e JINDAL África, nomeadamente.

Figura 5 - Área de estudo, Posto Administrativo de Moatize.



Fonte: Autoria própria

Na área de estudo, os empreendimentos minerários são classificados, conforme a envergadura das operações realizadas e a complexidade do equipamento utilizado, como sendo de atividades de nível três (3), pois as empresas de mineração desenvolvem atividades, envolvendo métodos mecanizados. As atividades de mineração de nível 3 estão, basicamente, equiparadas às atividades que o regulamento sobre o processo de Avaliação de Impacto Ambiental moçambicano classifica como de categoria A, prescindindo de Avaliação de Impacto Ambiental.

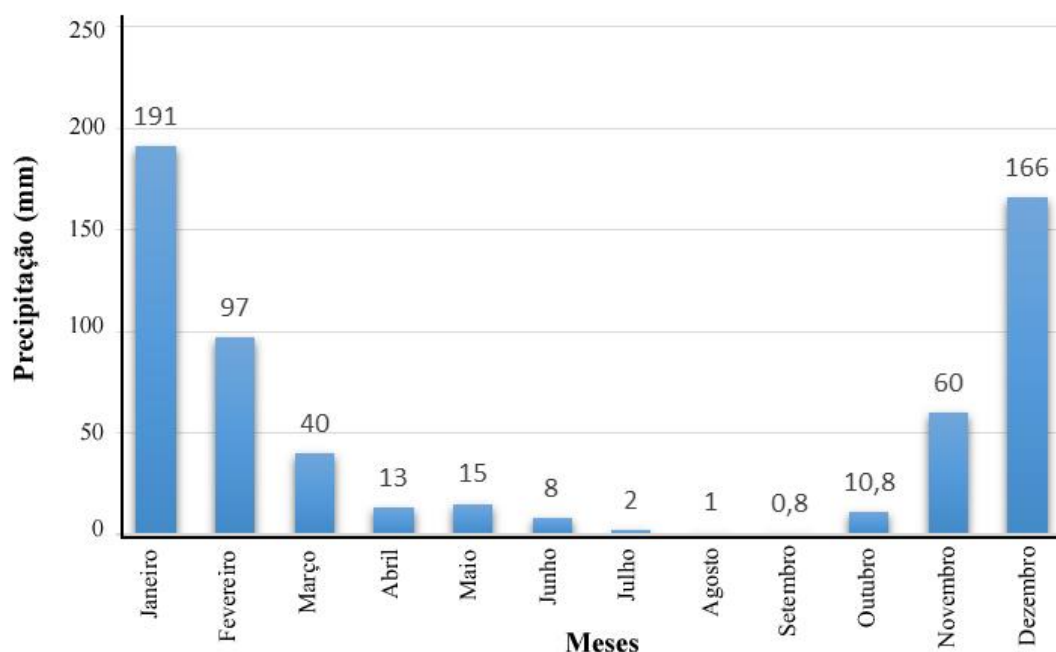
4.1 Meio físico

4.1.1 Condições climáticas de Moatize

Baseando no modelo de Köppen, no distrito de Moatize predominam dois tipos de climas: o do tipo BSw, ou seja, seco de estepe com inverno seco na parte sul, e o do tipo AW, Tropical Chuvoso de Savana no norte do distrito (MOÇAMBIQUE, 2005). São climas caracterizados por duas estações distintas, a estação chuvosa e a seca. A época chuvosa inicia no mês de outubro e/ou novembro e termina entre os meses de março e abril. A maior precipitação pluviométrica ocorre sobretudo no período compreendido entre dezembro a fevereiro, variando significativamente na quantidade e distribuição, quer durante o ano, quer de ano para ano. A temperatura média está na ordem dos 26,5°C. As médias anuais máximas e mínimas são de 32,5 e 20,5°C, nos meses de novembro e julho, respectivamente (INAM, 2016).

A precipitação média mensal no verão gira em torno de 191 mm e 166 mm, índices registrados nos meses de janeiro e dezembro. A precipitação média mensal máxima e mínima em Moatize é de aproximadamente 191 mm no verão e 0,8 mm no inverno (Figura 6).

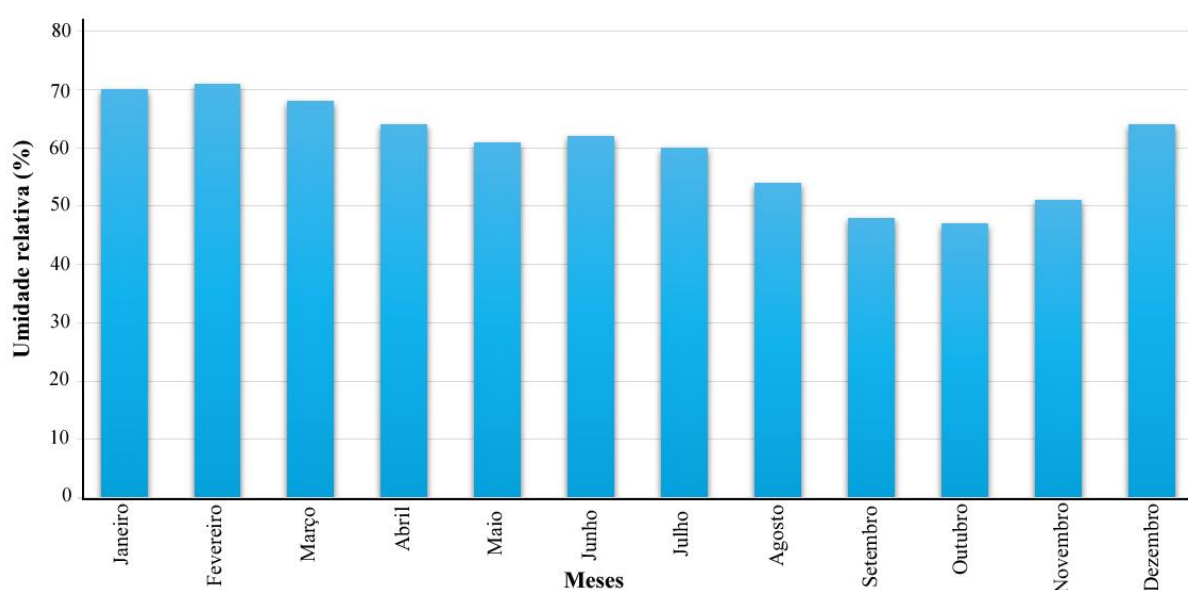
Figura 6 - Valores de precipitação média mensal, 1985-2015 – Estação meteorológica de Tete.



Fonte: Adaptado de INAM, (2016)

Os meses de janeiro e dezembro correspondem ao período do ano em que perturbações tropicais associadas a Zona de Convergência intertropical - ZCIT originam chuvas intensas. Segundo INAM (2016), a precipitação média anual na estação da cidade de Tete é cerca de 644 mm, a evapotranspiração potencial média anual está na ordem de 1.626 mm. O valor máximo de humidade relativa do ar, 71%, é verificado no mês de fevereiro, e o valor mínimo, 47% no mês de outubro (Figura 7).

Figura 7 - Umidade relativa média mensal do ar, 1985-2015 – Estação Meteorológica de Tete.



Fonte: INAM, (2016)

A Figura 7 mostra a distribuição média mensal da umidade relativa do ar registrada na Estação de Tete, no período compreendido entre os anos de 1985 e 2015. Estes dados revelam que o mês de outubro se apresenta como a época mais seca do ano. Este fato é comprovado através da verificação da precipitação normal mensal, que é da ordem de 10,8 milímetros, o que demonstra a pouca atividade da Zona de Convergência intertropical na região no mês em referência. A umidade relativa do ar é de 60%, média anual, é um indicador característico de regiões de clima seco. Destaca-se que o valor mais baixo de umidade relativa do ar correspondeu a 38% registrado em 2002 (INAM, 2006).

4.1.2 Vegetação

Em Moatize, a vegetação predominante é de savana. De maneira geral, a savana trata-se de formação baixa, por vezes degradada com plantas espinhosas. Esta associação vegetal é caracterizada por ser arbustiva pela dominância de arbustos nos respectivos estratos, ou arbórea pela predominância de árvores dispersas, dos tipos de embondeiro e pau-preto (ébano) e espécies rasteiras. As zonas de floresta estão ausentes nesta bacia, ocorrendo alguma flora típica de savana (VASCONCELOS, 1995).

4.1.3 Enquadramento geomorfológico

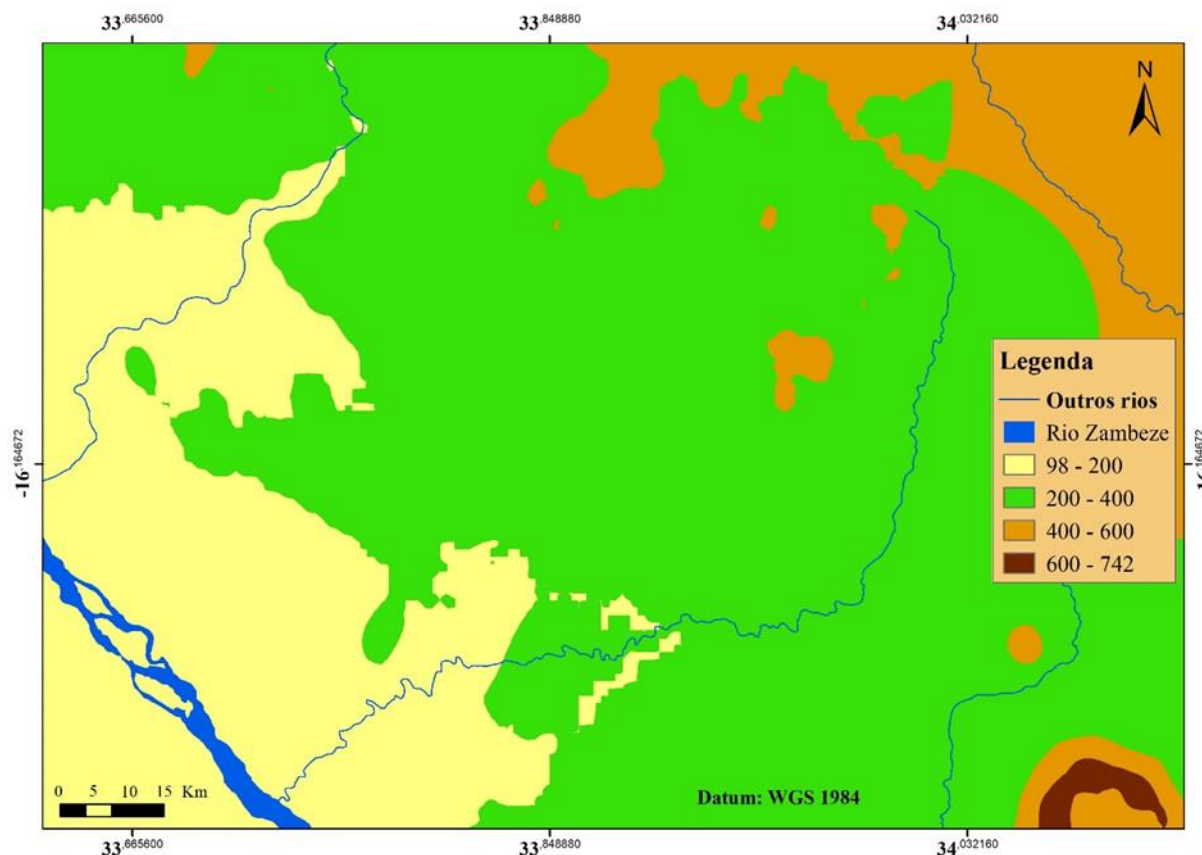
O distrito de Moatize ocorre, parcialmente, no vasto Complexo Gnáissico-granítico do Moçambique *Belt*, onde sobressaem em forma de montes ilhas, “*Inselbergs*” as rochas intrusivas do Pós-Karoo (MOÇAMBIQUE, 2005). Nestas elevações, as suas cotas altimétricas variam entre 500 e 700 m. Entre as elevações e planície aluvionar do rio Zambeze, ocorrem as formações pelíticas do Karoo inferior, que insere-se na unidade morfológica denominada “Região do Planalto Médio”. Esta região de Planalto Médio tem cotas altimétricas que variam entre 200 e 500 m (MOÇAMBIQUE, 2005).

É de destacar que a planície aluvionar insere-se na unidade morfológica denominada “Zona das Grandes Planícies Costeiras”, cujas cotas altimétricas são inferiores a 200 m. Segundo Afonso et al. (1998), a geomorfologia desta unidade está relacionada a:

- Depressões de acumulação relacionadas com escorrência fluvial;
- Planícies de acumulação fluvial.

No que concerne ao relevo do local de estudo, Posto Administrativo de Moatize, é importante destacar que é predominantemente dominada por planícies, planaltos e montanhas, com altitudes que variam entre 98 a 742 metros (Figura 8).

Figura 8 - Relevo de Posto Administrativo de Moatize, Moçambique.



Fonte: Autoria própria

Vasconcelos (1995) descreve a região em graben com largura variando de 2,5 a 8 km e extensão de mais de 20 km, em superfície plana levemente ondulada, com altitude entre 140 e 220 m acima do nível do mar. Deve-se destacar que manifestam-se altitudes maiores, com cerca de 300 m, bordejando o graben Precámbrico.

4.1.4 Enquadramento geológico

A geologia de Moçambique caracteriza-se pela ocorrência de grande diversidade de rochas sedimentares, magmáticas, metamórficas, bem como, de minerais e fósseis. A bacia carbonífera de Moatize está localizada na bacia hidrográfica do Zambeze que, em território nacional, estende-se no sentido Oeste-Leste do Zumbo, divisa com Zâmbia e Zimbabwe, até à foz no Índico, Chinde e da Zâmbia, Malawi ao Zimbabwe, no sentido Norte-Sul. A Bacia do Zambeze ocupa uma extensão de cerca de 137.000 km² (REAL, 1966 *apud* VASCONCELOS, 1995).

Em termos geológico Moatize pertence às formações do Supergrupo do Karoo no Vale do Rio Zambeze, estas localizam-se em bacias tectônicas, grabens, dispostas ao longo deste grande rio africano. O termo “Karoo” é referente à grande bacia do Karoo localizada na porção central da África do Sul. Este termo é igualmente utilizado para, referenciar bacias sedimentares gonduânicas, cujo preenchimento sedimentar poderá ser equivalente. O conjunto de bacias do Karoo constituem de registro geológico muito importante, dado que são contemporâneas do Pangeia (WOPFNER, 2002; CATUNEAU, 2005; ISABELL, 2008).

Estas bacias foram desenvolvidas em diferentes contextos tectônicos: sistema *retro-arc foreland* ou estruturas *horsts* e grabens ou em bacias de rift intra-cratônicos (FAURE, et al., 1996; CAIRNCROSS, 2001; CATUNEAU, 2005; ISABELL, COLE, CAUTEAU, 2008; TORSVIK, COCKS, 2013).

A bacia carbonífera de Moatize é de formação sedimentar, com idades do Carbonífero Superior ao Triássico Inferior, na zona de Moatize-Minjova, também caracteriza-se pela ocorrência de extensa atividade ígnea (PAULINO, 2009). A estratigrafia geral do Supergrupo do Karoo divide-se em dois grupos: o Grupo do Karoo Superior e o Grupo do Karoo Inferior. No que concerne à idade, as formações do Supergrupo do Karoo iniciaram-se no Carbonífero Superior, Grupo do Eccu. A fase sedimentar termina no Jurássico Superior, com os arenitos e conglomerados da Formação Inferior da Lupata. A fase vulcânica inicia-se no Jurássico Inferior, com extravasamento de lavas basálticas e termina na transição Jurássico Cretáceo, com os riólitos do Grupo da Lupata. Ocorre, então, simultaneidade na deposição de formações sedimentares e de emissões vulcânicas (VASCONCELOS, 1995).

As formações geológicas do Vale do Zambeze dividem-se em três grandes unidades estratigráficas (PROJETO INTEGRADO, 1991 *apud* VASCONCELOS, 1995).

- Formações Pré-Karoo, desde o Pré-Cambriano;
- Formações do Supergrupo do Karoo, variando entre o Carbonífero Superior e o Jurássico;
- Formações Pós-Karoo, variando do Jurássico ao Quaternário.

O distrito de Moatize caracteriza-se por possuir importantes jazidas, desde filões de quartzo carbonatados a jazidas de ferro, chumbo, coríndon, fluorita, hulha, além de inúmeras jazidas de titanomagnetitas vanadíferas. As jazidas de carvão cobrem extensa área que estende-se desde o Chingodzi ao Mecombedzi, região sul montanhosa do distrito de Moatize. Neste

local encontram-se as jazidas mais importantes, da chamada bacia carbonífera de Moatize-Minjova (MAE, 2005).

4.1.5 Mineralogia

Segundo Pacheco (2008), os carvões gonduânicos têm teor mais elevado de matéria mineral total, quando comparado aos do carbonífero europeu. Esta característica está relacionada a vários fatores, entre eles:

- Taxa de subsidência intermitente temporária ou localmente alta, que somente em casos extremos causaria deposição alóctone;
- Relevo fisiográfico considerável próximo da bacia de acumulação;
- Deposição de sedimentação alternada de águas marinhas e doce;
- Intrusões ígneas encontradas em carvões gonduânicos, que aumentam o teor da matéria mineral da camada afetada, especialmente, em relação aos carbonatos.

Os principais minerais dos carvões gonduânicos formam-se na fase singenética e epigenética, podendo ser agrupados em: argilominerais (caulinita, montmorilonita, ilita), silicatos (quartzo, calcedônia, opala), carbonatos (calcita, dolomita, siderita, ankerita, smitsonita, cerusita), sulfetos (pirita, esfarelita, galena, calcopirita, calcosita), sulfatos (gipsita, epsomita, melanterita, jarosita, celesterita, anidrita, barita), hidróxidos e oxihidróxidos de ferro e alumínio (limonita, lepidocrocita, goethita, gibbsita, diásporo), cloretos (halita, silvinita), fosfatos (apatita, fosforita) e enxofre elementar (PACHECO, 2008). Segundo Vasconcelos (1995), nos carvões da Bacia Carbonífera de Moatize a presença de matéria mineral é bastante frequente sendo, fundamentalmente, singenética e epigenética. Os minerais mais frequentes são os minerais na fração argila e o quartzo, como segundo mineral mais abundante. Os minerais epigenéticos que aparecem nos carvões da Bacia Carbonífera de Moatize, são basicamente, os carbonatos, ocorrendo também sulfetos. Os minerais da argila são os minerais mais frequentes nos carvões da Bacia de Moatize, podendo ocorrer em leitos no interior da telocolinita, em bandas de carbargilita ou, simplesmente, de minerais puros na fração argila, como minerita e, ainda, preenchendo lúmen celular vitrinítico e/ou inertinítico. Nestes casos apresentam-se em agregados com uma cor castanha, mais ou menos escura, e com aspecto terroso e granular. Também pode-se observar inertinita, vitrinita associadas aos minerais na fração argila (NAVALE et al., 1983; NAVALE e SAXENA, 1989 *apud* VASCONCELOS, 1995).

Vasconcelos (1995) destaca ainda que uma outra forma de ocorrência de minerais de argila é em graus que podem atingir dimensões de 100 μm , de aspecto mais cristalizado, podendo mostrar ou não estrutura típica, com diferenças de coloração e brilho que se dispõem paralelamente entre si, denotando a estrutura dos filossilicatos a que pertencem.

Os carbonatos são minerais epigenéticos e não são abundantes. Estes aparecem normalmente preenchendo os lúmens de estruturas celulares, fundamentalmente, fusinita. No caso da calcita, esta apresenta cor castanha acinzentada de aspecto, relativamente, homogêneo e translúcido típico e encontram-se em graus embebidos na vitrinita ou misturados com minerais na fração argila. O quartzo ocorre em carvões da Bacia Carbonífera de Moatize, normalmente, em grãos arredondados elípticos de dimensões reduzidas, podendo, todavia, mas raramente, atingir 200 μm , sendo totalmente detrítico, estando associado aos minerais de argila que ocorrem, principalmente, quando a sua origem é singenética (PAREEK e PANDE, 1970; SNYMAN 1961; HAGELSKAMP E SNYMAN, 1988 *apud* VASCONCELOS, 1995).

Os sulfetos são os minerais pouco predominantes nos carvões de Moatize, ocorrendo sob forma de sulfetos singenéticos e, mais raramente, epigenéticos (VASCONCELOS e SANTOS, 1988 *apud* VASCONCELOS, 1995). O sulfeto mais comum é a pirita, com cor amarela metálica intensa. A pirita de coloração mais esbranquiçada é um dos sulfetos menos frequente nos carvões de Moatize.

Os óxidos e hidróxidos presentes nos carvões de Moatize são geralmente de ferro. Os óxidos são de cor branca acinzentada e os hidróxidos têm cor castanho-avermelhados. Alguns hidróxidos de ferro, como a limonita, provem da alteração da pirita. Também, estão presentes outros minerais em pequenas proporções, como a muscovita, o rútilo e a apatita (VASCONCELOS, 1995).

4.1.6 Solos

Moçambique possui uma grande variedade de solos típicos das regiões tropicais e subtropicais. As várias classificações pedológicas tomam em conta a composição mineralógicas, a cor, a origem, a idade e os processos morfológicos e biológicos recentes.

De forma geral na composição mineralógica dos solos moçambicanos predominam materiais ferruginosos e aluminosos, sendo por isso, considerados pedalféricos ou ferralíticos (MUCHANGOS, 1999).

Os tipos de solos predominantes na área de estudo são os basálticos pretos, associados aos terrenos do pré-câmbrio e típicos de áreas de planícies onduladas e encostas com declives de 1% a 8% e com boa drenagem. São classificados em solos castanhos acinzentados, castanhos avermelhados, pouco profundos sobre rochas calcárias e derivados de rochas basálticas, podendo ser avermelhados, castanho-avermelhados ou pretos. Apresentam uma profundidade variável e boa capacidade de retenção de nutrientes e água, fendilhados quando secos, boa plasticidade e pegajosos quando molhados (MAE, 2005).

4.2 Características físico-químicas do carvão de Moatize

Segundo Vasconcelos (1995) vários são os parâmetros físicos e químicos utilizados para caracterizar o carvão, do ponto de vista tanto de carbonização, como de sua aplicação podendo ser agrupados em categorias, a saber:

- a) **Poder calorífico** – incluem-se as determinações como umidade, teor em cinza, em material volátil e carbono fixo.
- b) **Análise elementar** – teor de elementos químicos constituintes da matéria orgânica do carvão como o carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, enxofre, cloro, entre outros.
- c) **Propriedade coqueificante** – determinada com base no índice de intumescimento, nas propriedades dilatométricas e plastométricas e no índice de Roga.
- d) **Propriedade mecânica** – definida a partir do Índice de Moabilidade de Hardgrove.
- e) Análise química e fusibilidade de cinzas;
- f) Análise da composição de macerais e o poder refletor da vitrinita, através de exame petrográfico.

O carvão de Moatize apresenta valores de umidade entre 0,4% e 1,1%, 0,7% e 1, 0% estes últimos valores na base “úmida sem cinza”, respectivamente. Os teores de cinza do carvão de Moatize variam entre mínimo 5,3% e máximo de 35,5%. Os teores de material volátil variam entre 18% e 23%. No que diz respeito ao poder calorífico do carvão de Moatize tem-se 23 a 37 MJ kg⁻¹. Em termos de teor de carbono no carvão de Moatize este elemento varia entre 68% a 84%, oxigênio varia entre 1,2 a 8,7%, o nitrogênio entre 1,2 a 2,3%, e o enxofre entre 0,45 a 0, 9% (VASCONCELOS, 1995).

4.3 Histórico de mineração do carvão de Moatize

O Distrito de Moatize apresenta empreendimentos com gama diversificada de atividades, ligadas ao seu vasto potencial de reservas de carvão mineral e minério como titânio e ferro-vanádio, entre outros. As atividades minerárias na região de Moatize remontam ao início do século XX, com a *Société Minière et Géologique du Zambeze* - SMGZ extraíndo cerca de 20.000 t. ano de carvão, precisamente, durante a década de 20. Nesse período, a SMGZ manda executar trabalhos de reconhecimento e levantamento geral das bacias de Moatize, Revúbuè e Murongodzi o que resulta em uma carta geológica de 1:500.000. Com isso, começa-se a prestar atenção aos carvões de camadas André, Bananeiras e Chipanga e mais tarde, em face dos resultados obtidos até então, essa atenção centra-se praticamente sobre a camada Chipanga (VASCONCELOS, 1995).

Os estudos cartográficos, prospecção, sondagens e exploração do carvão na Bacia Carbonífera de Moatize remontam há vários anos. Uma das primeiras referências que se conhece sobre a existência de jazidas de carvão nesta região são de Bordalo (1859), no seu trabalho sobre estatística de Moçambique, e Thornton (1859) que fala do carvão descoberto por Livingston anos antes (VASCONCELOS, 1995).

Existem vários trabalhos publicados sobre a ocorrência de jazidas de carvão na região de Moatize, dentre os quais, pode-se destacar o de descrição de afloramentos do sistema de Karoo e do complexo Gabro-anortosítico de Tete (COELHO, 1969).

Todavia, a primeira descrição, na Bacia de Tete, da flora fóssil relacionada com as formações carboníferas foi realizada por Gothan (1912) e mais tarde, publicado sobre o assunto (GOTHAN, 1914 *apud* VASCONCELOS, 1995). Supõe-se que o conhecimento sobre as ocorrências de carvão em Moatize tenha sido no período de invasão de portugueses pelo Rio Zambeze no século XVI, quando fundaram as vilas de Sena e Tete (VASCONCELOS, 1995).

Durante a década de 80, e com vista ao desenvolvimento e alargamento de carvão de Moatize e bacias vizinhas, Minoja e Sanângoè, foram realizados estudos geológicos-mineiros, de viabilidade econômica, entre outros, com vista a financiamentos externos. Estes estudos obedeceram a diferentes fases para a identificação de recursos, assim como investigação, prospecção e exploração de jazidas de carvão em Moatize e áreas adjacentes, levados a cabo por organizações não governamentais estrangeiras.

Resumidamente o desenvolvimento da atividade mineira em Moatize compreendeu dois principais momentos: o período colonial, que vai desde as primeiras pesquisa de prospecção e exploração do carvão até a independência nacional e o período após

independência, que vai desde a fundação da CARBOMOC até aos dias de hoje. Desde a descoberta da bacia carbonífera de Moatize durante o período colonial, foram realizados muitos estudos na tentativa de descrever essa bacia carbonífera de Moatize (Bordalo, 1859; Thornton, 1859; Guyot, 1882; Lapierre e Zeiller, 1883; Kuss, 1884; Vasconcelos, 1995). As referências em relação a existência de recurso explorável naquela bacia, segundo Vasconcelos (1995) datam de 1887 e foram dadas por Choffat.

Em 1948 foi criada a Companhia Carbonífera de Moçambique (CCM), que procedeu mais tarde ao reconhecimento pormenorizado da bacia de Tete e Rovúbuè. A CCM foi extinta após a independência nacional de Moçambique.

No período pós a independência em 1975, e na sequência dos processos de nacionalização de empresas, em 1978 surgiu uma nova empresa moçambicana, com a responsabilidade de gerir os recursos carboníferos de Moçambique: a Empresa Nacional de Carvões de Moçambique (CARBOMOC E.E), criada através do Decreto no 11/78 do Conselho de Ministros. O período de transição da CCM para a CARBOMOC foi marcado por muitos acidentes, que levaram ao encerramento de algumas minas devido a presença do grisú (uma mistura do CH_4 (metano), que ocorre naturalmente nas minas de carvão, com o O_2 (oxigênio) do ar, formando em ambientes fechados uma mistura explosiva que detona facilmente na presença de chamas ou centelhas e constitui uma ameaça na mineração de carvão), aliada à instabilidade política o que fez baixar a exploração do carvão entre 1970 e 1989 (das 32710 toneladas exportadas anualmente em 1970 para 18200 toneladas em 1989 – Pantie, 2006). Na década de 90 as exportações da empresa registaram relativas melhorias, mas ainda muito longe de atingir as cifras do passado porque muitas das minas em funcionamento foram encerradas. Segundo Vasconcelos (1995), a CARBOMOC desenvolveu vários estudos geológicos na região, em parceria com várias empresas alemãs e soviéticas, a fim de estimar as reservas existentes na bacia de Moatize e a possibilidade de abertura de uma mina a céu-aberto.

Neste período o governo moçambicano estabeleceu vários acordos internacionais com empresas e países com vista a realização de estudos mais aprofundados sobre o carvão de Moatize. A crise da indústria do carvão em Moçambique teve o seu fim a partir de 2004, com a entrada de investimentos de Companhias multinacionais. Até outubro de 2013 o governo de Moçambique tinha concedido a 4 destas empresas as licenças para exploração deste recurso na província de Tete, nomeadamente: a Vale (Brasileira), Rio Tinto (Anglo - Australiano), ambas a operarem na área de Moatize – Minjova (na grande bacia do Zambeze), e mais recentemente a Jindal (Indiana) que possui uma mina em Changara e a ENRC (Cazaquistão). Contudo,

existem ainda outros projetos em curso que aguardam a aprovação do governo e outros que já tem a aprovação, mas cuja explorações ainda não iniciaram.

4.4 Processo de mineração do carvão em Moatize

A mineração do carvão mineral na bacia carbonífera de Moatize é realizada a céu aberto. Na estratigrafia de sequências deposicionais, a mineração ocorre na maior e economicamente viável de toda série produtiva, a camada Chipanga. Na região existem várias companhias mineradoras apresentadas na Tabela 3, o destaque vão para a brasileira Vale, a Consórcio Indiano *Internacional Coal Ventures* (ICVL), a Jindal África e a Sul Africana Minas Moatize Ltda, as quais produzem dois tipos de carvão, o térmico e metalúrgico. Dentre estes megaprojetos transnacionais, a Vale Moçambique é a maior companhia mineradora e detém a maior concessão mineira. A capacidade de produção da mina é de 11 milhões de toneladas de carvão térmico e metalúrgico por ano (VALE, p 55, 2014), seguida da ICVL com produção anual aproximada a 6 milhões de t. ano de carvão coque, 2 milhões de t. ano de carvão térmico e 4 milhões t. ano de carvão, para queima na central térmica em Moatize (DAVID e SAMPAIO, 2012).

Tabela 3 - Principais empresas na pesquisa e exploração do carvão em Tete

NOME DA EMPRESA	PAÍS DE ORIGEM	LOCAL E ESTÁGIO DO PROJETO	ACIONISTA DO PROJETO	PRODUÇÃO ANUAL PREVISTA (MILHÕES DE TONELADAS)	
				CARVÃO COQUE	CARVÃO TÉRMICO
Vale Moçambique	Brasil	Moatize 1 (a produzir) e Moatize 2 (Início de produção 2015*) – em Tete	Vale 85%; Estado Moçambicano 5%; e 10% reservados a investidores nacionais	17,16 em Moatize 1 e 2 (sendo 8,58 em cada projeto)	5,2 em Moatize 1 e 2 (sendo 2,6 em cada projeto)
Rio Tinto	Austrália/ Reino Unido	Benga (a produzir desde 2012)	100% da Rio Tinto (anteriormente pertença da Riversdale Mining que vendeu por US\$ 3,8 bilhões à Rio Tinto).	Benga, 6 e Zambeze, 13,5	Benga, 4 e Zambeze, 9
Jindal	Índia	Changara em Tete, início de produção 2013		3	2
Eurasian Natural Resources Corporation (ENERC)	Reino Unido/ Cazaquistão	Cahora-Bassa, Início de produção 2013	Kazakhmys 26% Alex Mashkevitch 14,6% Alijan Ibragimov 14,6% Patokh Chodiev 14,6% Propriedade do Estado & Comité de Privatização do Ministério das Finanças do Cazaquistão 11,6%.	6	4
Ncondedezi Coal Mining		Ncondezi; Início de produção 2014*.	Strata Limited: 44,8 % Henderson Global Investors 8,6 % Investic Asset Management 7,2% Spearpoint 6% Ncondezi Trust No. 1 Ogier Employee Benefit Trustee Limited 5,5% Evergreen Resources Holding (HK) Limited 4,9% Goldman Sachs Nominees 3,8%	0	10,5
Anglo -American	Reino Unido/EUA	Projecto Revuboe Início de produção 2015*	Anglo-American 58,9%; Nippon Steel Corporation 33,3% e POSCO 7,8%	5,1	3,4
Beacon Hill Resources	Reino Unido	Minas de Moatize, a produzir desde 2011, em Tete.		0,72	1,64

Fonte: CPI- Centro de Promoção de Integridade: 2013

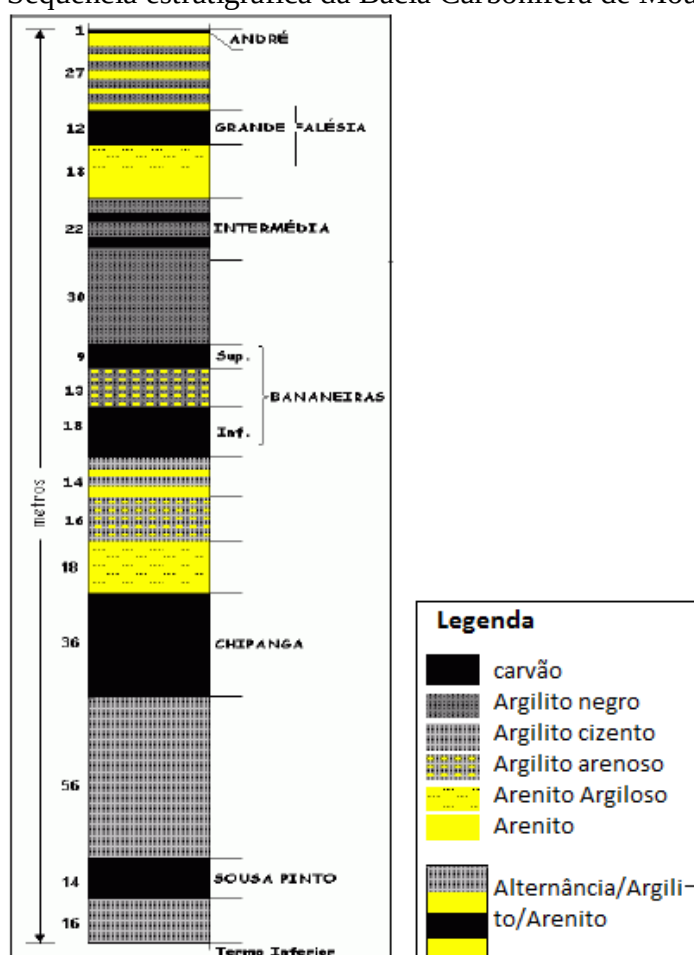
* Previsão de início.

A concessão da Vale está localizada a 20 km no nordeste da cidade de Tete. A companhia foi projetada para em 35 anos de exploração produzir 26 Mt/ano de carvão processado (GOLDER ASSOCIATES AFRICA, 2010). A Vale é a maior empresa instalada na região, esperando atingir o auge de cerca de 22 milhões de toneladas de carvão processado em

2018. A área de concessão minerária da Vale para o desenvolvimento do projeto em Moatize é de cerca de 23 780 ha, dividida em seis seções ou camadas principais. A vila de Moatize que encontra-se inserida dentro da área de concessão mineira da Vale. Os principais destinos do carvão processado da Vale Moçambique em Moatize são os mercados globais da Ásia, Europa, África do Sul e Brasil, no mercado internacional (SELEMANE, 2010).

Na região de Moatize existem várias camadas de carvão, as chamadas “*seams of coals*” ou veios de carvão. São depósitos de carvão diferenciados em termos de estratigrafia, formando grandes camadas de carvão que são diferentes umas das outras, na sequência de cima para baixo, com as seguintes designações: André, Grande Falésia, Intermédia, Bananeira, Chipanga e depois, em baixo da Chipanga temos a Sousa Pinto (Figura 9). Estas camadas apresentam características distintas quanto a sua composição química e aproveitamento econômico.

Figura 9 - Sequência estratigráfica da Bacia Carbonífera de Moatize



Fonte: Adaptado de Vasconcelos, (2005)

Camada Bananeira – corresponde ao complexo de xistos e carvão, formando por duas subcamadas, uma superior com espessura de 9 metros, e outra inferior com 18 m intercaladas por argilito arenoso;

Camada Chipanga – a mais importante sob ponto de vista da sua espessura atingir em média 36 m e apresenta muro e teto com pelitos cinzentos e grés xistoso;

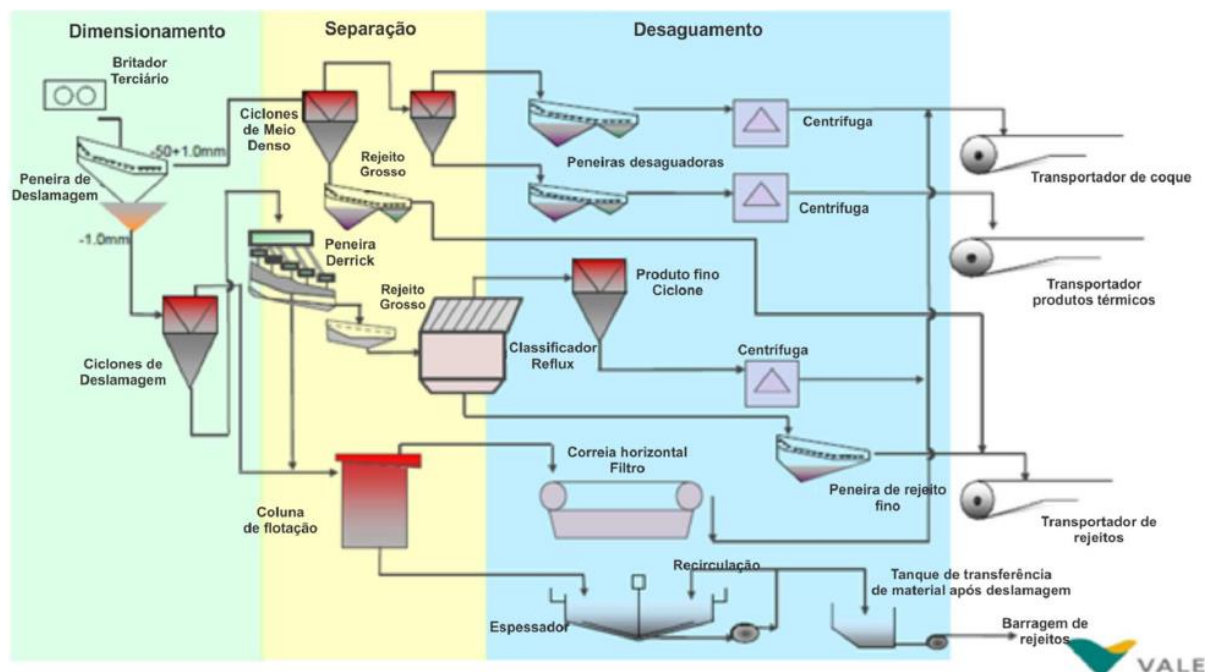
Camada Sousa Pinto – complexo basal carbonoso, intercalado nos pelitos cinzentos, apresentando espessura média de 14 m.

A camada de carvão que tem sido minerada pela companhia Vale é denominada de Chipanga. Chipanga é, economicamente, a mais importante das jazidas de carvão em Moatize, lateralmente a mais extensa e a mais espessa com 36 metros e, portanto, tem as maiores reservas (GOLDER ASSOCIATES AFRICA, 2010). A camada Chipanga é constituída por xistos, grés, carbonosos, argilitos negros, por vezes piritosos do Permiano Inferior que equivale ao Grupo Eccia do Karoo (REAL, 1966 *apud* CHEVANE, 2012). O carvão tipo chipanga tem baixo teor de umidade, o que diminui os custos do processo de coqueificação, e resulta em dois produtos, que são o carvão metalúrgico e o carvão térmico (VALE, 2015).

A qualidade do carvão da Bacia carbonífera de Moatize é de alto nível no *rank*: tipo betuminoso, com teor de voláteis variando de alto a baixo, ocasionalmente, antracíticos em algumas áreas (DNG, 2006). A hulha betuminosa pode ser empregada em altos fornos siderúrgicos na fusão com o ferro gerando ferro metalúrgico ou aço. Também serve como combustível a vapor na geração de energia elétrica. A hulha betuminosa ainda auxilia na produção de cimento, bebidas, cerâmica, dentre outras finalidades.

A Vale venceu o concurso para explorar a reserva mineral de Tete em 2004. Em 2006, começou o estudo de Pré-viabilidade do projeto e em 2007, começou com a pesquisa geológica na região, com a definição de espessura e qualidade do carvão. A Vale Moçambique detém 23.780 hectares em concessões de mineração e são válidas até 2032 (VALE, 2015). O contrato tem validade de 25 anos contados a partir do início da fase de produção, quando é iniciada a extração do mineral, e é renovável por mais 25 anos (CONCESSÃO MINEIRA, 2005). A mina de Moatize se encontra em operação desde 2011 e projeta-se sua exaustão para 2042 (VALE, p. 74, 2014a). O processo de produção do carvão na Vale Moçambique consiste, essencialmente, em lavra do carvão, britagem da rocha e beneficiamento do carvão na planta, apresentada na Figura 10.

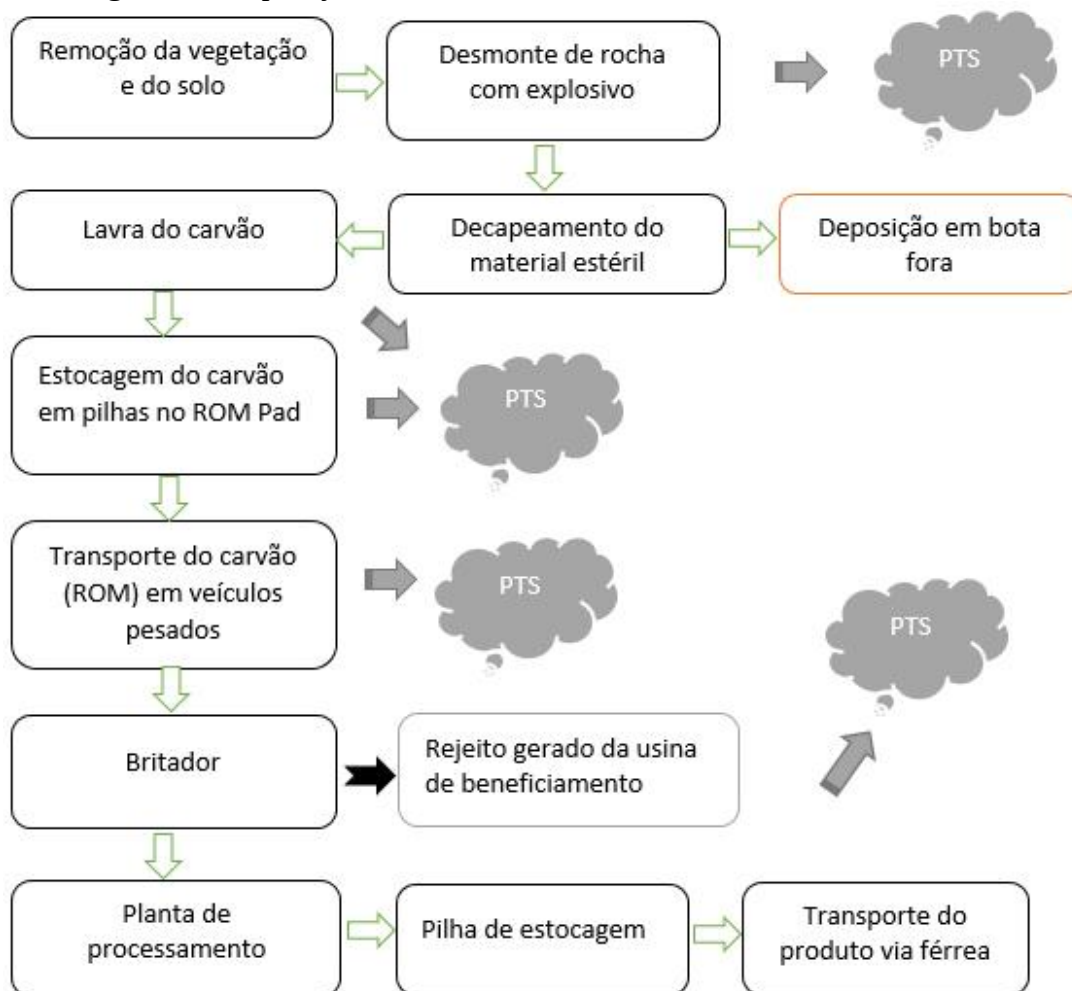
Figura 10 - Diagrama simplificado de produção do carvão – Vale, Moatize



Fonte: Vale, 2015

Na mina de Moatize desenvolve-se a lavra do carvão que, por sua vez, é transportado por meio de caminhão fora de estrada e armazenado no ROM pad próximo à estação do britador, onde o carvão bruto ROM “*run of mine*” será beneficiado. Nesta fase, ocorre o basculamento do carvão bruto, gerando grande emissão e dispersão de PTS. A Vale ressalta que durante todo este processo registram-se emissões de particulados, porém, destacam-se algumas fases com maior emissão de particulado na atmosfera como o basculamento no ROM pad, britagem, tráfego de veículo pesado e beneficiamento do carvão na planta. Finalmente tem-se o processo de mistura de diferentes qualidades do carvão separado, resultando no que é chamado de produto. A seguir é apresentado o processo de desenvolvimento mineiro e emissão de PTS e cada fase de atividade (Figura 11).

Figura 11 - Operações de lavra à céu aberto de carvão e emissão de PTS



Fonte: Autoria própria

Através do fluxograma de processo de produção de carvão mineral, pode-se observar as principais fases do processo, desde a lavra ao produto final. Neste processo, são usadas várias tecnologias de separação física na limpeza e beneficiamento do carvão. Neste processo a emissão de PTS está presente em quase todas as fases, desde a primeira - antes da escavação a partir da superfície para ter acesso ao minério, que consiste em remoção da vegetação e do solo - até a fase de transporte do minério destinado ao mercado por meio da ferrovia.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Amostras obtidas

As amostras de carvão analisadas neste trabalho foram doadas pela Mineradora Vale Moçambique. Para tal, foram facultadas amostras de carvão bruto e amostras do produto processado. Estas duas categorias de amostras foram necessárias, para identificar a estrutura e composição química da jazida. Foi, igualmente, disponibilizada amostra de poeira de carvão coletada na área de mina, através de extrator de poeira do laboratório de preparação de amostras de carvão bruto para análise de qualidade.

5.2 Local de amostragem

As coletas de amostras de material particulado para a determinação da concentração mássica foram realizadas no Posto Administrativo de Moatize, em cinco pontos, previamente definidos, isto é, bairro Liberdade, bairro Carbomoc, bairro 25 de Setembro, comunidade Cateme e bairro Minas Moatize. As coordenadas geográficas dos pontos de amostragem são apresentados na Tabela 4 e ilustrados na Figura 12.

Tabela 4 - Pontos amostrais de partículas totais em suspensão

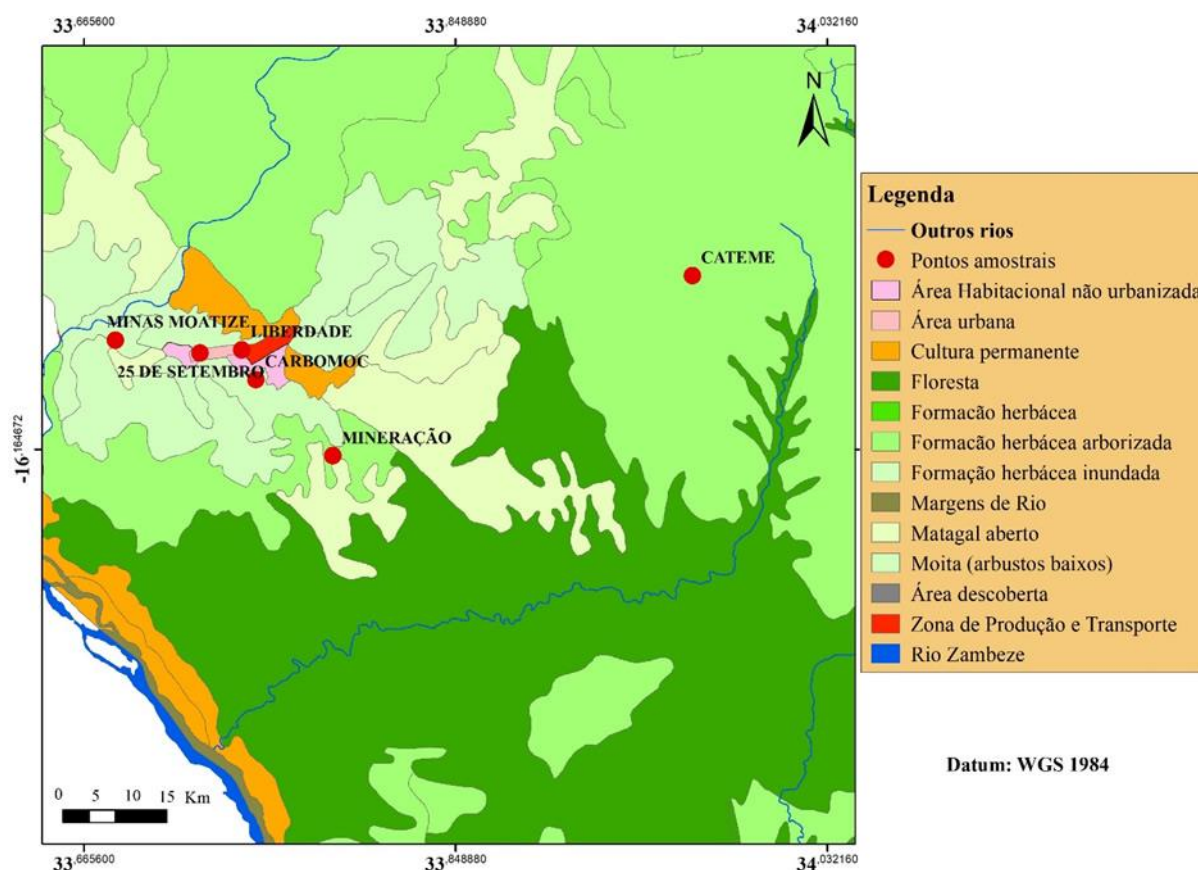
PONTO	LOCAL	COORDENADAS	
		LATITUDE E	LONGITUDE S
1	Minas Moatize	8218656	0572825
2	Bairro 25 de setembro	8208933	0518645
3	Bairro Liberdade	8218100	0579479
4	Bairro Carbomoc	8216762	0579849
5	Comunidade Cateme	8222051	0603266

Fonte: Autoria própria

A escolha dos pontos foi realizado após uma visita de campo, envolvendo conversas informais e administração de questionários aos residentes dos bairros para aferir a real situação ambiental decorrente da emissão de material particulado da mineração do carvão mineral em Moatize. Com base nos depoimentos e observação, foram definidas áreas potencialmente poluídas por material particulado, ideais para a definição de pontos amostrais.

Após identificação das áreas potencialmente poluídas por material particulado, foi feita a marcação dos pontos amostrais localizados em quintais de residências com base em acordo alcançado entre as partes para a instalação dos amostradores de material particulado.

Figura 12 - Localização de pontos de amostragem, PA.



Fonte: Autoria própria

Os dados utilizados para o mapeamento foram obtidos de duas fontes de informações: dados primários (relacionadas à informações em campo) e secundários (provenientes de imagens satélite).

Desta forma, foi utilizado o software ArcGis 10.3, e realizadas as seguintes etapas:

- Utilizou-se aparelho GPS marca Garmin Etrex 30 para a obtenção das coordenadas UTM dos pontos;
- Seleção de dados e tratamento de imagens;
- Imagens de satélite LANSAT 8 de 2016, resolução espacial de 30 metros, do mês de agosto, correspondente à área de interesse;
- CLIP (corte de imagem satélite “RASTER” para delimitar a área de interesse);
- Exportar os pontos de localização marcados em campo criando formato shape file.

Para a geração de mapas de relevo foram utilizadas curvas de nível com equidistância de 10 m. As curvas passaram por um processo de interpolação a fim de gerar um Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizando o algoritmo de interpolação TOPO TO RASTER, disponível no módulo ArcToolbox do aplicativo computacional ArcGIS 10.3.

Com base nos pontos de amostragem foi realizada a delimitação das áreas de influência no entorno das mineradoras por meio do comando “buffer”, disponível no módulo Arc Toolbox do programa ArcGIS 10.3, delimitando-se um raio de influência direta das minas de 10 quilômetros, a partir de cada mina em operação, foram gerados raios “buffer” de dois em dois quilômetros até alcançar o raio dos pontos impactados por material particulado.

Para melhor descrever e representar a direção e velocidade do vento da área de estudo, foi utilizado o *software* WRPLOT View (<http://www.weblakes.com/>) para gerar rosas de vento com base nos dados meteorológicos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique.

5.3 Equipamento de amostragem

Para a coleta de PTS nos cinco pontos foi utilizado amostrador composto por uma bomba de vácuo tipo pistão, da marca Biomec, modelo BCP 16/SC; gasômetro tipo fole ACTARIS, modelo G1.6 utilizado em amostradores de chaminé, amostradores ambientais, para medir o volume de ar coletado em cada amostra. A bomba de sucção suga um volume de 8,5 litros de ar por minuto através de *in let* (região de entrada, admissão), totalizando 12.247 litros de ar a cada 24 horas de amostragem, perfazendo 360°, coletando o ar por qualquer direção. O PTS é retido em filtros de PVC com diâmetro de 37 mm e diâmetro de poro de 5,0 μm , da marca SKC Inc. O aparato de amostragem foi aferido previamente utilizando o método de espirometria ou bolhômetro que consiste em ligar um tubo de vidro graduado para obter o volume de ar que passa pela seção utilizando uma bolha gerada por uma solução de sabão e gerada na boca deste tubo. O aparato suga o ar deste tubo com a bolha que funciona como se fosse um pistão de ar que se movimenta ascendentemente e neste percurso, cronometramos este volume para obtermos a vazão corrigida de ar no aparato, este tipo de calibração é utilizado para bombas pessoais nas coletas de partículas baseado na norma NR15 de saúde ocupacional.

As amostragens dos materiais particulados foram realizadas no ano 2015 de Janeiro à dezembro, abrangendo as duas estações do ano, verão e inverno, totalizando 52 semanas. Em decorrência de limitações técnicas e de equipamentos, não foi possível realizar amostragens diária durante o ano no ponto 1 (minas Moatize), portanto, as mesmas eram realizadas em dois

dias por semana, cobrindo as estações de inverno e verão. Contudo, foi possível obter resultados satisfatórios próximos, comparados com os dados dos registros efetuados nas estações de monitoramento da Vale Moçambique. No total foram realizadas ao todo 364 amostras para cada ponto de amostragem, com exceção do ponto um (Minas Moatize), com apenas um total de 104 amostras.

Antes das medições os filtros foram mantidos no dessecador com sílica gel durante 24 horas a fim de evitar a hidratação da superfície dos mesmos e acondicionados no mesmo ambiente em que se encontra a balança, sob as condições estabelecidas. Cada filtro foi pesado três vezes para a obtenção do valor médio. Estas atividades foram realizadas no laboratório da INTERTEK cedido pela Vale Moçambique, sob autorização do gestor do meio ambiente da mineradora.

Para a determinação da concentração mássica de material particulado (PTS) foi utilizada a técnica de gravimetria, consistindo na pesagem de cada filtro, previamente dessecado, antes e depois da coleta, com o objetivo de determinar seu ganho líquido em peso, sendo a diferença de peso obtido a quantidade de material particulado para a amostra no período amostrado de 24 horas. A concentração de material particulado é calculada em mg m^{-3} , dividindo-se a massa das partículas pelo volume de ar amostrado, corrigido para as condições padrão de temperatura e pressão (25°C, 760 mmHg), conforme o Art. 4º, § 3º da Resolução CONAMA nº. 3/1990 (BRASIL, 1990).

5.4 Análise estatística

Na avaliação dos dados de PTS foi aplicada estatística descritiva, utilizando-se do programa IBM SPSS *Statistics* versão 22, com a obtenção de média, desvio-padrão e correlações das variáveis que determinaram a variabilidade na concentração de PTS e qualidade do ar no Posto Administrativo de Moatize. Elaborou-se matriz de correlação para encontrar a covariância de cada par de variáveis medidas. Neste caso, o coeficiente de correlação amostral representou a covariância dos valores amostrais padronizados, assumindo valores no intervalo [-1;1], onde o valor positivo ou negativo indica geralmente a direção da associação para esta pesquisa levou-se em consideração ambos os valores das correlações.

Os valores obtidos foram comparados com padrões de qualidade do ar nacionais (legislação moçambicana) e brasileiro – Resolução nº. 3/1990 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1990).

Os dados de parâmetros meteorológicos (vento, umidade relativa do ar, precipitação e temperatura) usados como variáveis na análise de correlações, com as concentrações de PTS, na área de estudo foram fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique e são referentes à série de dados de período de 2003 a 2016.

Os dados de PTS e MP₁₀ utilizados para analisar os comportamentos das concentrações nos anos de 2015 e 2016 no bairro 25 de setembro foram fornecidos pela Vale Moçambique, cujos registros foram efetuados em duas estações automáticas de monitoramento de material particulado, através de equipamentos da marca Verewa, Modelo F-701-20. Os registros foram realizados nos períodos chuvosos (verão), de outubro à março e seco (inverno), de abril à setembro, de forma ininterrupta.

5.5 Caracterização do carvão de Moatize

A obtenção das informações morfológicas da amostra do carvão de Moatize fornecida pela Vale Moçambique foi realizada recorrendo a microscópio eletrônico de varredura convencional, em detector de elétrons secundário com aumentos na tela de 100 e 500 x, permitindo estabelecer a morfologia externa do carvão, e para análise da composição química em camadas profundas do material com aumento de 100x. A análise foi realizada utilizando-se de microscópio eletrônico de varredura LEO 440i, acoplado a um espectrômetro de energia dispersiva de raios X. Nas análises de imagem e EDS do breu foram obtidas utilizando-se de microscópio eletrônico de varredura ambiental, da marca FEI, modelo Quanta 250.

As amostras do carvão após cominuição, foram acondicionadas em colunas de teste. Os resultados das análises químicas dos percolados foram submetidos à análise de variância pelo procedimento ANOVA e as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

5.5.1 Determinação da composição química do carvão de Moatize por Microscopia Eletrônica de Varredura

O uso em conjunto de MEV-EDS torna-se de grande importância na análise de amostras geológicas. Enquanto o MEV permitiu obtenção de nítidas imagens, com EDS foi possível determinar a composição química pontual de amostras geológicas, gerando mapas composicionais de elementos de interesse. A técnica é baseada na detecção da energia do fóton

de raios X que é produzido quando o feixe de elétrons atinge a amostra. A causa da energia deste fóton é pela transição eletrônica que sofre um elétron de um nível de energia maior para um nível de energia menor. As transições que experimentam os elétrons abrangem normalmente níveis de energia mais internos do átomo, por conseguinte são característicos do mesmo átomo emitindo os raios X desse nível de energia.

5.5.2 Determinação da composição estrutural do carvão por difratometria de raios X

A determinação da morfologia e da composição do carvão bruto foi realizada recorrendo à difratometria de raios X, utilizando-se difratômetro Rigaku Miniflex, usando fonte de radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0,15406 \text{ nm}$), tensão de 30 kV e corrente de 15 mA, em rotação de 5-80° numa escala de 2θ , aplicando passos de 0,02° em 0,6 s por passo. Os resultados foram analisados usando *Diffraction Plus software*, integrado com JPCDS – *International Center for Diffraction Data* (ICDD) versão 2001.

5.5.3 Determinação de elementos do carvão e na poeira do carvão por CHN e ICP OES

A análise de CHN permitiu a determinação de elementos principais, como parte de compostos orgânicos no carvão, a análise química de elementos maiores e traço foram efetuadas por Espectrômetro Óptico de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES, Radial) da marca Spectro, modelo Arcos e ICP Optima 7300 DV Perkin Elmer 2400. Esta técnica foi também utilizada para determinar elementos comumente encontrados em compostos orgânicos como carbono, hidrogênio e nitrogênio, elementos maiores e traço no carvão e na poeira do carvão. A digestão da amostra foi realizada em duas etapas: (1) lixiviação com ácido nítrico concentrado em bloco digestor a 80° C; (2) filtração e tratamento do resíduo por fusão alcalina com tetraborato de lítio e de dissolução com ácido nítrico.

5.6 Obtenção da resina de *Pinus* e extração do breu

Foi utilizada a resina da *Pinus elliottii* var. *elliottii*, para obtenção do breu como matéria prima, para nova formulação de base vegetal. A viscosidade do pinus foi determinada em 1,53 mPa.s⁻¹ após diluição em etanol, na concentração de 1,6 %. O viscosímetro utilizado foi o SV-10 Vibro Viscometer. A resina de pinus foi fornecida pelo Instituto Florestal, através da Estação

Experimental do órgão, localizado no Barro Branco, Itapetininga, que possui uma área de 6.700 hectares, com 3.500 em produção.

A primeira fase laboratorial volta-se para extração do breu da resina. A resina obtida por resinagem na árvore em pé, da *Pinus elliottii*, foi acondicionada em recipiente hermeticamente fechado e guardado em geladeira a 5 °C. A seguir, a resina sofreu processo de destilação a vácuo, separando o breu e a terebintina, conforme preconizado por Mirov (1961). O breu passou por modificação química prévia por sulfitação, para diminuir sua viscosidade, já que os extratos brutos possuem elevada viscosidade. A reação de sulfitação foi efetuada empregando-se uma parte de pinus, 1,5 parte de água, 3% de sulfito de sódio e HCl 10 M, até um pH próximo de 3,0. A reação foi mantida em aquecimento e agitação constante, permanecendo sob refluxo por um período de 90 minutos.

5.6.1 Determinação da estrutura morfológica do breu por microscopia eletrônica de varredura

Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura convencional para obtenção de informações morfológicas do breu. A eletromicrografia de superfície chegou a aumento de até 5000 x, após recobrimento com ouro. A análise foi realizada utilizando-se de microscópio eletrônico de varredura LEO 440i, acoplado a um espectrômetro de energia dispersiva de raios X. Nas análises de imagem e EDS do breu foram obtidas utilizando-se de microscópio eletrônico de varredura ambiental, da marca FEI, modelo Quanta 250.

5.6.2 Determinação de grupos funcionais do breu por espectroscopia de infravermelho

A análise por espectroscopia de infravermelho foi utilizada para investigar a presença de grupos funcionais dos materiais estudados, o breu visando o entendimento das estruturas químicas e análises referentes a potenciais interações entre os reagentes, o ácido γ -poliglutâmico e o produto de síntese. A avaliação através de espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier foi realizada em pastilha prensada do reagente, misturado com KBr (1%, em massa de reagente em relação àquela de KBr) empregando a técnica de transmissão. Foi utilizado o equipamento Perkin Elmer Frontier, sendo efetuada 64 varreduras entre 400 - 4000 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e intervalos de 1 cm^{-1} .

5.6.3 Análise termogravimétrica

A análise Termogravimétrica (TGA) foi realizada para acompanhar a variação de massa da amostra em função do tempo e da propagação da temperatura e a estabilidade térmica do pinus (breu). Esta análise foi efetuada por TA Instruments, modelo Q500 V20.13 Build 39.

5.6.4 Caracterização do supressor de poeira por microscopia confocal de varredura a laser

Para analisar se houve a incorporação do supressor de poeira na matrizes de poeira, utilizou-se de microscopia confocal de varredura a laser Zeiss (LSM 510-Meta), que possui quatro lasers possibilitando a excitação de amostra em diversos comprimentos de onda. O material particulado foi disposto sobre lâmina de sílica, prensado com lamínula e encaminhado para obtenção de imagem. A aderência do supressor de poeira na partícula de carvão foi investigada.

O preparo da amostra do supressor de poeira para análise por microscopia confocal para investigar a aderência do supressor de poeira na partícula de carvão foi com base na técnica conhecida como distensão ou extensão, adaptada do método empregado em preparação de amostras para demonstrar os tipos celulares.

Pequena porção de pó de carvão é colocada diretamente sobre a lâmina de vidro e espalhada em fina camada pela sua superfície. Isso é obtido espalhando o pó de carvão com a borda da lâmina ao longo de outra lâmina, com o objetivo de produzir monocamada de partícula de carvão. Em seguida, gota de amostra do supressor de poeira é colocada diretamente sobre uma das extremidades da lâmina de vidro contendo o pó de carvão e com auxílio de outra lâmina, coloque a gota do supressor em contato com sua borda. Para isso a lamina extensora deve fazer movimento para trás tocando a gota com o dorso em ângulo 45°.

A gota é espalhada pela borda da lâmina extensora por capilaridade em camada fina pela superfície, com o objetivo de produzir monocamada de supressor de poeira. Uma vez formada a película do supressor sobre os grãos de carvão mineral sobre a lâmina, é sobreposta lamínula e fixada por meio de base esmalte.

5.7 Delineamento experimental – formulação do supressor de poeira

5.7.1 Agentes experimentais

Agentes experimentais selecionados: Breu (Colofônia de goma resina), ácido γ -poliglutâmico (γ -PGA), álcool etílico >99,9% PA, alginato de sódio, hidróxido de sódio, água ultra-pura, glutaraldeído, Lauril éter sulfato de sódio. O γ -PGA estudado foi o de 30% fornecido pela Shandong Freda Biotechnology, China.

O preparo da formulação do supressor de poeira obedeceu três fases distintas, a primeira consistiu-se em selecionar os materiais e reagentes, além da matéria prima (breu), a segunda fase consistiu de caracterização do supressor de poeira e a terceira, testes de adesividade, análise da interação entre as partículas de pó de carvão e o supressor de poeira.

Em todos os experimentos, reagentes de grau analítico e água ultrapura foram empregados para preparo de soluções. A água ultrapura (resistividade de $18,2 \text{ M}\Omega \text{ cm}^{-1}$ a 25°C) foi obtida a partir do sistema de purificação de água Gehaka, modelo Master System MS2000. O ácido γ -poliglutâmico (γ -PGA) na sua forma sódica, produto da Shandong Freda Biotechnology, com pureza de 30% foi utilizado na formulação do supressor de poeira.

5.8 Síntese e caracterização do supressor de poeira

No processo de síntese do supressor de poeira fez-se uso de centrífuga de bancada Digital Excelsa II modelo 206-BL FANEN, com velocidade máxima de 3600 rpm. A viscosidade foi medida utilizando-se de viscosímetro Brookfield, modelo DV-II. Na caracterização do supressor de poeira foram empregadas técnicas de microscopia eletrônica de varredura, de fluorescência confocal e varredura a laser (CLSM) e espectroscopia de fluorescência no infravermelho (FTIR). O material sintético também foi caracterizado por espectroscopia de infravermelho, visando o entendimento das estruturas químicas e análises referentes a potenciais interações entre os reagentes. Para complementar os estudos de síntese, foi avaliada a lixiviação do supressor de poeira em colunas, contendo porções do minério de carvão. Foi analisado o comportamento dos primeiros centímetros da pilha de carvão em relação à estabilização do produto.

O método de Walker também foi utilizado para avaliar a capacidade do inibidor no espalhamento sobre as partículas finas (PM_{10}), separadamente. Para este experimento 40 miligramas de material fino foi lançado a uma altura fixa sobre a superfície do supressor

sintético, tendo como base um prato da balança ultrassensível. O tempo de molhagem foi considerado tendo-se como base o de tempo necessário para que toda amostra se assente completamente sobre o prato da balança.

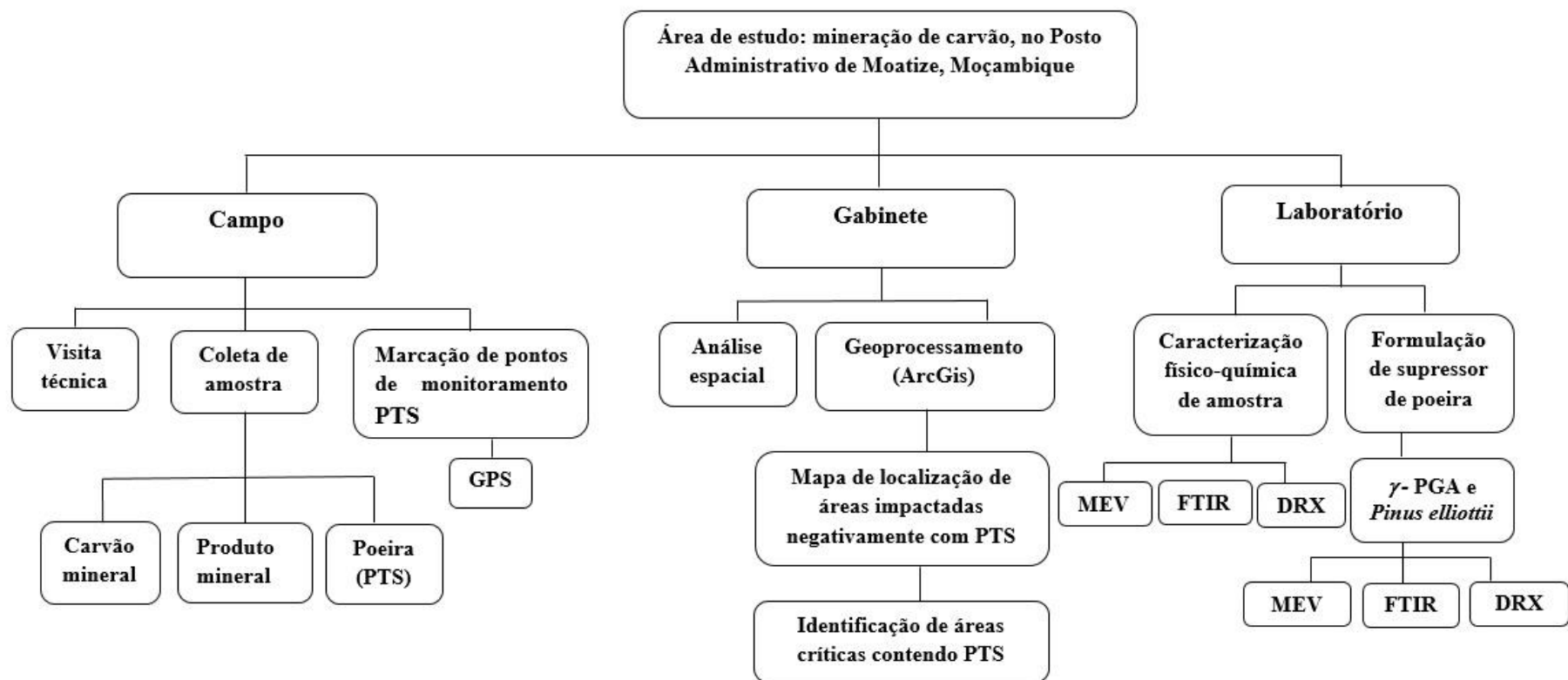
5.8.1 Preparação de supressor de poeira de carvão

Inicialmente dissolveu-se 2g de breu em álcool etílico, a solução resultante é transferida para um béquer; sendo adicionado 4g de γ -PGA 30% dissolvida em água ultrapura; 1g alginato de sódio em água ultrapura.

A solução (massa/volume) de breu 2% em álcool etílico e a solução de γ -PGA 30% em 4% em água ultrapura são subsequentemente adicionados ao béquer, finalmente adicionado 0,5g de agente reticulante (glutaraldeído 25%), mantida sob leve agitação na placa magnética em temperatura ambiente durante 30 minutos. Em seguida, adicionou-se impermeabilizante (1mL) para aumentar resistência mecânica e repelência face a água no supressor. Foram realizadas séries de experimentos. Na primeira série, na solução de breu e γ -PGA com adição de alginato de sódio, foi mantida em agitação constante em banho maria aquecida em 40° C por 1h. Na segunda série não foi adicionada o alginato de sódio e glutaraldeído, sendo adicionado Lauril éter sulfato de sódio como agente surfactante para diminuir a tensão superficial no supressor.

A seguir é apresentado o fluxograma metodológico das principais atividades e sua articulação em campo, gabinete e laboratório, com finalidade de esclarecer melhor todo conjunto estudado (Figura 13).

Figura 13 - Fluxograma de atividades da pesquisa realizadas em campo, gabinete e laboratório



Fonte: Autoria própria

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

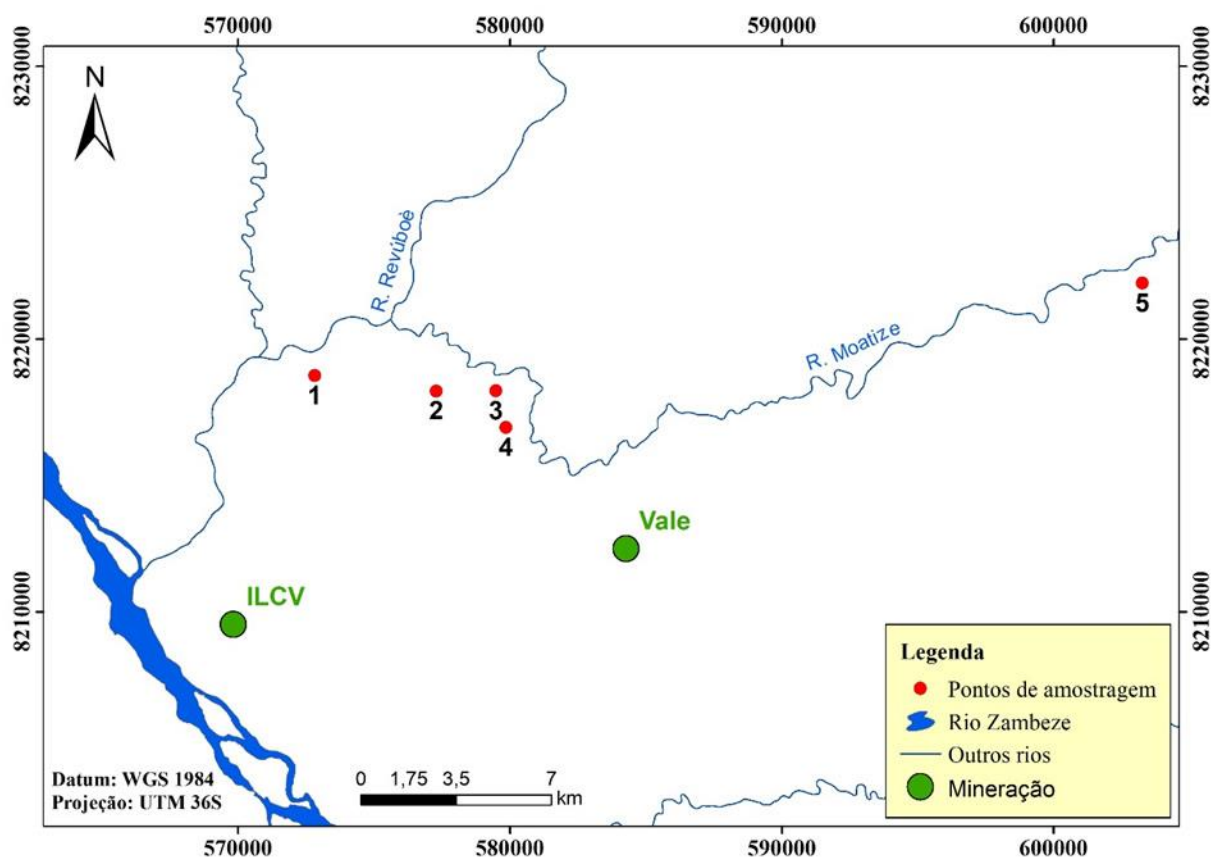
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos registros em campo das concentrações de partículas totais em suspensão monitorados nos cinco pontos, assim como, os dados das estações automática da Vale Moçambique, nos pontos bairro 25 de Setembro e bairro Carbomoc em 2015, e analisados os regimes de ventos predominantes na área de estudo. São igualmente apresentados os resultados de análises do carvão mineral, assim como da poeira de carvão doado pela Vale e análise do supressor de poeira de base vegetal.

6.1 Áreas contendo materiais particulados oriundo da exploração de carvão em Moatize.

6.1.1 Partículas totais em suspensão no Posto Administrativo de Moatize

Deve-se ressaltar que os 5 pontos amostrais representam as comunidades contíguas as áreas de mineração, onde foram registradas as concentrações mássicas de partículas totais em suspensão, parte delas estão localizadas dentro do perímetro da área de concessão mineira Vale Moçambique e ILCV. Os pontos Minas Moatize (1), Bairro 25 de Setembro (2), Bairro da Liberdade (3) e Bairro Carbomoc (4) são as mais próximas destas áreas de mineração, sendo a comunidade Cateme (5) o único ponto afastado das fontes de emissão de PTS (Figura 14).

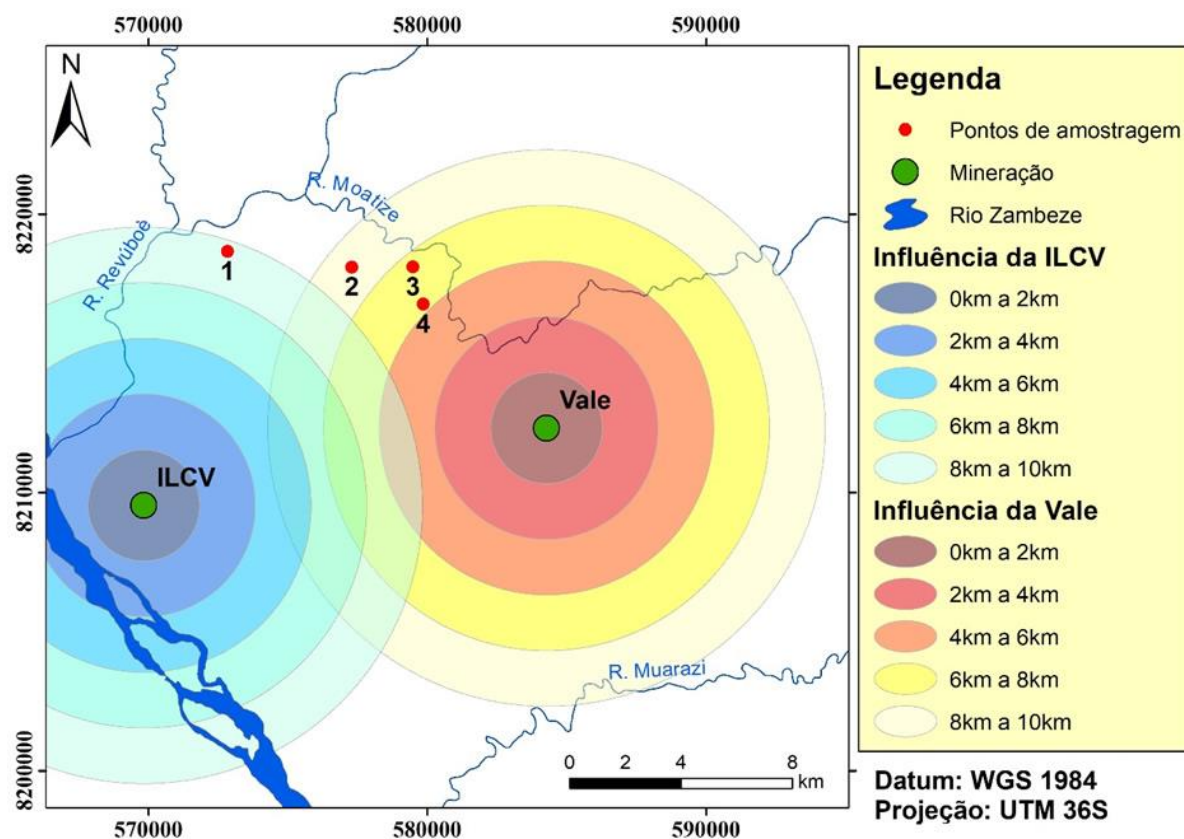
Figura 14 - Pontos amostrais de PTS, minerações de carvão.



Fonte: Autoria própria

A poluição por PTS nestes pontos pode ser resultado da contribuição conjunta das emissões atmosférica das mineradoras em operação no Posto Administrativo de Moatize devido à proximidade das comunidades às áreas da mineração. Os impactos negativos por PTS nos pontos amostrais do Posto Administrativo de Moatize são evidenciados através de registros efetuados em campo ao longo dos meses de janeiro à dezembro de 2015, abrangendo os pontos Minas Moatize (1), Bairro 25 de Setembro (2), Bairro da Liberdade (3) e Bairro Carbomoc (4) situados em média 8 a 10 km de distância em relação as áreas de mineração de Moatize, área de influência direta da mina (Figura 15).

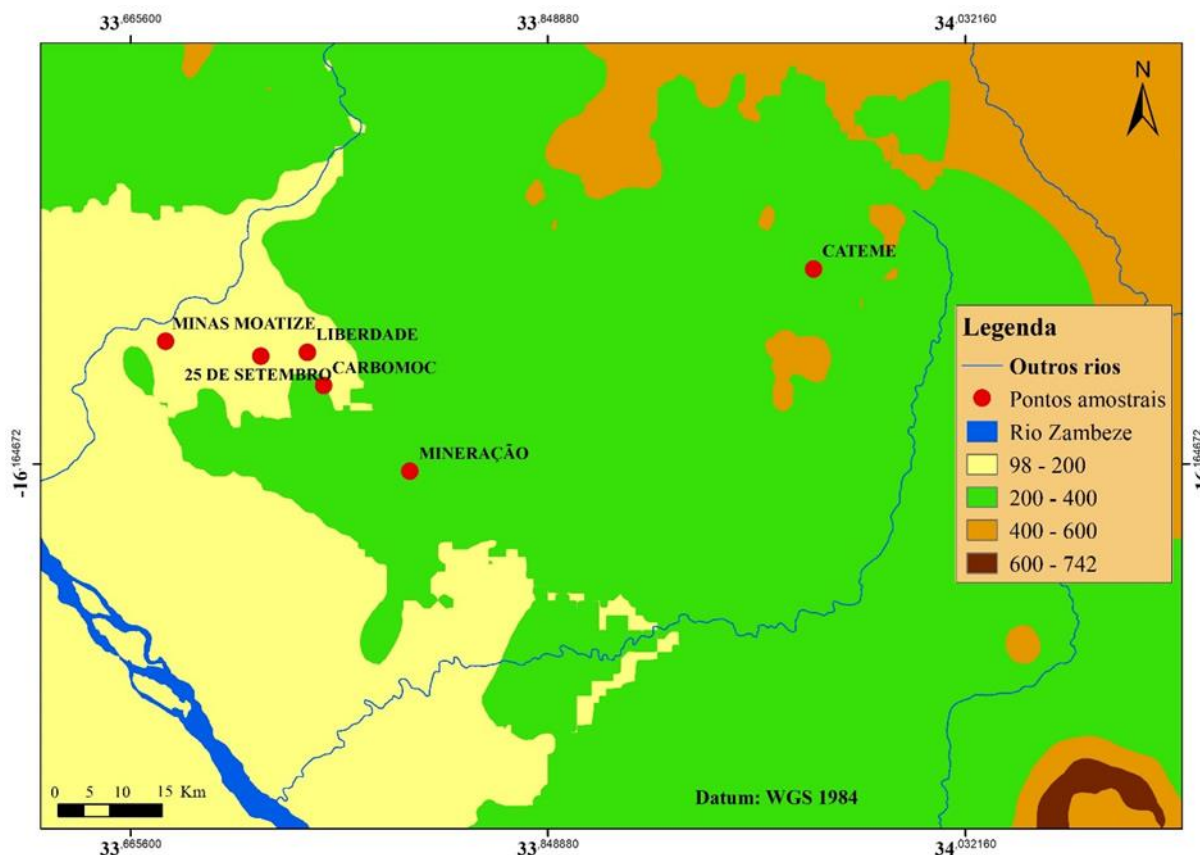
Figura 15 - Áreas de maior influência da mineração.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 15 apresenta as áreas impactadas por material particulados: Minas Moatize (1), Bairro 25 de Setembro (2), Bairro da Liberdade (3) e Bairro Carbomoc (4) contendo altas concentrações médias anuais de PTS para os pontos 1 – $126,66 \mu\text{g m}^{-3}$, 2 – $154,24 \mu\text{g m}^{-3}$, 3 – $132,40 \mu\text{g m}^{-3}$, e 4 – $133,91 \mu\text{g m}^{-3}$, decorrente da aproximação destes pontos em relação as áreas de mineração. Os fatores meteorológicos estão em consonância com as características da superfície (topografia), interferindo no campo de vento, pois, o relevo da área de estudo também exerce influência, haja visto que as áreas de mineração estejam localizadas em áreas com cotas que variam entre 200 a 400 metros. Os ventos do sul e sudeste dispersam os materiais particulados das minas de carvão, transportando e depositando-os nos pontos localizados em áreas com cotas que variam entre 98 a 200 metros (Figura 16).

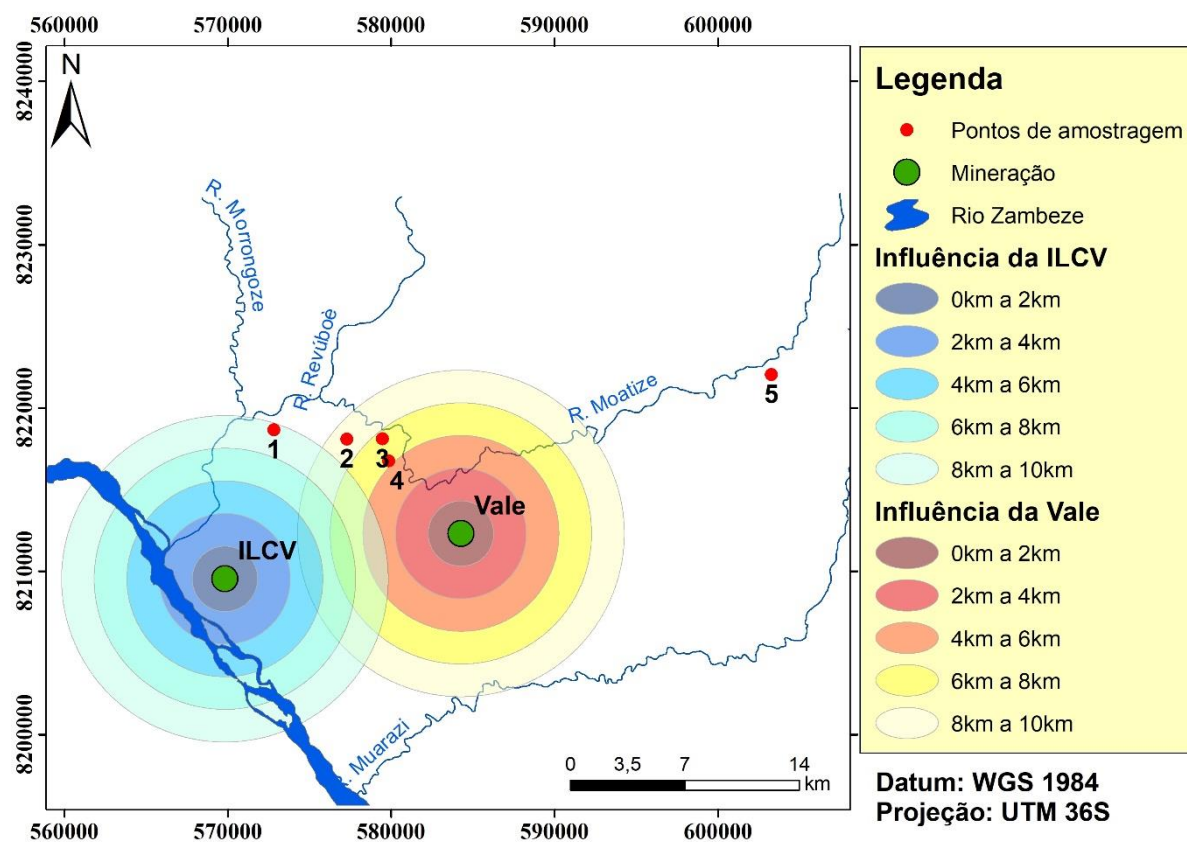
Figura 16 - Relevo da área de influência direta da mineração.



Fonte: Autoria própria

A Comunidade Cateme registrou em 2015 concentração baixa, $4,93 \mu\text{g m}^{-3}$. Este ponto 5, situa-se mais afastado das principais fontes de emissão de material particulado, as minerações de carvão, nesse caso. Encontra-se também fora do alcance da faixa dos ventos do sul e sudeste com cargas de material particulado procedentes das fontes de emissões, fora da área de influência das minas (Figura 17), pois, a concentração da imissão deve ser tanto menor quanto mais distante estiver o local da fonte de emissão e quanto maiores forem as possibilidades de diluição (fatores meteorológicos).

Figura 17 - Área sem influência direta da mineração, Cateme.

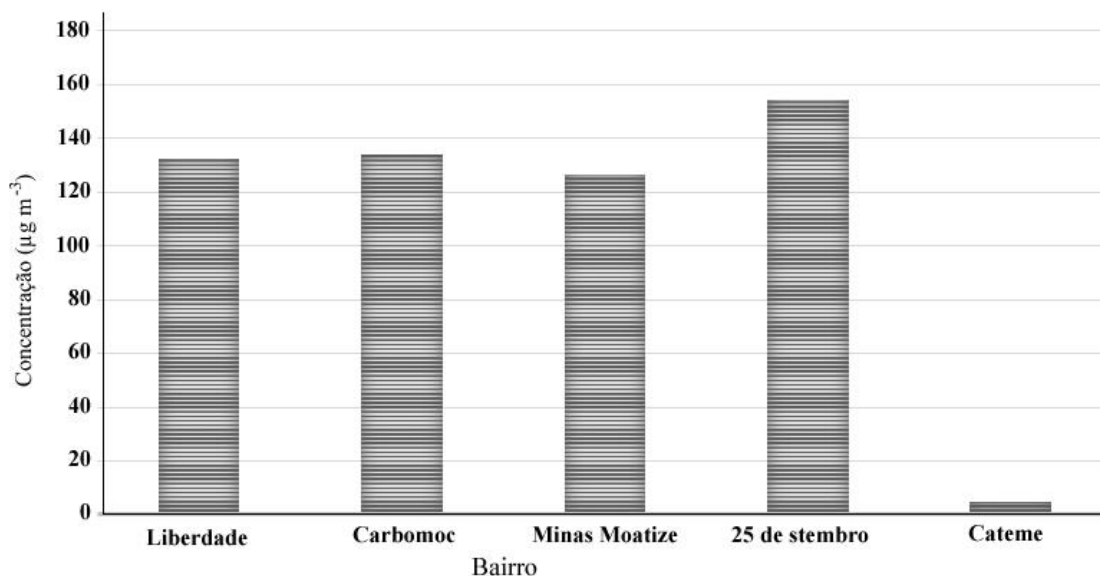


Fonte: Autoria própria

A Figura 17 apresenta área não impactada por material particulados no ponto 5 (comunidade Cateme) e as áreas impactadas 1, 2, 3 e 4, estas quatro últimas anteriormente mencionadas.

Realizando uma análise comparativa das concentrações mássicas de partículas totais em suspensão, concluiu-se que o bairro 25 de setembro se apresenta como o ponto mais impactado pelas emissões de material particulado procedente da mineração de carvão de Moatize em 2015 (Figura 18). Para esta análise foi tomada em consideração as faixas de concentração de material particulado permitidas pela legislação moçambicana, Decreto de Emissão de Efluentes n° 67/2010, Padrão primário de qualidade do ar fixado por lei em $60 \mu\text{g m}^{-3}$ para PTS anual (média aritmética).

Figura 18 - Comparação das áreas impactadas por PTS no PA de Moatize – 2015.



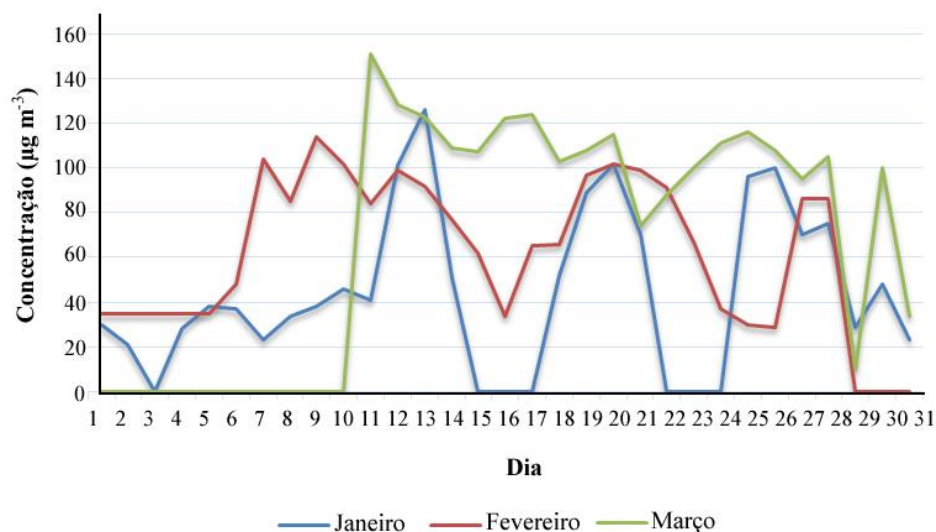
Fonte: Autoria própria

Os dados a seguir se referem as concentrações mássicas de material particulado, PTS de monitoramento no bairro 25 de setembro e MP₁₀ fornecido pela Vale Moçambique. Os comportamentos sazonais, referentes as concentrações de PTS diárias, trimestrais e semestrais, são também analisados.

6.1.2 Cargas PTS no bairro 25 de setembro

Nesta análise observa-se que o ano 2015 apresentou com variações significativas nas estações do ano, verão e inverno. No primeiro trimestre de 2015, registrou-se leve aumento das concentrações de PTS nos primeiros dias de janeiro, apresentando grandes variações até ao final do mês; o mês de março teve um aumento repentino das concentrações no final da primeira quinzena, apresentando um pico de aproximadamente 150 µg m⁻³, próximo do limite estabelecido na legislação moçambicana Decreto de Emissão de Efluentes n° 67/2010 que fixa para o padrão primário e secundário, concentração de PTS diário em 150 µg m⁻³. Portanto, no primeiro trimestre, os valores não violaram os padrões em referência, se mantendo relativamente no mesmo nível, com pequena queda no final do trimestre (Figura 19).

Figura 19 - Concentração diária de PTS no primeiro trimestre, Bairro 25 de setembro – 2015.

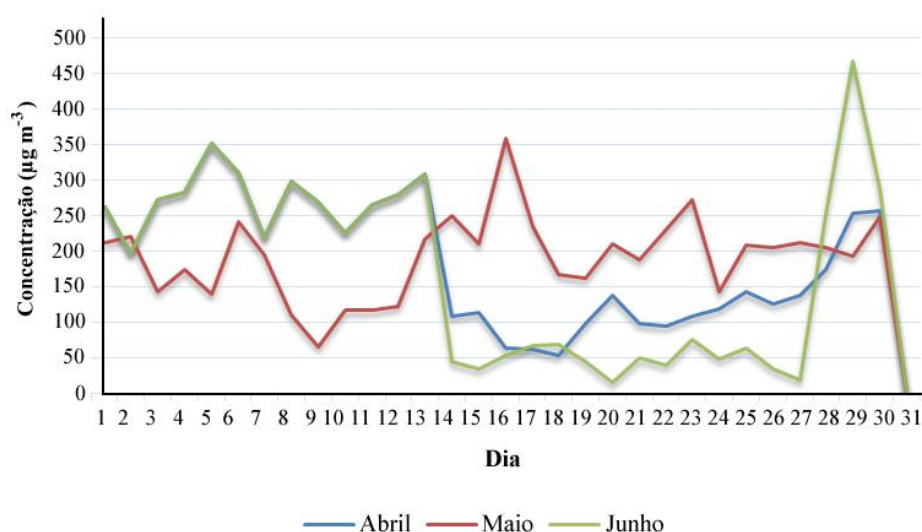


Fonte: Autoria própria

Este comportamento pode ser atribuído às condições meteorológicas, caracterizada por precipitação pluviométrica que se registra em Moatize nos meses de janeiro e fevereiro, iniciando-se sua diminuição em março.

Para o segundo trimestre, o cenário de poluição atmosférica por material particulado se altera bastante, se elevando os níveis de concentração de PTS no PA de Moatize, apresentando picos maiores nos dias 17 de maio e 29 de junho, contudo, de forma geral se apresenta como um trimestre bastante poluído por cargas de material particulado (Figura 20).

Figura 20 - Concentração diária de PTS no segundo trimestre, Bairro 25 de setembro – 2015.

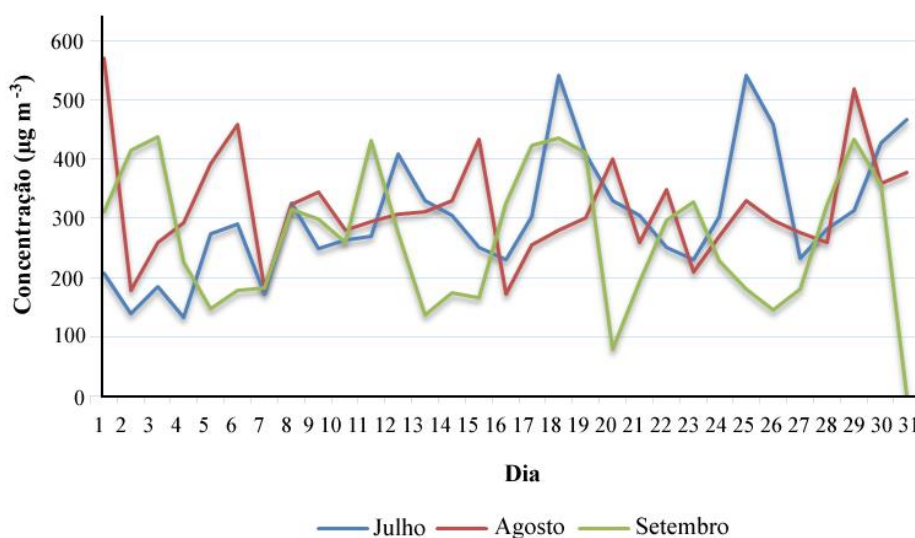


Fonte: Autoria própria

Na Figura 20, observa-se que com relação as PTS no bairro 25 de setembro, o padrão primário diário de acordo com a Legislação Ambiental moçambicana foi excedido nos três meses ($150 \mu\text{g m}^{-3}$). O pico de concentração de PTS no final do mês (29 de junho) pode ser atribuído à falta de precipitação (8 mm), período seco, aliado aos ventos, o que favorece o transporte de material particulado das áreas de mineração para as áreas circunvizinhas, afetando a qualidade do ar da região.

Na Figura 21 são apresentando os meses em que a qualidade do ar em Moatize pode ser descrito como de má qualidade. Só a título de exemplo, estes níveis de concentrações coincidem com os resultados obtidos em estudo no Morro da Fumaça, no sul da Santa Catarina entre os anos 1993 e 2009. Quando comparados os valores de concentração de PTS nos dois estudos são bastante próximos. Neste período foram registrados para cada mês os seguintes valores em $\mu\text{g m}^{-3}$: junho 243,7, agosto 372,08, setembro 595,66 e outubro 287,54 (SOUZA, 2011).

Figura 21 - Concentração diária de PTS no terceiro trimestre, Bairro 25 de setembro – 2015.



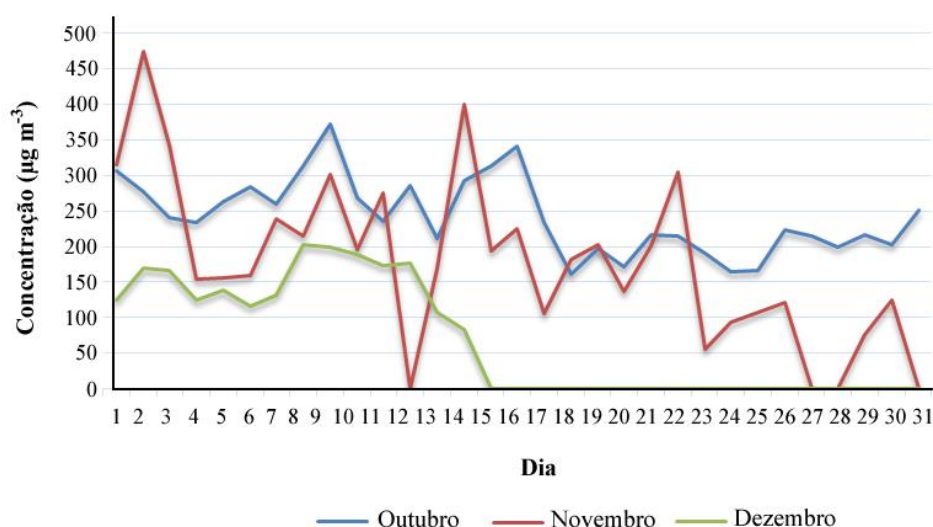
Fonte: Autoria própria

Na Figura 21, observa-se que com relação as concentrações de PTS, o Padrão Primário Diário de acordo com a Legislação Ambiental moçambicana ($150 \mu\text{g m}^{-3}$) é excedido no trimestre em referência. De acordo com o Decreto Estadual nº 59.113 de 23/04/2013 (CETESB, 2014), analisado sob ponto de vista de critérios para episódios agudos de poluição do ar, se estaria em estado de emergência, dado que o limite padrão ($250 \mu\text{g m}^{-3}$) é de longe ultrapassado nos meses em referência. No que concerne aos Padrões Nacionais de Qualidade do ar (PQAr) e os critérios para episódios agudos de poluição do ar definidos na Resolução CONAMA nº 3

de 28/06/90, se está no estado de atenção ($375 \mu\text{g m}^{-3}$) e próximo a alcançar o estado de alerta ($625 \mu\text{g m}^{-3}$). Este cenário pode ser atribuído às condições meteorológicas caracterizadas por déficit de precipitação no período em análise, dado que as condições meteorológicas, nesta estação, são mais desfavoráveis à dispersão dos poluentes (estabilidade atmosférica). A interação entre as condições atmosféricas e as fontes de poluição define o nível de qualidade do ar, e por conseguinte vai determinar o surgimento de efeitos adversos da poluição do ar sobre os receptores.

Para os meses de outubro, novembro e dezembro (Figura 22), verificou-se tendência de queda nos níveis de concentração de PTS, com ligeiras variações nos meses de outubro e novembro e, para dezembro registrou queda dos valores alcançando nível zero na segunda quinzena. Tais resultados são atribuídos à queda pluviométrica, 166 mm registrados neste mês (INAM, 2016), que desempenha ação importante na redução da dispersão de material particulado na atmosfera. Importante ressaltar que a precipitação pluviométrica passa a ser o único mecanismo capaz de remover os poluentes do ar, uma vez que sob tais circunstâncias estes não sofrem a ação dos ventos. Outrossim, importa ressaltar que com a lavagem da atmosfera pela chuva, há a transposição dos poluentes para o solo e águas superficiais (CAVALCANTI, 2010).

Figura 22 - Concentração diária de PTS no quarto trimestre, Bairro 25 de setembro – 2015.

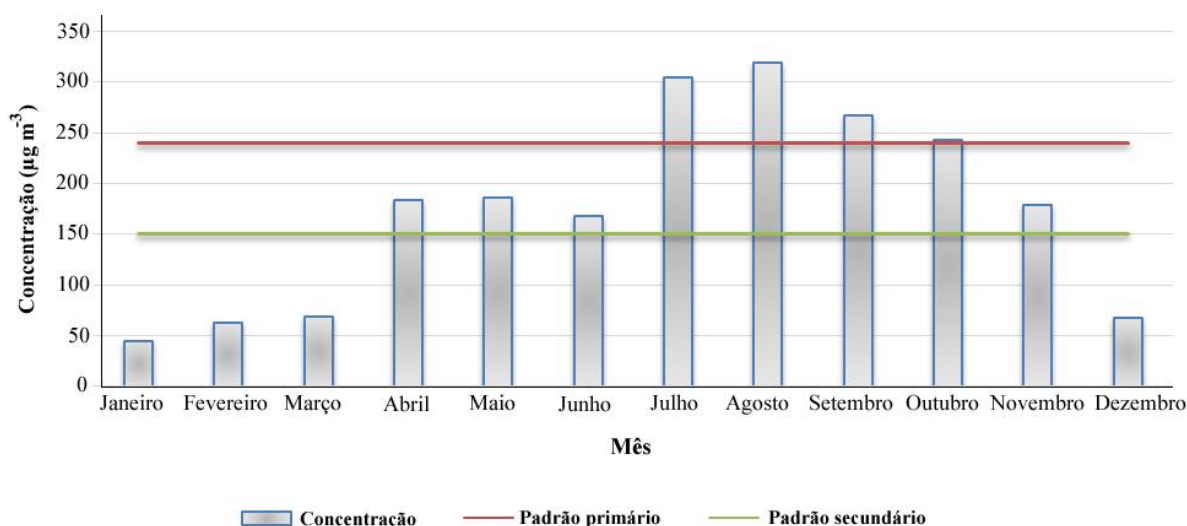


Fonte: Autoria própria

A Figura 22 ilustra as concentrações de PTS acima dos padrões estabelecidos pela Legislação Ambiental moçambicana ($150 \mu\text{g m}^{-3}$) e Resolução CONAMA. Para o padrão

primário fixado em $240 \mu\text{g m}^{-3}$ e Padrão Secundário em $150 \mu\text{g m}^{-3}$, os valores continuaram excedidos com exceção da segunda quinzena de dezembro, mês com maior precipitação. Analisados estes resultados, se constata que de forma geral no último trimestre de 2015 os níveis de concentrações de PTS no Posto Administrativo de Moatize mantiveram-se altos, não estando, portanto, em conformidade com a legislação vigente em Moçambique. Analisando os meses no que diz respeito aos maiores níveis de concentração registrados no ano de 2015, evidenciam-se os meses de junho, agosto e setembro, se destacando o segundo mês, agosto neste caso (Figura 23).

Figura 23 - Meses com concentrações de PTS excedidas, PA de Moatize – 2015.



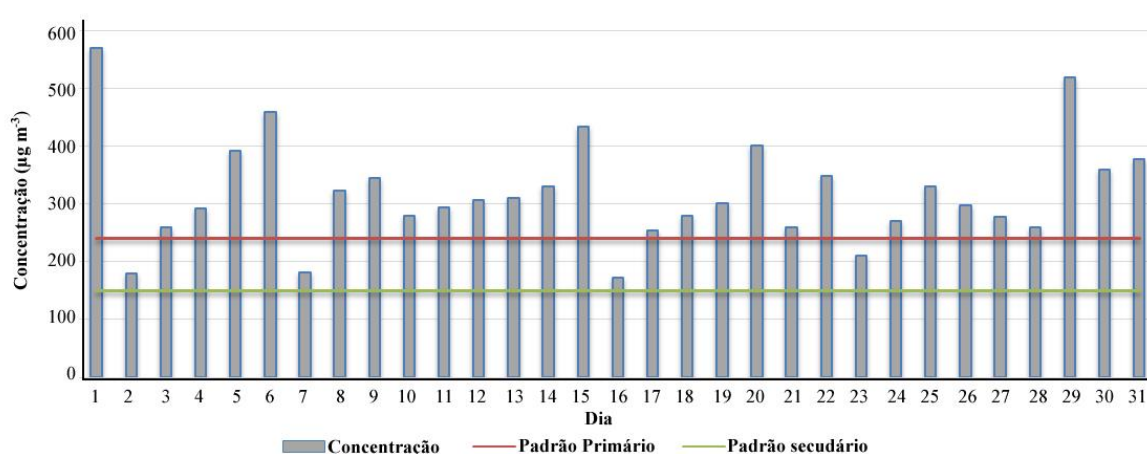
Fonte: Autoria própria

Na Figura 23 pode se observar aumento dos níveis de poluição do ar, concentração das PTS, ultrapassando o limite dos padrões secundário e primário. Este agravamento da presença de PTS, principalmente, entre julho a setembro, podem ser atribuídas as condições meteorológicas dominantes na região de Moatize na estação seca, que vai de abril a setembro. Neste período, essa região já não está sob influência da Zona de Convergência Intertropical (CIT), se traduzindo em bom tempo, seco, com céu limpo e ventos fracos. Estas condições meteorológicas anteriormente descritas, contribuem de forma expressiva para o cenário do acúmulo dos poluentes na atmosfera, pois estas condições atmosféricas, não são favoráveis ao transporte e dispersão de partículas, transformação e dispersão dos poluentes emitidos para a atmosfera, o que contribui para as possíveis ocorrências de situações críticas de poluição do ar nas áreas de emissão de material particulado.

Pode-se concluir que o comportamento sazonal das concentrações de PTS, os picos acontecem, na sua maioria, nos meses do inverno, principalmente em agosto. Tal fato pode ser atribuído os meses frios, pois, a dispersão e remoção dos poluentes na atmosfera são prejudicadas pelas temperaturas muito baixas e menores volume de chuva.

Dentre todos os meses analisados, o mês de agosto foi que apresentou maior número de dias com concentração de PTS altos, inclusive alguns deles com valores acima dos limites estabelecidos pela legislação ambiental (Figura 24).

Figura 24 - Concentração diária de PTS no mês de agosto de 2015.



Fonte: Autoria própria

A Figura 24 está representando as concentrações diárias de PTS do mês mais crítico, agosto e, neste caso, do ano 2015. De acordo com o Regulamento sobre Padrões de Qualidade Ambiental e de Emissão de Efluentes no Decreto n.º 67/2010 vigente em Moçambique, o limite de concentração de PTS em 24 horas é $150 \mu\text{g m}^{-3}$. Contudo, o gráfico demonstra clara violação do Quadro legal ambiental por parte das mineradoras no que concerne a poluição do ar, onde a concentração está perto dos $600 \mu\text{g m}^{-3}$.

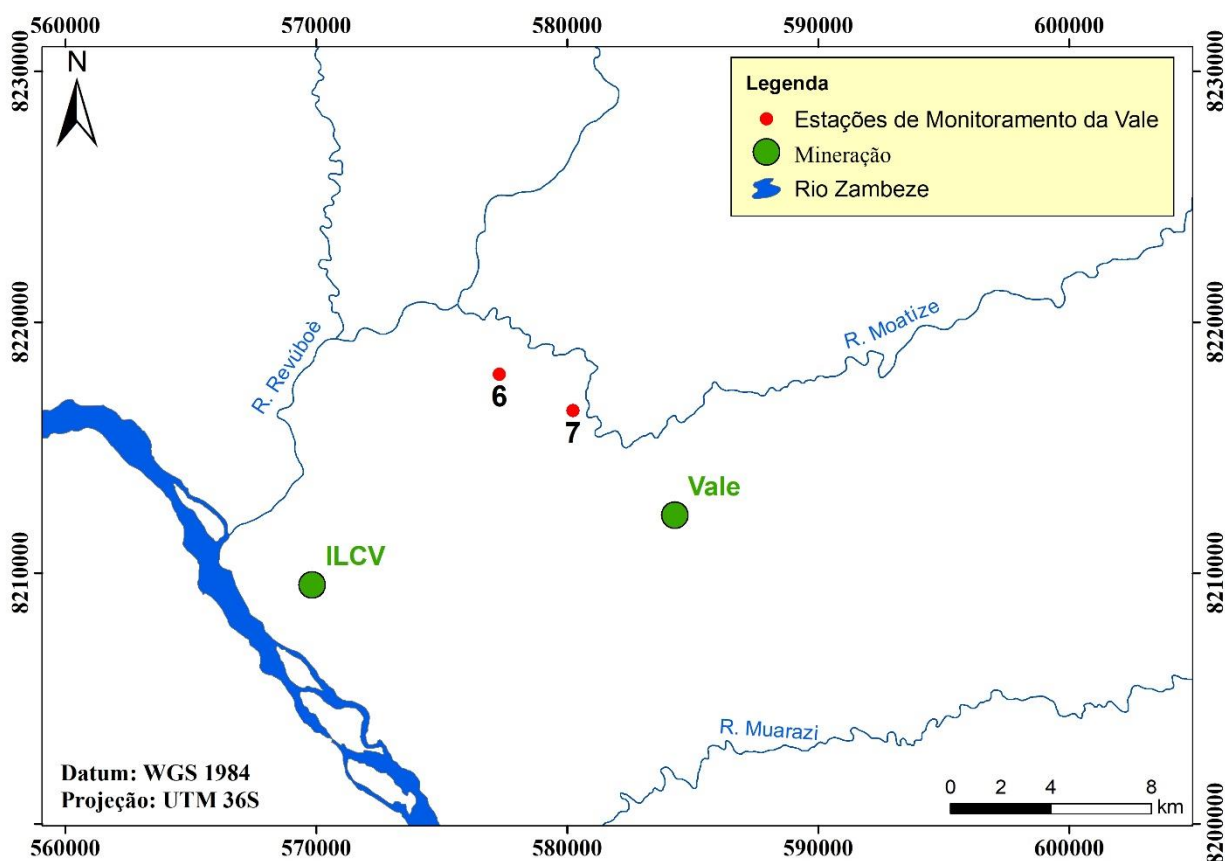
6.1.3 Cargas MP_{10} no Posto Administrativo de Moatize

Os dados sobre as concentrações de MP_{10} do PA de Moatize foram fornecidos pela mineradora Vale Moçambique. Estes dados são referentes a registros realizados nas estações de monitoramento de material particulado automáticas instaladas nas áreas circunvizinhas da mineração. Uma estação está localizada no bairro 25 de setembro, ponto 6 e outra no limite entre as secções de mineração e bairro residencial (Carbomoc), ponto 7, esta última, sendo

considerada estação de monitoramento de referência da Vale Moçambique. Os registros de MP são referentes ao ano de 2015, nos períodos chuvoso e seco, de forma ininterrupta.

As concentrações de MP₁₀, médias anuais de 2015 nos bairros 25 de setembro, ponto 6, e Carbomoc, ponto 7 são 37 $\mu\text{g m}^{-3}$ e 68 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente. Estes valores de concentração de MP₁₀ conforme as classes estabelecidas na estrutura de índice de qualidade do ar da CONAMA de nº 59.113/2013, são classificadas como sendo boa e moderada e, nesse caso, podemos considerar que esta carga de particulado não oferece grandes riscos ao meio ambiente (Figura 25). Contudo, para as PTS a realidade é totalmente diferente, haja visto que essas apresentam elevadas concentrações, sendo, portanto, situação crítica, como é apresentado adiante.

Figura 25 - Concentração de MP₁₀ média anual em 2015.



Fonte: Autoria própria

A Figura 25 ilustra dois pontos que apresentam concentrações médias anuais de MP₁₀ com valores de 37 $\mu\text{g m}^{-3}$ no ponto 6 e de 68 $\mu\text{g m}^{-3}$ no ponto 7, referentes ao ano 2015. Estes valores, de acordo com o quadro legal ambiental moçambicano e brasileiro são enquadrados

nas classes Boa e Moderada, como já foi referido anteriormente. Comparando com os resultados de outros estudos de qualidade do ar realizados no Brasil, como os de Cardoso, et al. (2014) e Amorim (2004), os resultados são próximos: médias anuais MP_{10} entre 20 a $95 \mu\text{g m}^{-3}$.

As concentrações de PTS dos resultados da análise dos dados fornecidos pela Vale nos mesmos pontos 6 e 7, correspondem a $151,62 \mu\text{g m}^{-3}$ e $139,93 \mu\text{g m}^{-3}$, respetivamente. Estes valores se referem às médias anuais geométricas, sendo considerado pela mineradora o ponto 7 como de referência para monitoramento, uma vez se encontrar no limite entre as secções mineradas e as comunidades.

De acordo com a legislação ambiental moçambicana e a resolução CONAMA para MP_{10} e PTS, estes valores estão acima do padrão primário 60 e $80 \mu\text{g m}^{-3}$ e secundário $60 \mu\text{g m}^{-3}$, respetivamente. Esta situação pode ser atribuída a aproximação dos dois pontos, situados a norte e noroeste das fontes de emissão de material particulado, na faixa abrangida pelos ventos do Sul e Sudeste.

6.1.4 Regime dos ventos da área de estudo

O vento é o primeiro mecanismo atmosférico de transporte de poluentes. Os ventos na Terra são resultados do gradiente de pressão devidas ao aquecimento ou resfriamento da atmosfera. Na escala local, áreas urbanas, industriais e rurais geram campos térmicos diferenciados que definem o comportamento atmosférico local. O mesmo é uma grandeza vetorial e como tal apresenta três componentes (x, y, z), sendo que a sua resultante determina a direção do vento em cada instante. O componente vertical do vento (z) é responsável pela turbulência enquanto que os outros componentes determinam essencialmente o transporte e a diluição do material particulado.

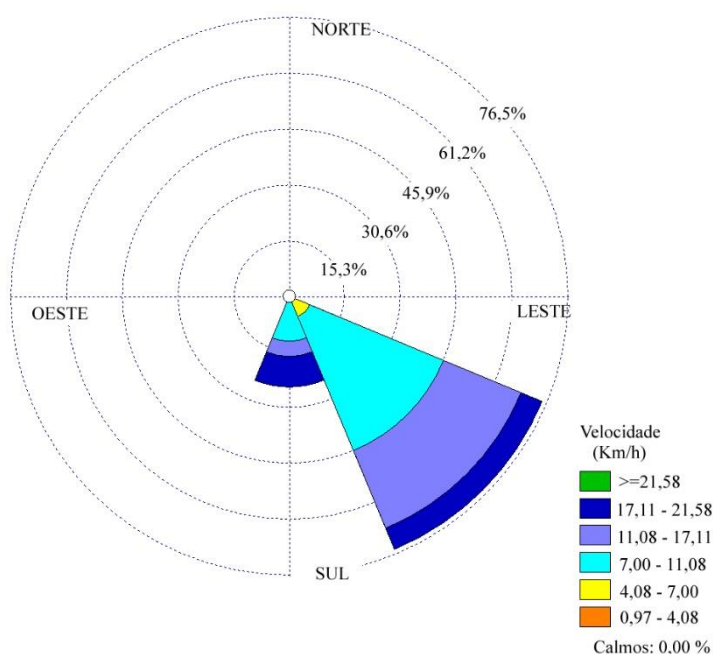
Os principais parâmetros utilizados para descrever o vento em determinado local são a direção, indicado pelo quadrante da rosa de ventos, e a velocidade. Considera-se a existência de calma quando a velocidade é igual ou inferior a $1,0 \text{ km h}^{-1}$, sem rumo determinável.

A velocidade média do vento na Estação de Tete, a mais próxima da área de estudo é de $6,6 \text{ km h}^{-1}$, sendo nos meses de dezembro a julho com velocidade aproximadamente de $5,5 \text{ km h}^{-1}$ e os restantes meses apresentam valores de velocidade do vento mais elevados, com média de $8,7 \text{ km h}^{-1}$. Em termos de direção do vento, as direções dominantes correspondem aos quadrantes sudeste e sul (BETA, 2011). Na análise do regime dos ventos considerou-se os dados fornecidos pelo INAM referentes à direção e velocidade do vento de mesoescala (extensão horizontal dessa escala é da ordem de 100 km, e na vertical é de dezena de metros até 1km) nos

últimos treze anos (2003 a 2016). Esta escala envolve os movimentos que incluem as brisas terrestres, circulação dentro de vales e os fenômenos de efeito de ilhas de calor. Os fenômenos dessa escala que influenciam a qualidade do ar local são variações diurnas da estabilidade atmosférica e a topografia regional.

A Figura 26 mostra a rosa-dos-ventos para o local, onde se verifica a predominância de ventos do sudeste (76%), seguida da direção sul (24%). Isso significa que o lado noroeste/norte deve ser mais impactado pelos empreendimentos mineiros, conforme será visto adiante.

Figura 26 - Rosa dos ventos – Moatize - 2003 a 2016.

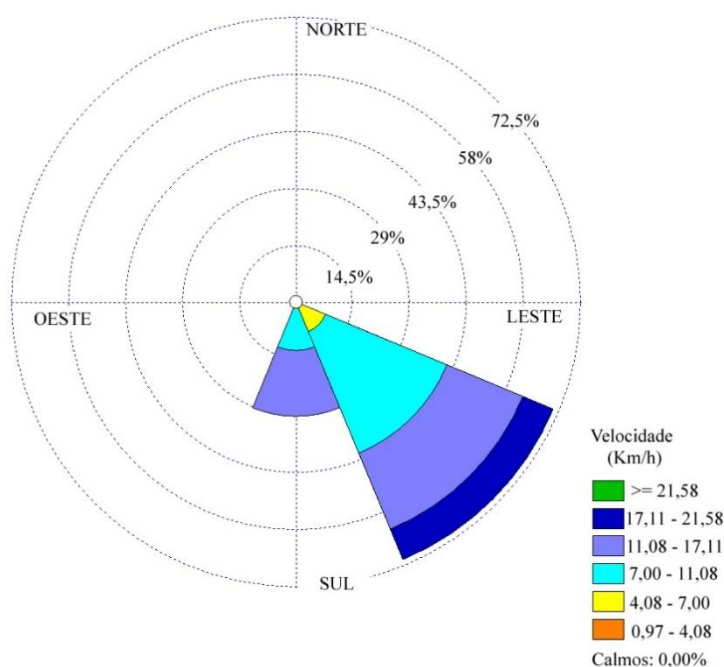


Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INAM, Organização, MAFAVISSE, Isaias Mutombo.

Os ventos de verão em Moatize são preferencialmente de sudeste e sul, com frequência de velocidades que variam de 7 a 11 km h⁻¹. Este comportamento se dá em decorrência de centros de baixas pressões no continente e de altas pressões localizadas no Oceano Índico, durante a estação de verão.

Os meses de verão são os que têm ventos um pouco mais intensos, conforme o regime anual de intensidade do vento mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Rosa dos ventos do verão – Moatize – 2015.

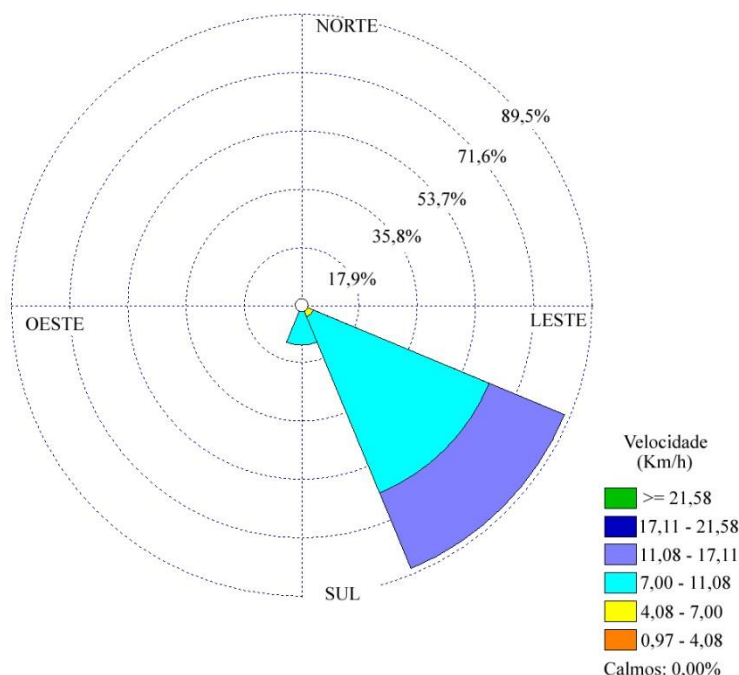


Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INAM, Organização, MAFAVISSE, Isaias Mutombo.

Foi verificado nesta pesquisa que o comportamento do vento em Moatize varia sazonalmente, sendo que essa variação apresentada pela velocidade e a frequência das classes dos ventos é mais acentuada na estação de verão, fenômeno relacionado a influência das perturbações tropicais associadas a CIT.

A seguir, é apresentado o comportamento do fluxo do vento referentes aos meses de abril a setembro, permitindo comparar o regime de circulação local entre um período quente e outro mais frio (Figura 28).

Figura 28 - Rosa dos ventos de inverno – Moatize – 2015.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INAM, Organização, MAFAVISSE, Isaias Mutombo.

Na rosa dos ventos anteriormente apresentada para o período seco, é possível identificar as direções predominantes dos ventos na área de estudo, sendo de sudeste. Neste período do ano, ocorre com frequência a dispersão dos materiais particulados devido à seca que caracteriza a estação do inverno, sendo, no entanto, os meses em que as concentrações de PTS se apresentam altos em comparação com as registradas no verão.

Nas rosas dos ventos apresentadas, considerando-se os dados da Estação Meteorológica de Tete, é possível identificar que a direção predominante dos ventos durante o ano é de sudeste.

6.1.5 Análise das concentrações mássicas de PTS e parâmetros meteorológicos no PA de Moatize

Os resultados das análises de concentração dos materiais particulados (TPS e MP₁₀) e parâmetros meteorológicos e correlação são apresentadas a seguir. A correlação entre os dados pode ser evidenciada com a análise de valores de concentração de material particulado e dos comportamentos dos parâmetros meteorológicos em cada ponto de amostragem (Tabela 5).

Tabela 5 - Matriz de correlação envolvendo materiais particulados e parâmetros meteorológicos

	Bairro 25 Setembro	Bairro Carbomo	Bairro Liberdade	Bairro Minas Moatize	Comunida de Cateme	Precipitação	Umidade Relativa	Tempera tura	Vento
Bairro 25 Setembro	1,000								
Bairro Carbomoc	-0,286	1,000							
Bairro Liberdade	0,772	-0,293	1,000						
Bairro Minas Moatize	0,978	-0,314	0,761	1,000					
Comunidade Cateme	-0,475	-0,084	-0,412	-0,372	1,000				
Precipitação	-0,774	0,107	-0,558	-0,800	0,071	1,000			
Umidade Relativa	-0,835	0,221	-0,696	-0,862	0,268	0,925	1,000		
Temperatura	-0,574	0,117	-0,446	-0,571	0,429	0,570	0,697	1,000	
Vento	0,761	-0,117	0,528	0,674	-0,694	-0,580	-0,738	-0,671	1,000

a. Determinante = 2,00E-006

Fonte: Autoria própria

A Tabela 5, mostra correlação significativa entre as variáveis 25 de setembro ($r=0,761$), Liberdade ($r=0,528$), Minas Moatize ($r=0,674$) e variável vento; Liberdade e 25 de Setembro ($r=0,772$), Minas Moatize e 25 de Setembro ($r=0,978$), precipitação e umidade relativa ($r=0,925$), precipitação e temperatura ($r=0,570$).

Estas correlações moderadas positivas entre as concentrações de PTS nos pontos 25 de Setembro, Liberdade e Minas Moatize com o vento mostram que as concentrações de partículas totais em suspensão procedentes das minerações são transportadas pelos ventos e, portanto, quanto maior for a velocidade do vento na direção preferencial sudeste, maior será a concentração do material nestas áreas.

Ainda pode se observar as correlações moderadas negativas entre a umidade relativa do ar, precipitação e as concentrações de PTS nos pontos 25 de setembro ($r=-0,835$), ($r=-0,774$); Liberdade ($r=-0,696$), ($r=-0,558$) e Minas Moatize ($r=-0,862$), ($r=-0,800$), respectivamente, explicando uma relação inversa entre as concentrações de PTS e a umidade.

Portanto, a umidade relativa do ar contribui para a redução da dispersão das PTS, ou seja, quanto maior for a umidade relativa do ar menor será a concentração das PTS.

As correlações entre Liberdade, Minas Moatize e 25 de Setembro mostra que a concentração do material particulado entre elas é decorrente da proximidade dos pontos e se influenciam mutuamente dada as direções dos ventos predominantemente sul sudeste, o que é evidenciado com os valores das concentrações nos pontos serem mais próximo comparativamente aos restantes pontos amostrados.

Analisando a estatística descritiva, baseada nas categorias para a correlação por Santos (2007), verificou-se a correlação simples entre as variáveis estudadas, de acordo com os coeficientes de correlação de Pearson obtidos (Tabela 6).

Tabela 6 - Categorias de avaliação da correlação de Pearson

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO	CORRELAÇÃO
$p = 1$	Perfeita positiva
$0,8 \leq p < 1$	Forte positiva
$0,5 \leq p < 0,8$	Moderada positiva
$0,1 \leq p < 0,5$	Fraca positiva
$0 < p < 0,1$	Ínfima positiva
0	Nula
$-0,1 < p < 0$	Ínfima negativa
$-0,5 < p \leq -0,1$	Fraca negativa
$-0,8 < p \leq -0,5$	Moderada negativa
$-1 < p \leq -0,8$	Forte negativa
$P = -1$	Perfeita negativa

Fonte: Adaptado de Santos (2007).

A Tabela 6 expõe que os resultados da pesquisa evidenciaram que as correlações entre os pontos de alta concentração de material particulado e o vento são todas moderadas positivas, conforme a caracterização proposta por Santos (2007).

6.2 Caracterização físico-química do carvão bruto

6.2.1 Análise de elementos no carvão de Moatize

A determinação de elementos principais, como parte de compostos orgânicos no carvão, foi feita usando análise de CHN. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para a

análise final que é comparada com o material de referência certificado e os valores da literatura. A análise foi feita em repetição e os valores médios foram levados em consideração.

Tabela 7 - Análise de carvão bruto

AMOSTRA	% CARBONO	%HIDROGÊNIO	%NITROGÊNIO
Carvão	78,70	5,42	2,45

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 7, observa-se que o teor de carbono é alto quando comparado com os teores de hidrogênio e nitrogênio na amostra de carvão. Os teores destes elementos foram comparados com outras literaturas sobre estudos realizados em carvões de Moatize, sendo encontrados teores de hidrogênio no intervalo de 5 a 6% e carbono com teor levemente alto, variando de 83-86% (LAKSHMINARAYANA, 2015) e para carbono, hidrogênio e nitrogênio 78.71-86.71, 4.85-5.03 e 1.87-2.13% (MANHARAGE, 2014). O carvão da África do Sul apresentaram valores médios de 66,20%, 2,98% e 1,15% para os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio, respectivamente (KALENGA, 2011). Portanto, os teores dos elementos analisados se apresentam altos em comparação com os da África do Sul.

A análise química de elementos maiores e traço foi efetuada por ICP OES e os resultados são apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Determinação de elementos no carvão bruto

ELEMENTO	RESULTADO (%)
Al	0,91
Fe	0,37
S	0,16
Si	1,82

Fonte: Autoria própria

O ferro pode ocorrer em várias formas diferentes no carvão, incluindo sulfetos, óxidos, sulfatos, carbonatos e silicatos. A pirita é o mineral de ferro mais abundante em carvão (SWAINE, 1990). Resultados de estudo em carvão de Moatize revelaram concentrações de Al, Fe e S ligeiramente baixas: 0.34-0.71, 0.20-0.07 e 0.05-0.06% para carvão de coque e carvão térmico, e concentrações altas dos mesmos elementos maiores, 8.25, 3.35 e 3.13% para rejeitados grosseiros e 4.27, 2.75 e 1.51% para rejeitados finos, estando estas elevadas

concentrações relacionadas com o seu maior teor em cinzas (MANHARAGE, 2014). O ferro também é muito encontrado no material particulado (TOLEDO et al., 2007). Estudo realizado na Índia sobre poluição do ar em torno da área de mineração do carvão mostra que as concentrações médias de metais em MP₁₀ foram encontradas na ordem de Fe > Cu > Zn > Mn > Pb > Cr > Cd > Ni. As concentrações ambientais do Fe encontradas no MP₁₀ variaram de 1,43 g m⁻³ para 28,48 g m⁻³ (SINGH, et al., 2012). Segundo Singh, et al. (2014), a mineração de carvão é considerada uma das principais fontes de poluição atmosférica em Jharia.

A forte presença do Al sugere que parte significativa da matéria mineral nestes carvões é constituída por minerais de argila (SIA e ADDULLAH, 2011). Já o teor em Fe nos carvões tem correlação muito forte com o enxofre, sugerindo a presença de sulfureto de Ferro (pirite – Fe₂S) e correlação muito forte com o Ti, indicando a presença da ilmenite (óxido de ferro e titânio – FeTiO₃) (MANHARAGE, 2014).

O enxofre no carvão geralmente é originado da composição da planta primária. Por outro lado, as rochas e os compostos inorgânicos no solo que acompanham o carvão na sua formação contribuem para a presença de enxofre no carvão. O teor total de enxofre no carvão varia de 0,3 a 15% em peso de acordo com a classificação e a gênese do carvão (KALENGA, 2011). O teor de enxofre no carvão de Moatize apresentado na Tabela 8, está abaixo de 1 ± 0,2% em que o enxofre orgânico é de 0,4% encontrado na mesma área de estudo (LAKSHMINARAYANA, 2015). Gonenc et al. (1990), relatam que o teor médio de enxofre do carvão sul-africano é geralmente inferior ou igual a 1% em peso.

O enxofre como elemento é mais reativo que o oxigênio. Pode reagir consigo mesmo para formar ligações -S-S- e é fotossensível, podendo gerar efeitos ambientais, como é caso das usinas de energia, que na queima do carvão gera dióxido de enxofre (SO₂), o qual reage com água atmosférica e oxigênio para produzir ácido sulfúrico, componente da chuva ácida, que diminui o pH do solo e dos corpos de água doce, resultando em danos substanciais ao meio ambiente. A oxidação da pirita e outros minerais com enxofre reduzido que ocorrem nas minas de carvão e metal e seus resíduos podem causar a acidificação de águas superficiais ou subterrâneas. Portanto, os metais podem ser liberados de seus minérios e estar mais disponíveis. Isso aumenta sua toxicidade, o que aumenta a possibilidade de os metais entrarem na cadeia alimentar (KALENGA, 2011).

São apresentados os resultados obtidos em mg kg⁻¹ de concentrações para elementos traço As, Cr e Mn determinados na amostra de carvão de Moatize. Em quantidade bem menor na amostra está presente o arsénio (Tabela 9).

Tabela 9 - Elementos no carvão bruto em mg kg⁻¹

ELEMENTO	RESULTADO
As	< 0,01
Cr	28,84
Mn	22,64

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 10 são apresentados os resultados dos elementos determinados na amostra de poeira de carvão.

Tabela 10 - Elemento na poeira do carvão em % e ppm

ELEMENTO	RESULTADO
Al	0,123
Fe	1,007
S	0,316
Si	10,007
Mn*	66,375

Fonte: Autoria própria

* = valor expresso em ppm

O cromo pode estar associado à maioria dos grupos minerais, como argilas minerais, carbonatos, óxidos (hematita, cromita), sulfetos (pirita) (DAVIDSON, 2000; GALBREATHE et al., 1999; GOODARZI e RIEDIGER, 2000) e também associação orgânica como Cr³⁺ (GOODARZI e HUGGINS, 2001). Comparando com concentrações de cromo de estudos realizados na África do Sul, pode se afirmar que o carvão de Moatize, com base nos resultados apresentados na Tabela 9 não apresentam teores altos. As literaturas comparadas apresentam teores de concentração do cromo que variam de 12 mg kg⁻¹ a 63 mg kg⁻¹ (GOODARZY et al., 2006; WILLIS, 1983) e concentrações que variam entre 62 mg kg⁻¹ à 95 mg kg⁻¹ (KALENGA, 2011). O crômio pode ir para atmosfera, tendo sido encontrado concentrações no material particulado que variam de 0,11µg m⁻³ a 0,42 µg m⁻³ (SINGH, et al., 2012). Apesar de neste estudo não ter sido determinado o íon Cr (VI), é sabido que este é altamente tóxico mesmo em concentrações reduzidas. Como efeitos adversos a saúde, pode se fazer referência ao câncer, devido à natureza fortemente oxidante do íon Cr (VI) e sua mobilidade através de membranas

animais, além de dermatites alérgicas, úlceras na pele e lesões vasculares (SHILS e SHIKE, 1994).

A maioria do manganês em carvão, especialmente carvão betuminoso, ocorre em solução sólida nos minerais de carbonato siderite. Em carvões de baixa classificação, lignites e carvão marrom, uma parte substancial do manganês pode ser organicamente associado (FINKELMAN, 1994). Comparando com as concentrações de manganês determinadas nas literaturas, pode se afirmar que os valores apresentados na Tabela 9 não são considerados altos: SABS (1984), 77-83 mg kg⁻¹, Wagner e Hlatshwayo (2005) com 90, 70-107,50 mg kg⁻¹, Goodarzy et al. (2006) 1,2324 mg kg⁻¹ e Kalenga (2011), 74-101,4 mg kg⁻¹. O manganês pode estar presente no material particulado, sendo elemento quimicamente ativo, corrosivo pelo ar úmido e por muitas soluções (ATKINS e JONES, 2012).

O arsênio, um dos oligoelementos potencialmente perigosos, geralmente é concentrado nos minerais sulfídicos do carvão, especialmente a pirita. Pode até haver algum arsênio organicamente associado, embora este seja um componente menor. O teor de arsênio no carvão em todo o mundo é altamente variável, com um valor médio em torno de 5 mg kg⁻¹ e valores extremos altos de até 35 mg kg⁻¹ na China (ZHOU e REN, 1992; FINKELMAN, 1994; VALKOVIC, 1983). Portanto, para o caso da amostra de carvão de Moatize analisada, a concentração do arsênio pode ser considerada baixa, comparando com outras concentrações no mundo.

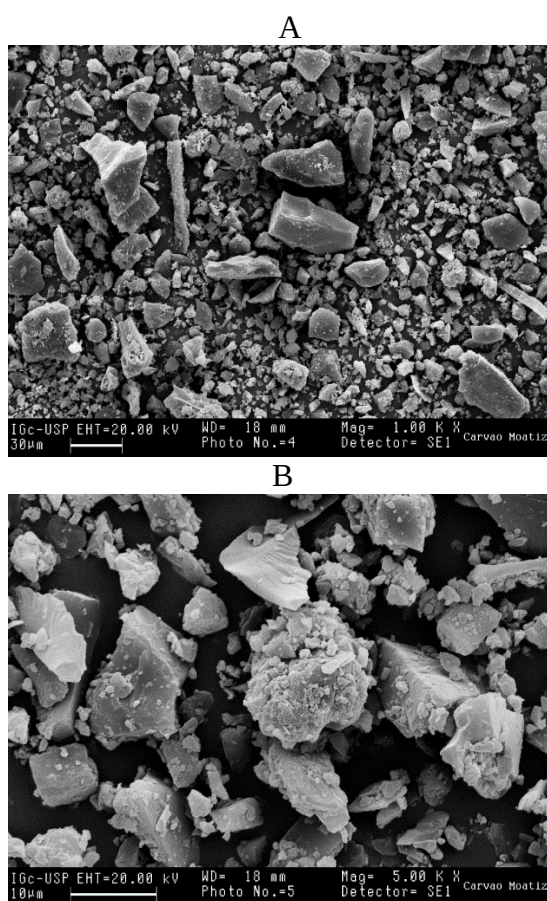
Os elementos determinados têm afinidade com o enxofre, formando, principalmente, sulfitos como a pirita. Outros estão ligados a compostos orgânicos de enxofre. Por este motivo, eles afetam o processo de remoção de enxofre de carvões além do potencial impacto ambiental. A temperatura é o principal parâmetro que afeta o comportamento do metal nos compostos de enxofre (YAN et al., 2001). Os metais determinados no carvão na Tabela 9 podem também ser encontrados nos solos, conforme resultados em outros estudos em áreas de mineração de carvão. Cujic et al. (2016) relataram concentrações médias de metais mg kg⁻¹ em solos sérvios contaminados de Cr, Fe e Mn nos valores de 32,2; 29,03 e 610, respectivamente.

Dos dezesseis elementos traço que ocorrem nos carvões, o Cr, As, Mn estão inclusos na lista dos elementos tidos como poluentes potencialmente perigosos para o ar, segundo a Lei Americana do Ambiente: As, Be, Cd, Cl, Cr, Co, F, Hg, Mn, Ni, P, Pb, Sb, Se, Th, e U são poluentes potencialmente perigosos para o ar (SUÁREZ, 2008). Portanto, pode-se concluir que estes elementos traço tem muita mobilidade nos componentes ambientais e, no caso de Moatize, na área de estudo, estes podem contaminar o ar, o solo e a água, assim como poderão causar efeitos ecológicos sobre a vegetação.

6.2.2 Análise do carvão bruto por microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para examinar a morfologia do carvão bruto (Figura 29) e identificar composição química por Espectrometro por Energia Dispersiva de Raio X (EDS) (Figura 30). O uso em conjunto de MEV-EDS torna-se de grande importância na análise de amostras geológicas. Enquanto o MEV permite obtenção de nítidas imagens, com EDS é possível determinar a composição química pontual de amostras geológicas, gerando mapas composicionais de elementos de interesse.

Figura 29 – Eletromicrografias obtidas em detector de elétrons secundário no microscópio eletrônico de varredura, apresentando morfologia externa do carvão bruto.

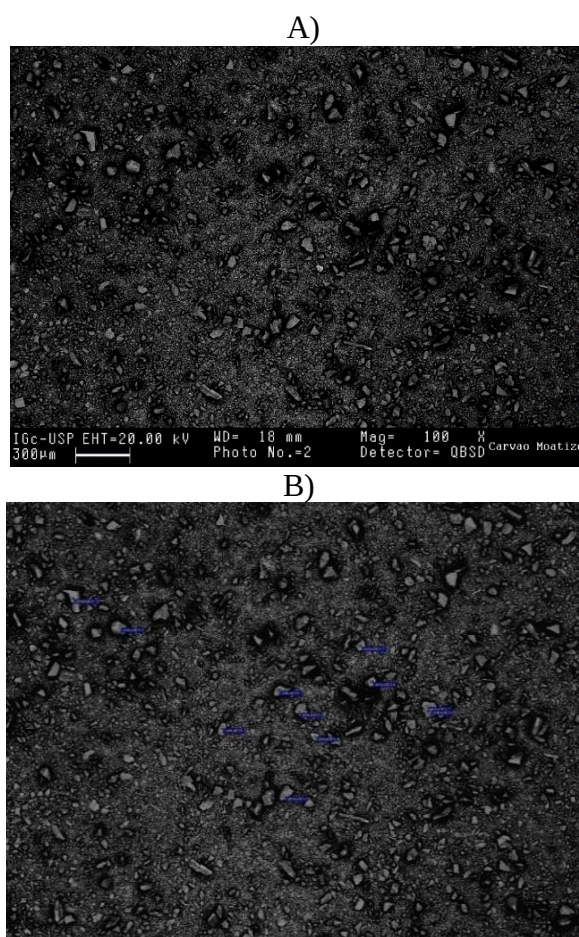


Fonte: Acervo pessoal.

As eletromicrografias apresentam as topografias da amostra de carvão, com partículas de fracções que variam de aproximadamente 30 μ m e 10 μ m. A) com aumento na tela de 100x, observa-se grãos em diferentes micrômetros, arredondados e alongados; B) com aumento da

tela 500x tem-se formação de grandes aglomerados sem uma forma e tamanho definido no carvão.

Figura 30 - Eletromicrografias obtidas em detector de elétrons retroespalhados no microscópio eletrônico de varredura para análise de composição química em camadas profundas do material.

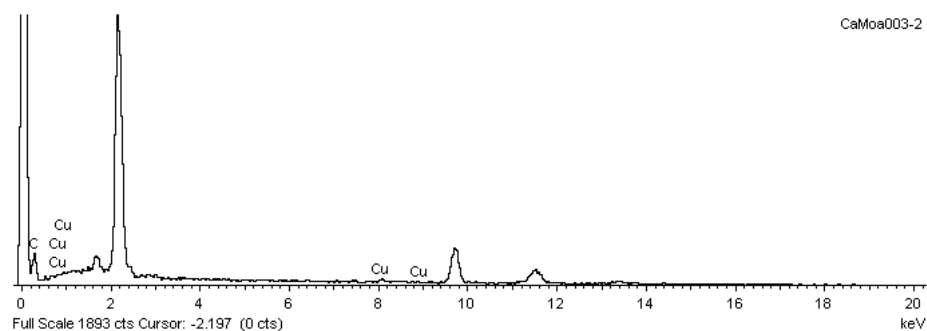


Fonte: Acervo pessoal.

As eletromicrografias da amostra do carvão com aumento da tela 100x A) e B) apresentam partículas de frações menores de 300µm, foi possível observar grãos em diferentes micrómetros, grãos arredondados e alongados. B) Destaque para alvos escolhidos, em azul no mapeamento de elementos C, Si, S, Fe Cu e Al.

A Figura 31 mostra um espectro com a identificação dos elementos carbono e cobre, mas também acontece o fenômeno que faz com que algumas linhas de energia de alguns elementos se superponham.

Figura 31 - Espectrogramas de EDS obtido de uma amostra de carvão mineral, Moatize.

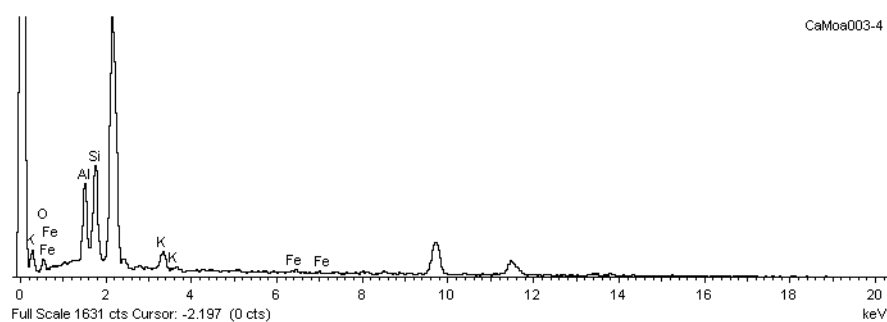


Fonte: Acervo pessoal.

No espectrograma pode se observar os elementos mapeados C e Cu resultado dos tiros dados sobre este mapeamento de elementos.

A Figura 32 mostra um espectro com a identificação dos elementos silício e alumínio, mas também acontece o fenômeno que faz com que algumas linhas de energia de alguns elementos se superponham.

Figura 32 - Espectrogramas de EDS obtido de uma amostra de carvão mineral, Moatize.



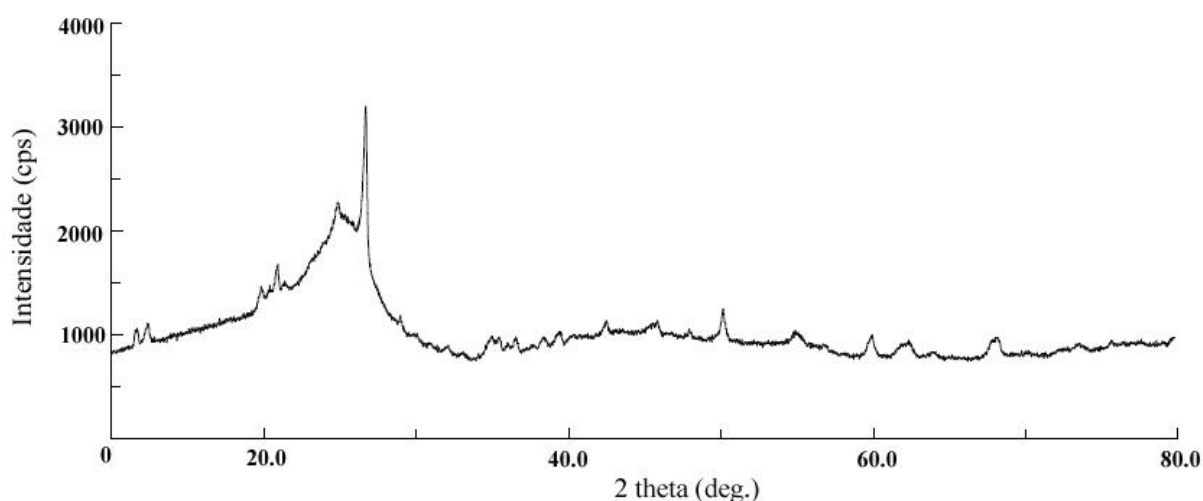
Fonte: Acervo pessoal.

No espectrograma são apresentados os resultados dos elementos que foram dados tiros após o mapeamento dos mesmos, com destaque para o Si, resultado da presença de quartzo no carvão de Moatize.

6.2.3 Análise por difração de raios X

A análise de difração de raios X foi usada para determinar a composição mineralógica do carvão bruto. A análise de DRX mostrou picos característicos de quartzo (SiO_2), Caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ e goethita ($\alpha\text{-FeO.OH}$). Os compostos identificados encontram-se na Figura 33 e, resumidamente, na Tabela 11. O argilomineral, por exemplo, foi identificado pela presença de picos característicos, nos espaçamentos basais em 0,714; 0,357 e 0,447 nm.

Figura 33 - Análise de DRX do carvão bruto.



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 33 apresenta um difratograma de carvão não completamente amorfo, que mostra algumas fases cristalinas com reflexões evidentes, essencialmente entre os domínios 20 e 30 (graus) 2theta. Entre os minerais destaque vai para quartzo, minerais de argilas (caulinita, montmorillonita) e óxidos e hidróxidos de ferro (hematita, goethita).

Acima dos 30 (graus) 2theta, as reflexões são mais indiscretas, mas testemunham a presença das fases cristalinas acima referidas.

Tabela 11 - Distância interplanar dhkl (em nm)

MINERAL	d/I	d/I	d/I
Quartzo	0,334/100	0,425/53	0,181/40
Caulinita	0,714/36	0,357/73	0,447/46
Goethita	0,416/47	0,272/28	0,154/32

Fonte: Autoria própria

d : distância interplanar e I : intensidade

6.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DO SUPRESSOR DE POEIRA

6.3.1 Características do breu

Para síntese do supressor de poeira foi utilizada a resina da *Pinus elliotti* var. *elliottii*, como matéria prima para nova formulação de base vegetal.

A resina é composta por conjunto de substâncias hidrofóbicas, solúveis em solventes orgânicos. Compõe-se de 66% de ácidos resínicos, 25% de terebintina (óleo essencial), 7% de material neutro não volátil e de 2% de água. A fração volátil da terebintina é constituída de hidrocarbonetos cíclicos (monoterpenos), com mistura de sesquiterpenos e, por vezes, substâncias não terpênicas. A formação do breu na sua maior parte é por ácidos resínicos, além de ácidos graxos, ésteres desses ácidos, esteróis, álcoois, além de sesquiterpenos e diterpenos. Os principais constituintes da resina possuem estreita afinidade química entre si. Incluem-se dentre os terpenóides, um grupo de substâncias naturais que têm em comum o fato de poderem ser considerados isopreno, composto de cinco carbonos. O 3-isopentenil pirofosfato parece ser uma molécula chave na produção destes compostos (FUSATTO, 2006).

A solução de breu foi preparada, então, em concentração 0,1 M. A amostra de *Pinus elliottii* foi encaminhada para análise de CHN e encontra-se na Tabela 12.

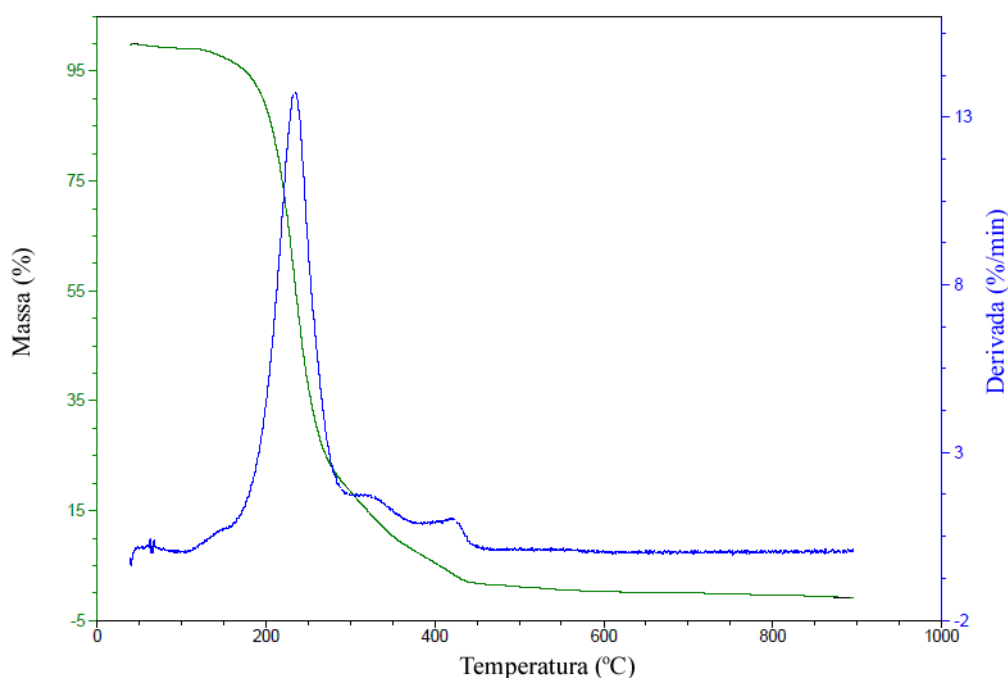
Tabela 12 - Resultados de CHN de *Pinus* em percentagem

AMOSTRA	CARBONO	HIDROGÊNIO	NITROGÊNIO
<i>Pinus</i>	72,29	8,89	-0,04

Fonte: Autoria própria

6.3.2 Análise termogravimétrico do *Pinus*

A análise Termogravimétrico (TGA) e Termogravimetria Derivada (DTG) do pinus para determinar a variação da massa da amostra em função da propagação da temperatura é apresentada na Figura 34.

Figura 34 - Curvas TGA e DTG do *pinus*.

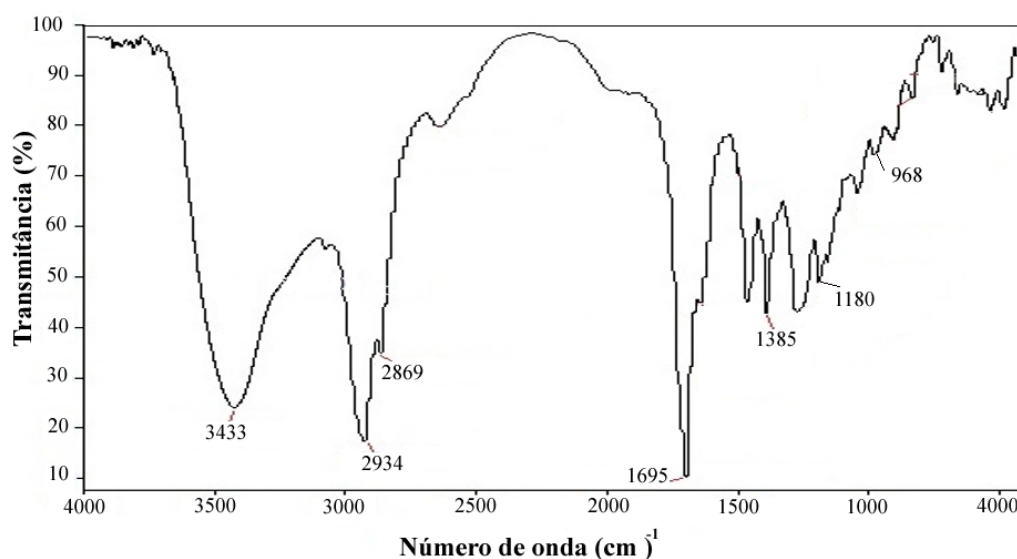
Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 34 pode se observar pela curva TGA a decomposição térmica do *Pinus*, com razão de aquecimento $40^{\circ}\text{C min}^{-1}$ até 1000°C , ocorrendo em três eventos térmicos bem definidos, representados por patamares. A curva DTG mostra as temperaturas correspondentes ao início e final do evento térmico, bem como da temperatura na qual a velocidade de reação foi máxima, identificada pelo pico. O pico agudo permite observar claramente a reação. O perfil das curvas termogravimétricas ilustra a decomposição do breu ocorrendo essencialmente num passo único, entre temperaturas 150°C a $328,01^{\circ}\text{C}$, em que cerca de 80,90% de material foi decomposto.

6.3.3 Análise por espectroscopia de infravermelho do breu

O breu foi também caracterizado por espectroscopia de infravermelho, visando o entendimento das estruturas químicas e análises referentes a potenciais interações entre os reagentes. A fim de confirmar a presença de ácido carboxílico na amostra do breu foi realizada a análise de infravermelho e os espectros obtidos são apresentados a seguir na Figura 35.

Figura 35 - Espectro de infravermelho do breu procedente *Pinus elliottii* var. *elliottii* como matéria-prima para formulação do supressor de poeira.



Fonte: Acervo pessoal.

O espectro de FTIR da amostra de breu exibe banda intensa a 3433 cm^{-1} , atribuída à vibração da ligação O-H. Os ácidos carboxílicos geralmente se encontram fortemente associados por meio de ligações de hidrogênio (BARBOSA, 2011). É possível observar também bandas a 2869 cm^{-1} e 2934 cm^{-1} resultantes de distensões do grupo CH₃ presente em hidrocarbonetos insaturados, tais como os ácidos resínicos. Na região espectral 1695 cm^{-1} observa-se uma banda intensa resultante da distensão da ligação C=O proveniente do grupo carboxílico. Na região espectral centrada em 1385 cm^{-1} observa-se uma banda característica da torção dos grupos CH₂. Estas bandas podem ser associadas à estrutura dos ácidos resínicos. Estiramento em 968 cm^{-1} corresponde aos grupos -COOH. O estiramento 1180 é correspondente às vibrações dos grupos aromáticos.

6.3.4 Análise por CHN do breu

A resina da *Pinus elliottii* var. *elliottii* sofreu processo de destilação, separando-se o breu da terebintina, além de água e impurezas e número de acidez (Tabela 13). Na Tabela 14 tem-se a análise CHN do breu de partida.

Os resultados da Tabela 14 permitem avaliar a qualidade do breu com base no número de acidez 188,52, sendo de boa qualidade (BRITO et al, 1980), pois, apresentou valor elevado,

haja vista que segundo especificações o breu comercial deve apresentar IA entre 155 e 170 segundo ASTM.

Tabela 13 - Análise de rendimento de breu, terebintina e impureza em %, além do n° de acidez após destilação da resina de *Pinus elliottii* var. *elliottii*

AMOSTRA	BREU	TEREBENTINA	IMPUREZA	N. ACIDEZ
Controle	78,16	12,37	9,44	188,52

Fonte: Autoria própria

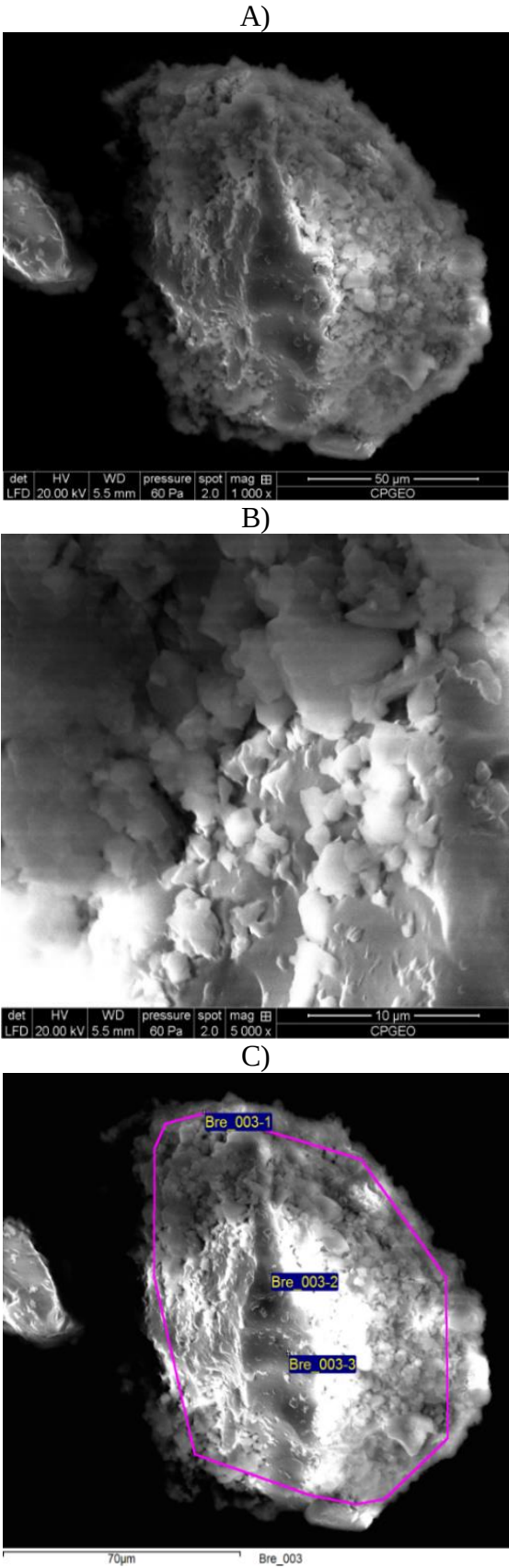
Tabela 14 - Análise CHN em % do breu

Amostra	C	H	N	CHN _{Total}
Breu	10,22	6,07	-	16,29

Fonte: Autoria própria

Os resultados da análise do breu foi efetuada por microscopia eletrônica de varredura com EDS acoplado (Figura 36).

Figura 36 - Eletromicrografia de varredura do breu.



Fonte: Acervo pessoal.

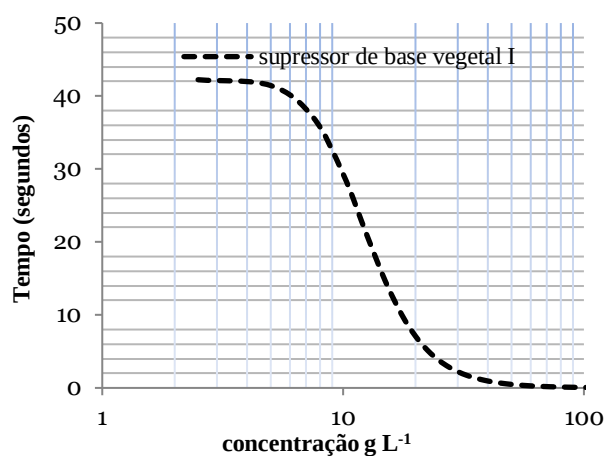
A Figura 36 mostra as imagens MEV do breu, A) podendo ser verificado que a estrutura global da matéria prima é altamente porosa em vez de ser compacta o que o confere como composto do produto efeito de adsorção no pó através da força inter-macromolecular. Além disso o breu como matéria prima do supressor, B) a sua superfície foi coberta por numerosas dobras, o que aumenta consideravelmente a área de superfície de contacto do breu e é nessa área de contacto que o supressor de poeira possui, efeito decente de adsorção. Isso tudo faz concluir que o breu é excelente matéria prima para o supressor de poeira. C) Tem-se mapa químico de área para três alvos selecionados na amostra do breu.

6.3.5 Formulação do supressor de poeira

Na formulação inicial de síntese, foi acrescentado breu modificado e agente reticulante. Na primeira formulação foram utilizados 3% de ligante, 2,5% de agente reticulante (glutaraldeído) e 10% de breu. Na formulação básica para o supressor de poeira, procedente de extrato vegetal também foi acrescentado pequenas concentrações de resinosos de cálcio, para agregar ao produto secagem rápida. A mistura foi agitada por 48 horas, observando aspectos como intumescimento, viscosidade e pH. O complexo formado foi transferido para frasco com tampa e deixada em repouso por 24 horas. Os experimentos foram realizados em triplicata.

O primeiro reagente testado foi o de base vegetal com breu. O supressor de base vegetal aumentou o tempo de molhagem, como mostrado na Figura 37. O teste Walker foi utilizado para examinar o comportamento de molhamento do carvão (Mohal, 1988; Kim, 1995) e em sulfetos de cobre (Cristovici, 1991). Esta técnica experimental mede a quantidade de tempo necessária para o supressor sofrer espalhamento sobre a amostra sólida. Utilizando-se deste método, o comportamento de molhamento de vários inibidores de poeira sobre o minério de carvão pode ser estudado. Segundo Kawatra (2006), o material particulado pode ser lançado através de torre fechada, com altura superior a 2,4 m. As concentrações de poeira ambiente (PM₁₀) foram medidas através de bocal isocinético. Desta forma, o comportamento do material quando, submetido ao inibidor de poeira, pode ser avaliado diretamente. Para melhor avaliação do comportamento da molhabilidade, torna-se necessário, observar o comportamento de formação do líquido e do espalhamento do mesmo sobre a superfície do sólido, que pode sofrer mudanças drásticas com a variação do tempo.

Figura 37 - Tempo de molhagem para supressor de base vegetal sobre superfície do carvão mineral.



Fonte: Acervo pessoal.

A amostra foi diluída em etanol, concentração 1,6%. Os resultados obtidos para a viscosidade aparente do breu é $1,53 \text{ mPa s}^{-1}$. O objetivo desta técnica é a medição e distinção da viscosidade, podendo ser correlacionado com o desempenho do breu na sua aplicação final em termos de facilidade de espalhamento. A viscosidade pode ser influenciada pela temperatura e peso molecular, contudo, não apresentam a mesma relação. A viscosidade tende a diminuir, com o aumento da temperatura, o que não acontece com o peso molecular, pois o aumento do peso molecular faz aumentar a viscosidade.

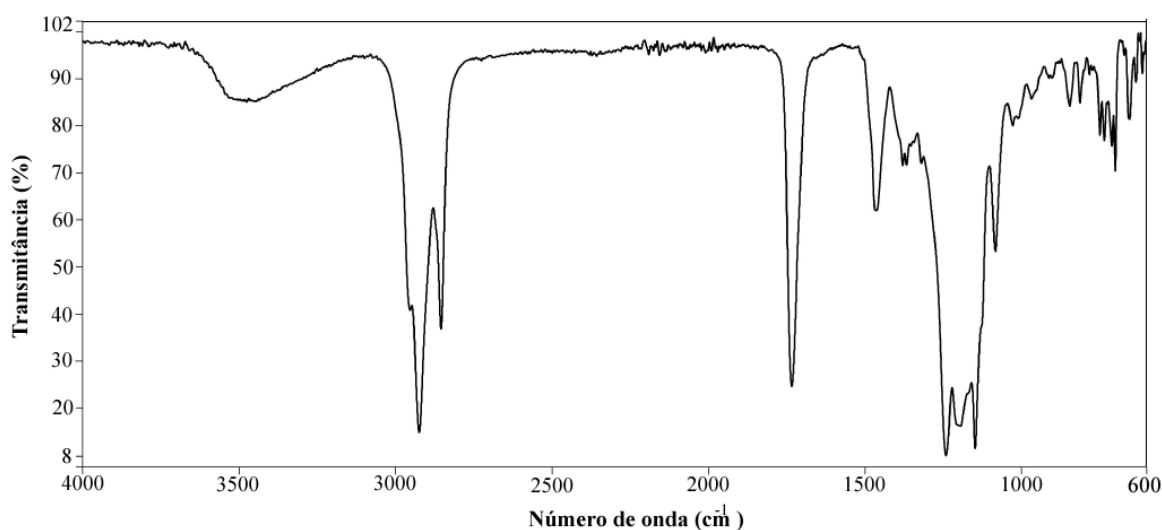
Os grupos formados voltam-se para a baixa solubilidade em água, dada diferença de polaridade dos reagentes. Inicialmente em béquer preparou-se solução (massa/volume) de breu 2% em álcool etílico. Em seguida foi preparada solução de γ -PGA 30% em 4% em água ultrapura, mantida sob leve agitação na placa magnética em temperatura ambiente durante 30 minutos. Outra solução de alginato de sódio foi preparada em béquer e mantida sob leve agitação na placa aquecedora a 50°C durante 10 minutos. Depois disso, foram misturadas as soluções de breu e γ -PGA, colocados num béquer e mantido em agitação durante 15 minutos. Subsequentemente, foi adicionado o alginato de sódio e mantido em agitação durante 30 minutos. A solução resultante contendo breu, γ -PGA e alginato de sódio foi deixada em repouso durante 2 horas. Em seguida, adicionou-se impermeabilizante (copolímero fluorado) 1mL para conferir repelência à água sobre a superfície do material após aplicado o produto. O béquer contendo as soluções foi submerso no banho de água termostática a 40°C mantida com agitação

mecânica suficiente e constante; após 1 hora, uma solução uniforme e bem misturada pode ser obtida.

Como o alginato de sódio se dissolve em água com maior viscosidade, a solução de alginato de sódio com alta concentração foi difícil de ser agitada uniformemente, e a concentração foi muito baixa para afetar a eficiência da reação. Portanto, a dosagem de alginato de sódio foi ajustada para 1 g após várias tentativas experimentais. O surfactante Lauril éter sulfato de sódio foi adicionado a 1% para diminuir a tensão superficial do supressor de poeira e otimizar o efeito de umedecimento do produto na poeira de carvão.

Os grupos funcionais do agente impermeabilizante foram analisados por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier e o espectro é apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Espectro de infravermelho do copolímero fluorado.



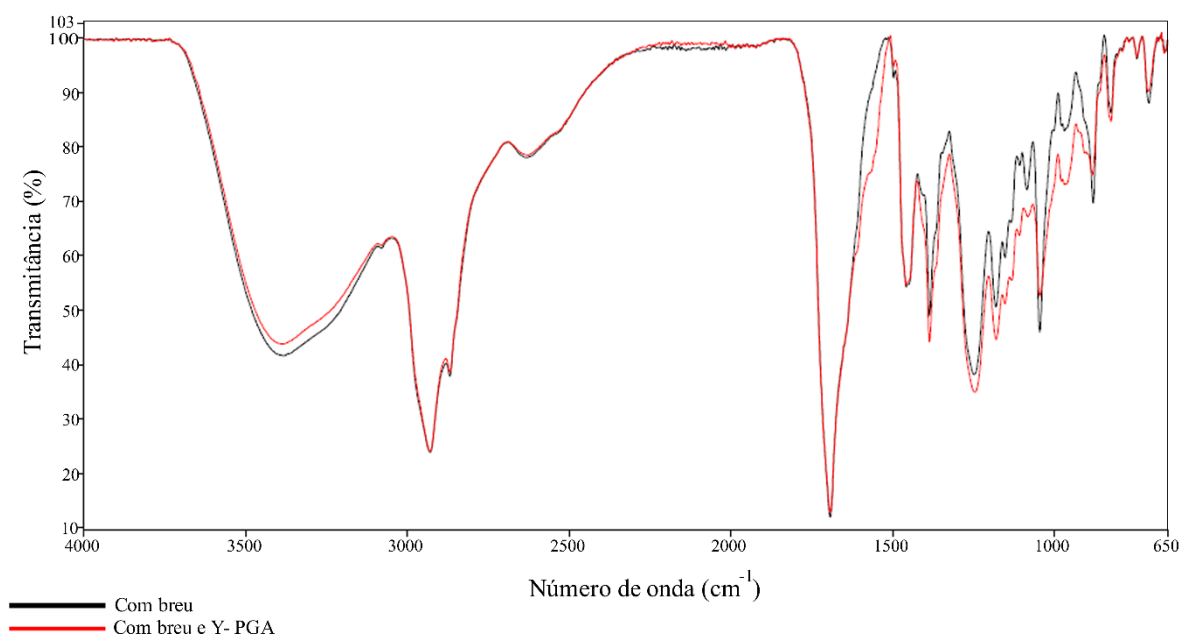
Fonte: Acervo pessoal.

No espectro da amostra do agente impermeabilizante, copolímero fluorado, pode-se distinguir algumas regiões fortes de absorção. A primeira região corresponde as vibrações provenientes das deformações axiais assimétricas e simétricas das ligações CH_2 , com dois picos localizados no comprimento de onda 2950 cm^{-1} e 2925 cm^{-1} respectivamente (MEDEIROS, 2007). Outra região está compreendida nos comprimentos de onda entre 1239 cm^{-1} , 708 cm^{-1} e 652 cm^{-1} , onde situam-se as vibrações correspondentes aos grupos CF_2 e CF de compostos hidrofóbicos (PIHUI et al., 2016).

6.3.7 Análise por espectroscopia de infravermelho do supressor de poeira

O supressor de poeira de base vegetal foi caracterizado por espectroscopia de infravermelho, visando o entendimento das estruturas químicas e análises referentes a potenciais interações entre os reagentes. Para efeito, foram testadas duas formulações do supressor de poeira com as bandas no espectro de infravermelho indicando a presença de breu e γ -PGA, apresentado na Figura 39 e as bandas observadas podem ser visualizadas na Tabela 15.

Figura 39 - Espectro de infravermelho comparativo da formulação do supressor de poeira com as bandas indicando a presença de breu e γ -PGA.



Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 15 - Bandas observadas em FTIR (cm^{-1}) para γ -PGA sódico da Shandong Freda Biotchenology, como material de referência e da formulação do supressor de poeira, contendo breu e γ -PGA.

Substância	C-O	Amida I	C-N	N-H	O-H
γ -PGA – Shandong*	1404,41	1638,58	1128,92	697,20	3433,00
Supressor de poeira	1458,18	1693,32	1152,69	659,30	3387,40

Fonte: Autoria própria

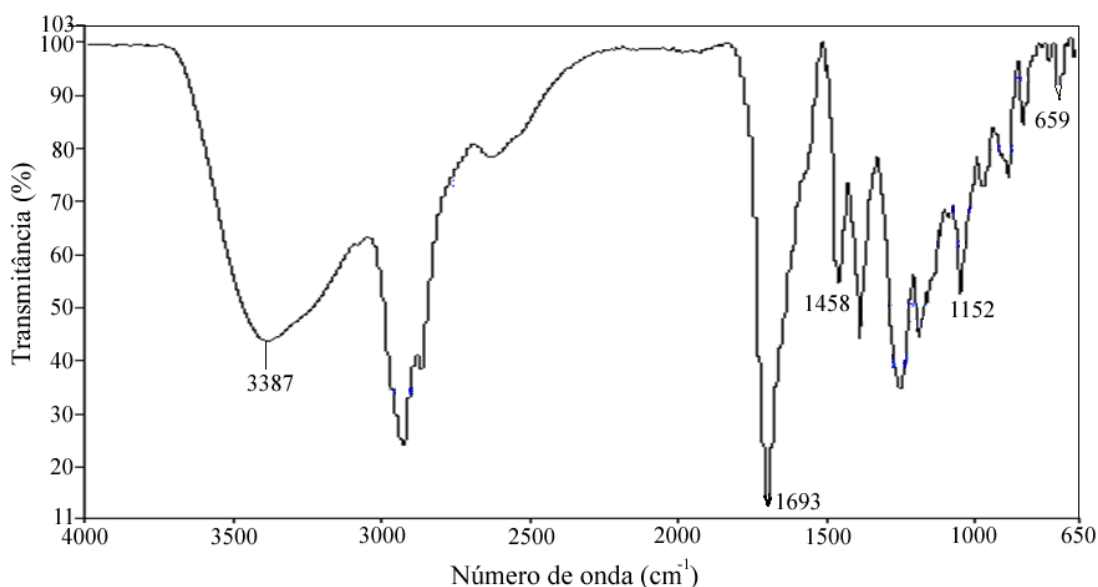
As bandas observadas no espectro de infravermelho para o supressor de poeira contendo γ -PGA (Figura 39) em $1458,18 \text{ cm}^{-1}$ está associada a vibrações de estiramento de grupo

carbonila C=O; em 1693 cm^{-1} observa-se banda resultante de flexão da amida I com N-H. É possível observar também nas regiões espectrais 1152 cm^{-1} e 659 cm^{-1} bandas atribuídas a vibrações de estiramento de C-N e de dobramento N-H, respectivamente.

O espectro das amostras dos supressores de poeira com breu e γ -PGA exibem bandas $3400\text{ cm}^{-1} - 3387\text{ cm}^{-1}$, atribuídas à vibrações de estiramento da ligação O-H. Os espectros do supressor de poeira com breu e γ -PGA estão em conformidade com presença de grupos carboxílicos, carbonila, hidroxila e amida (HO et al. 2006).

Na Figura 40, o espectro de FTIR da amostra do supressor de poeira com breu e γ -PGA exhibe banda amida I, característica do γ -PGA, onde os aminoácidos são ligados pelo γ -amino e estão diretamente relacionados à conformação randômica em cadeia aberta, característico do pH próximo a neutralidade (FERNANDES, 2017).

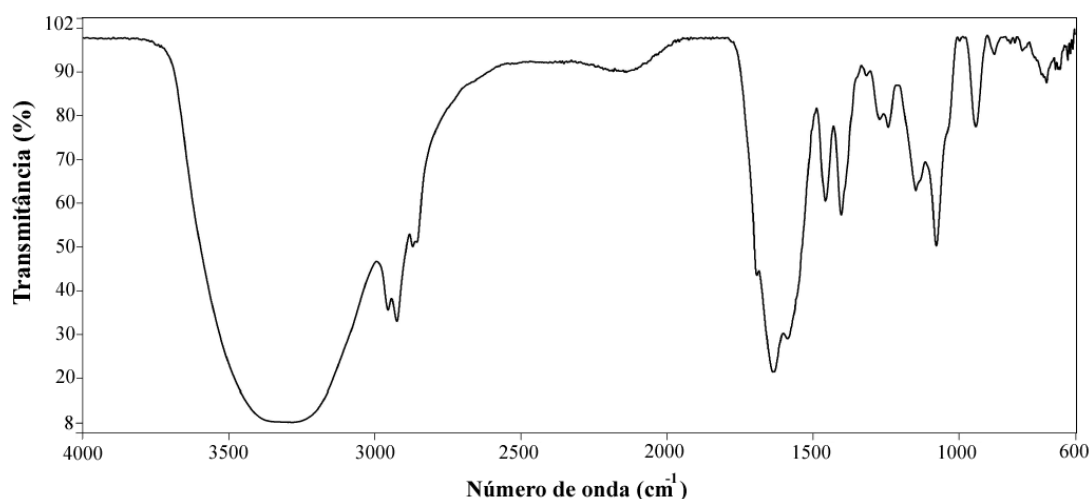
Figura 40 - Espectro de infravermelho da formulação do supressor de poeira, primeira formulação.



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 41 apresenta o espectro de infravermelho com transformada de Fourier do supressor de poeira, segunda formulação.

Figura 41 - Espectro de infravermelho da formulação do supressor de poeira, segunda formulação.



Fonte: Acervo pessoal.

O espectro de FTIR da amostra do produto exibe banda intensa a 3280 cm^{-1} , atribuída à vibração da ligação O-H. Os ácidos carboxílicos geralmente se encontram fortemente associados por meio de ligações de hidrogénio. Por fim, a banda a 876 cm^{-1} é atribuída a uma vibração de flexão da ligação C-C em anéis aromáticos. Este tipo de vibração deve-se ao ácido desidroabiético, presente no breu, que incorpora um anel aromático (FERREIRA, 2016) similares ao do breu devido a matéria prima do produto.

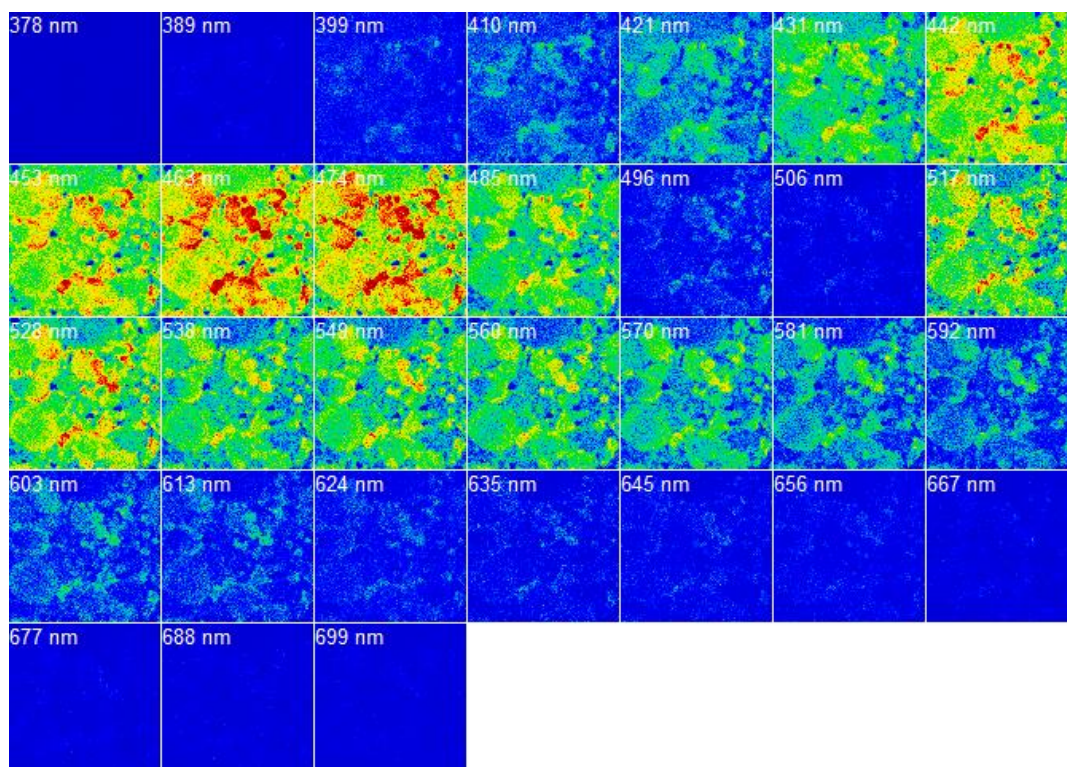
6.3.8 Análise por microscopia confocal de varredura a laser do supressor de poeira

A utilização da técnica confocal teve a finalidade de caracterizar uma superfície inorgânica, uma vez que em sua grande maioria, a microscopia confocal é empregada na construção de imagens de materiais orgânicos, principalmente biomateriais. Com base nos resultados, conseguiu-se pelas imagens geradas pelo *Laser Scanning Confocal Microscope* (LSCM), representar qualitativamente as superfícies das amostras, em particular a película do supressor de poeira, formada sobre os grãos de carvão mineral.

A determinação do comprimento de onda de excitação ideal para o supressor de poeira demonstra a fluorescência na luz ultravioleta, na faixa de 440 a 485 nm (Figura 42). O resultado

da micrografia confocal do supressor de poeira, primeira formulação é apresentada na Figura 43 e a Figura 44 apresentam o supressor sobre a partícula de poeira de carvão.

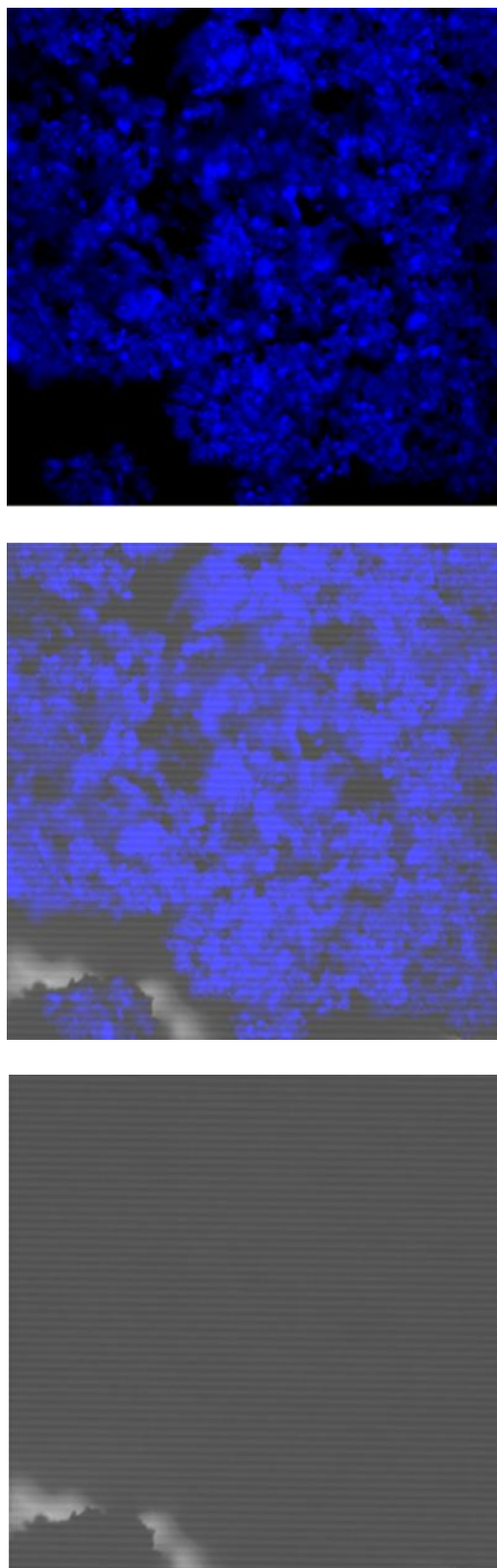
Figura 42 - Sequência de imagens obtidas para determinação do comprimento de onda de excitação ideal para o supressor de poeira.



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 42 ilustra imagens obtidas em microscopia confocal de varredura a laser, possível de identificar com fluorescência UV na faixa de 440 a 485 nm.

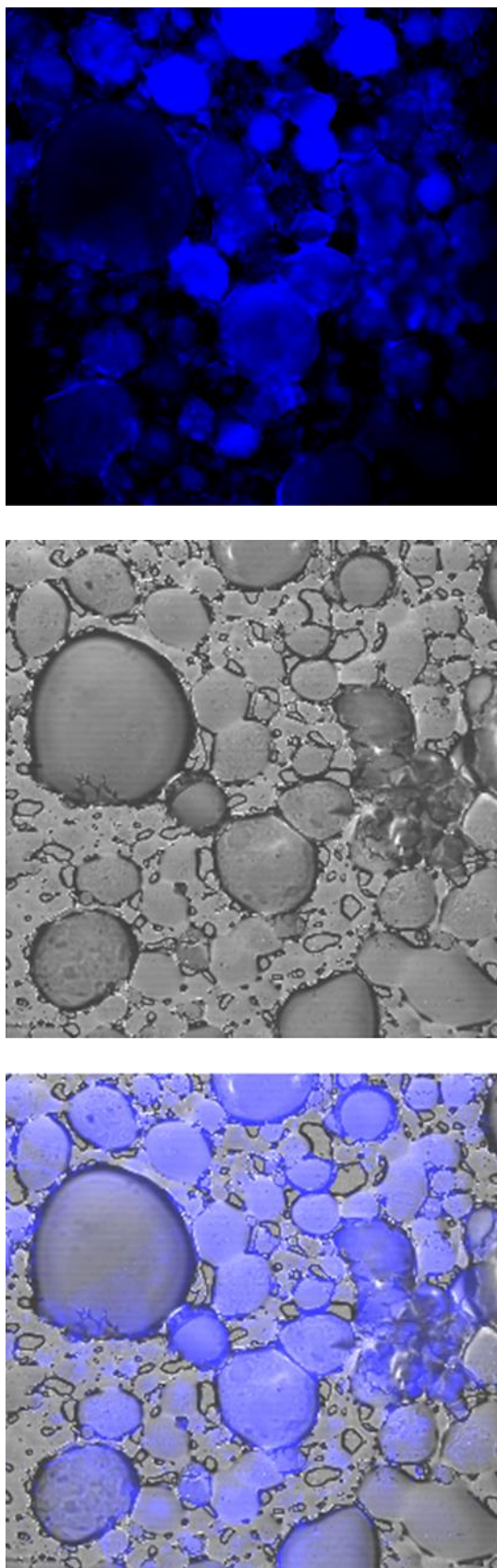
Figura 43 - Micrografia confocal a laser do supressor de poeira de base vegetal, primeira formulação.



Fonte: Acervo pessoal.

As Figuras 43 demonstram aparência para fraca interação entre as partículas de pó de carvão e o supressor de poeira. Ocorre dispersão das partículas da poeira do carvão mineral devido a hidrofobicidade das partículas do carvão e pela ausência do adesivo no produto, do γ -PGA nesse caso, assim como, a ausência de agente surfatante que participa no processo molharando o aspecto homogêneo da solução do supressor. No entanto, a taxa de extensão do processo de umedecimento e de aglomeração das partículas ainda podem ser limitadas.

Figura 44 - Micrografia confocal a laser do supressor de poeira sobre o material particulado, poeira de carvão, primeira formulação.

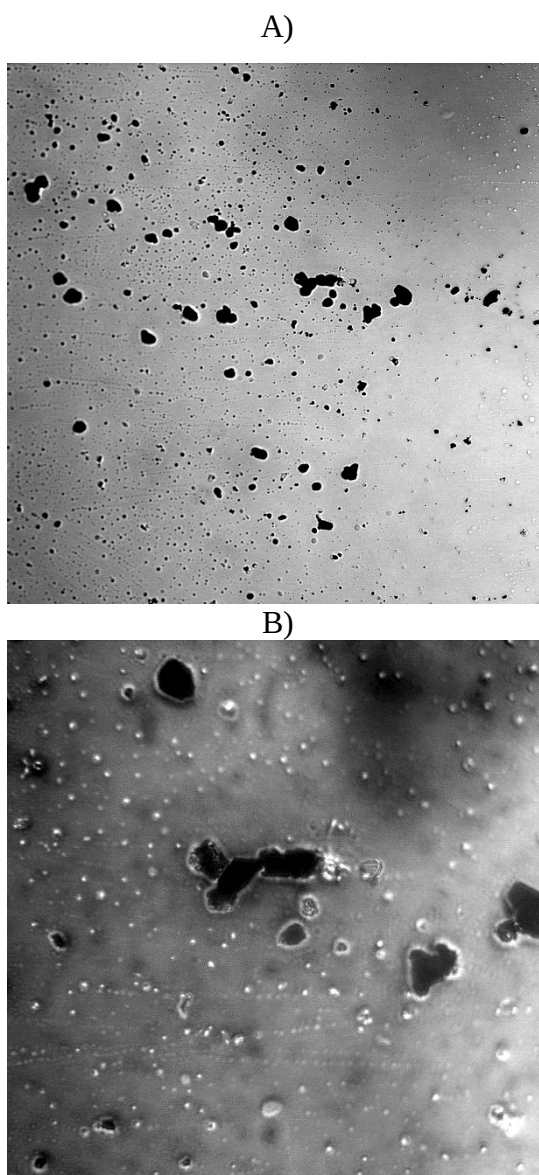


Fonte: Acervo pessoal.

Nas Figuras 44 observam-se formação de película fluorescente, o que possivelmente indica que houve uma fraca incorporação do supressor de poeira pelo material particulado e a sua interação com o mesmo. Isso se deve a fraca capacidade de umectação devido à forte hidrofobicidade do pó de carvão. Pode ser visto bolhas no produto e as partículas de pó de carvão sofrem fraca aglomeração, observando-se repulsão entre o pó de carvão e o produto.

Na Figura 45 são apresentadas as imagens permitindo analisar o efeito do produto e o mecanismo de ação sobre poeira de carvão após receber camada de supressor de poeira da segunda formulação.

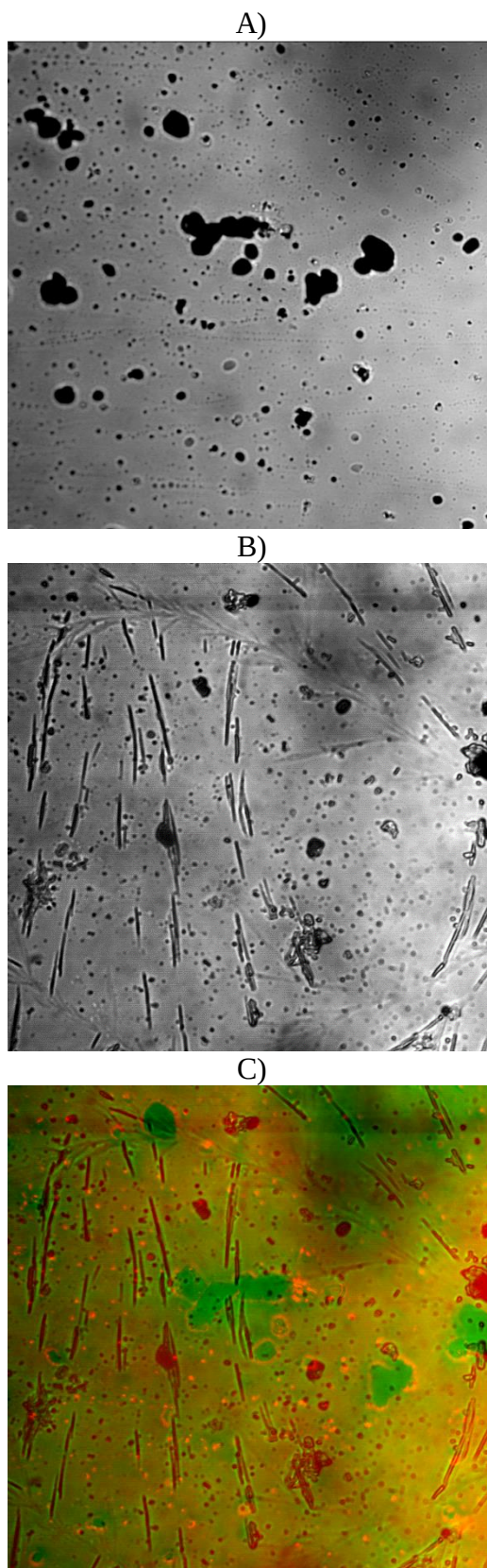
Figura 45 – Imagem obtida em microscópio confocal com aumento de a) 50x e b) 500x. Esta técnica foi utilizada para caracterização topográfica de superfície do carvão mineral após receber camada de supressor de poeira.



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 45 a) mostra vários aglomerados de partículas de pó de carvão sobre a superfície do produto, indicando o efeito de aglomeração do supressor de poeira. Figura 45 b) com o aumento da tela fica bem nítida aglomeração das partículas de pó de carvão, o produto envolvendo as partículas, baseado no agrupamento, efeito circundante e formação de filme sobre o pó de carvão.

Figura 46 - Imagem confocal aumento a) 100x e b) 100 x ISM 75%. Esta opção permite o uso do microscópio para captação de imagem do supressor de poeira sobre os grãos de carvão mineral.



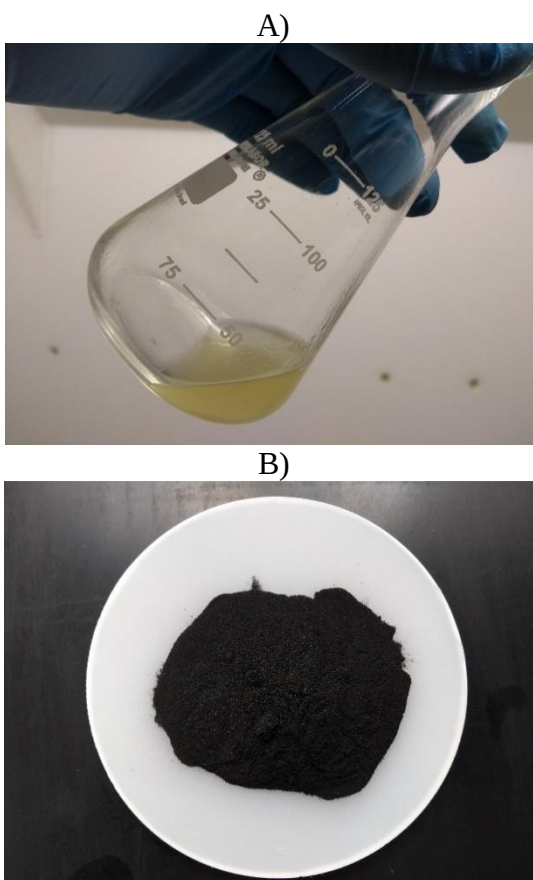
Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 46 a) mostra com maior nitidez o efeito de aglomeração do produto, que concentra as partículas de pó de carvão dispersas e envolvidas nos aglomerados resultantes. Na Figura 46 b) e c) foi possível observar a incorporação do supressor de poeira pelas matrizes de poeira, assim como, aderência do supressor de poeira na partícula de carvão. Além disso, as imagens de microscópio confocal mostram que houve forte interação entre as partículas de pó de carvão e o supressor de poeira.

Nas Figuras 45 e 46, as regiões escuras correspondem às partes cobertas por pó de carvão, enquanto as regiões em cor claras correspondem à superfície do filme do produto sobreposta.

A Figura 47 apresenta o supressor de poeira, segunda formulação e partículas de pó de carvão utilizado em laboratório para a análise de supressão do produto.

Figura 47 - Supressor de poeira em erlenmeyer de 125mL e pó de carvão em base de 19cm de diâmetro.



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 47 (a) observa-se o produto, supressor de poeira em erlenmeyer e Figura 47 (b) mostra pilha de pó de carvão, malha 200, sobre uma base com 19 cm de diâmetro.

O supressor de poeira produzido a partir de breu e γ -PGA, confere elevado poder de aglomeração e adesivo as partículas de poeira, apresentando um pH em solução aquosa de 5.8, aparência líquido viscoso amarelo. Conclui-se ser esse um produto ideal para aspersão em pilhas de minério de carvão estocados nos pátios das indústrias e dos portos, e nos vagões carregados com minério de carvão.

7 CONCLUSÕES

Os dados de campo revelaram alta concentração de partículas nas comunidades mais afetadas, com níveis muito acima da norma estabelecida de acordo com o Regulamento de Normas de Qualidade Ambiental e Decreto de Emissão de Efluentes nº 67/2010 vigente em Moçambique em que o limite de concentração de material particulado no ar atmosférico durante 24 horas é de $150 \mu\text{g m}^{-3}$. Neste caso, as concentrações de PTS atingiram $569 \mu\text{g m}^{-3}$ no mês mais crítico do ano 2015, sendo que as comunidades mais afetadas pelas emissões difusas de partículas com tamanhos $\geq 10\mu\text{m}$ devido à atividade de mineração de carvão em Moatize Liberdade, Carbomoc, Minas Moatize e 25 de Setembro. Contudo, no que concerne as concentrações MP_{10} registradas em 2015, estas são classificadas como Boa a Moderada pelas legislações ambientais moçambicana e brasileira.

É de salientar que dentre as cinco áreas onde foram realizadas as amostragens de PTS, a comunidade Cateme é a única em que registrou baixa concentração, dado afastamento desta em relação as fontes de emissão de material particulado aproximadamente 30 km a norte destas, e pelo fato de não ser abrangida pelas faixas das direções preferenciais do vento de sudeste.

Com relação ao supressor de poeira, a nova formulação proposta resultou em um produto biodegradável cuja matéria prima é o breu. O Supressor de breu é mini emulsão - ou seja, é uma mistura estável de líquidos imiscíveis mantidos em suspensão contendo breu e pequena quantidade de emulsificante. O breu é formado basicamente por ácidos resinosos de goma resina de *Pinus*, os quais são ácidos monocarboxílicos.

O presente estudo utilizou ácido γ -PGA como agente para realizar a modificação química do breu e aumentar a viscosidade, a fim de preparar um novo tipo de supressor de poeira com base nos mecanismos de umedecimento e aglomeração de partículas. As condições da reação foram analisadas por FTIR e a micromorfologia dos produtos foi analisada por MEV, o efeito do produto foi demonstrado e o mecanismo de ação foi analisado por microscopia confocal de varredura a laser. Além disso, a molhabilidade dos produtos foi analisada pelo teste Walker para examinar o comportamento de molhamento do carvão. Através desta série de experimentos confirmou-se que o produto possui excelente capacidade umedecedora de poeira de carvão, resistência após a secagem do filme. O produto obteve uma significativa remoção de poeira e supressão, além disso, o produto final foi composto a base de matérias-primas limpas, de baixo custo, preparação simples, e é esperado que o mesmo alcance aplicações de engenharia.

Para a aplicação do supressor de poeira é utilizado um sistema de aspersão através de bico aspersor, funcionado por meio de um compressor de ar, podendo ser usado para pulverizar em acessos de mina, na pilhas de carvão mineral estocadas em pátios e em vagões carregados de minério.

A supressão efetiva de material particulado em suspensão é de interesse das indústrias de minério, uma vez que as partículas totais em suspensão representam prejuízo econômico e também um problema significativo para a saúde pública e meio ambiente. Deve-se destacar que, na literatura, não constam muitos trabalhos ou artigos científicos voltados para essa área de pesquisa supressores de poeira de base vegetal, especificamente do breu, o que dificulta a escolha do método para validar a proposta por completo. Embora essa abordagem ainda seja importante para ações de mitigação de impactos negativos, é necessário avaliá-la de forma quantitativa e construir cenários ótimos para aplicação de novos produtos.

Outro ponto que chama a atenção refere-se à viabilidade de utilização do breu, importante constituinte das coníferas, como supressor de poeira, podendo gerar um produto atraente, principalmente em países como o Brasil, onde a obtenção da resina tem despertado atenção de órgãos oficiais de pesquisa e empresas privadas que cultivam o *Pinus*, podendo ser aplicável em Moçambique. Outro fator importante refere-se a diminuição do uso de petroquímicos em diversas formulações, neste caso, o uso de ácidos resinosos viabiliza o uso mais racional do produto de floresta pela indústria madeireira, possibilitando o aumento do retorno econômico na atividade florestal e a geração de produtos de maior valor agregado.

Referências

- AFONSO, R. S, MARQUES, J. M, FERRARA, M. **A evolução geológica de Moçambique**. Instituto de Investigação Científica tropical. Ministério da Ciência e da Tecnologia, Portugal. 1998.
- AHRENS, A. D. **Essentials of meteorology**: an invitation to the atmosphere. Wet Publishing Company. New York, 1993. 374p.
- ALMBAUER, R.A., et al. **Analysis of the daily variations of winter time air pollution concentrations in the city of Graz, Austria**. Environmental Monitoring and Assessment, 2001. 65, 79–87p.
- AMERICAN ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US-EPA). **Code of Federal Regulation**, 40.Pt. 58.Ambient Air Surveillance, 1996.
- AMERICAN ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US-EPA). **Atmospheric dispersion parameters in gaussian plume modeling**. Research triangle park. NC. March, 1976. 44p.
- AMERICAN ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US-EPA). **Guideline on air quality models (Revised) and suplemente A**. September. 1987. 180p.
- AMORIM, W. B. **Monitoramento da concentração e caracterização de material particulado suspenso na atmosfera**. Campinas, SP. 2004 (Tese, Doutorado), 165 p.
- ASSUNÇÃO, J. V. **Poluição atmosférica**. In: CASTELLANO. E. G., Ed. Desenvolvimento sustentado: problemas e estratégias. São Paulo. Academia de Ciências do Estado de São Paulo. 1998. p.271-308.
- ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente, 5 ed., Bookman, Porto Alegre, 2012.
- AWMA. **Air and waste manegment association**: fundamentals of disperson modeling. Pittsburgh. November, 2000. 492 p.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 17ª ed. Rio de janeiro. Bertrand Brasil, 2013.
- BAIRD, C. **Química ambiental**. 2 ed. Porto Alegre, Bookman, 2002.
- BARBOSA, Luiz Cláudio de Almeida. **Espectroscopia no infravermelho na caracterização de compostos orgânicos**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2011.
- BENSON, P. CALINE4: **A disperson model for predicting air pollutant concentretions near roadways**. Report No. FHWA/CA/TL-84/14.California Department of Transportation, CA, 1989.

BERZAGHI, C. **Pinus spp e resinagem**. São Paulo, Instituto Florestal, 1972, 33p.
(Boletim Técnico N^o 2).

BOLANDER, P. & YAMADA, A. **Dust palliative selection and application guide**. San Dimas, CA. San Dimas Technology and Development Center. 1999.

BRASIL. **Resolução CONAMA N^o 03, Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR**: DE 28/0690 – Publicação DOU, 1990.

BRITO, José. O., BARRICHELO, Luiz. E. G., GUTIERREZ, Luiz E. **Qualidade do breu e terebintina de pinheiros tropicais**. IPEF n. 21, 1980. p.55-63.

BRUNO, R. L. **Material particulado atmosférico na cidade de São Carlos – SP: Qualificação e identificação de fontes**. Tese (Doutorado), São Carlos, UFSCar/SP. 2005. 187p.

CAIRNCROSS, B. **An overview of the permian (karoo) coal deposits of Southern Africa**. J. Afr. Earth Sci. 33, 529-562. 2001.

CAMPESE, M. G., et al. **Resistência mecânica de hidrogeis termosensíveis constituídos de alginato- Ca^{2+} /PNIPAAm, TIPO SEMI-IPN**. Química Nova, v. 30, n. 7, p. 1649-1652, 2007.

CMRI. **Determination of emission factor for various opencast mining activities**. Report GAP/9/EMG/MOEF/97, Central Mining Research Institute, Environmental Management Group, Dhanbad. 1998.

CANDELA, T; FOUET, A. **Poly-gamma-glutamate in bacteria**: molecular microbiology, v. 60, n. 5, p. 1091-1098, 2006.

CANO, T. M. **Carvão mineral**: DNPM, 2009. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

CARDOSO, N. C., et al. **Avaliação do teor de material particulado atmosférico inalável (MP10) na região metropolitana de Porto Alegre no período 2010-2012**. Porto Alegre, 2014.

CARVALHO, A. M. G. de. **Geologia sedimentar**: Rochas sedimentares. 1^a ed. Ancora Editora. Volume III. Lisboa, 2006, 331p.

CARVALHO, Marinaldo Sousa de. **Ácido abiético E (+)- esclareolídeo como matérias-primas na preparação de um intermediário-chave e síntese de diterpenos labdânico com atividade biológica**. Tese (Doutorado), 2007. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de química. Campinas, 2007.

CATUNEAU, O., WOPFNER H., ERIKSSON P.G. **The Karoo basins of South-central Africa**. Journal of African Earth Science 43:211-253. 2005.

CAVALCANTI, P. M. P. S. **Modelo de gestão da qualidade do ar: abordagem preventiva e corretiva**. Rio de Janeiro, 2010. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro,

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação em Pesquisa de Engenharia. Rio de Janeiro, 2010.

CETESB. **Companhia de tecnologia de saneamento ambiental**: estudo do comportamento do ozônio na Região Metropolitana de São Paulo, São Paulo, 2002.

CETESB. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2014**. São Paulo. CETESB. 2015.

CETESB. **Relatório da qualidade do ar no Estado de São Paulo – 1991**. São Paulo, CETESB, 2000, 63 p.

CHANG T. CHENG F. Q. **The application of the surfactants in chemical dust suppressant**. Sci-Tech Information Development & Economy. 2009; p.122-124.

COELHO A. V. P. **Complexo gabro anortozítico de Tete-Moçambique**. Tipografia globo, Lda, Lisboa, 1969.

COLLAZZO, G. C. **Gaseificação de carvões nacionais com vapor d'água visando a produção de gás de síntese**. 2013. 145p. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. SC, Florianópolis, Brasil, 2013.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Conama**, 1993.

CONAMA. Resolução CONAMA Nº 03, **Dispõe sobre padrões de qualidade ar, previstos no PRONAR – DE 28/0690**: Publicação DOU, 1990.

CONCESSÃO MINEIRA, Contrato Mineiro relativo a Concessão Mineira da Mina de Carvão de Moatize entre Governo da República de Moçambique e Rio Doce LTDA. 2005.

CPWA. **Dust control for unpaved roads**. Canadian Public Works Association. 2005.

CUJIC, et al. **Environmental assessment of heavy metals around the largest coal fired power plant in Serbia**. Catena. 2016. 44-52 p. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816215301673>> Acesso em 20 jun. 2017.

CUNHA, Sandra Batista, GUERRA, Antônio Jose Teixeira (orgs.). **Avaliação e perícia ambiental**. 13. ed. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2012.

DAILY G. C. **Introduction: what are ecosystem services?** In: Daily GC, editor. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Washington (DC): Island Press; 1997. p. 1– 10.

DAY, D. F. Aldinates. In: KAPLAN, D. L. **Biopolimers from renewable resources**. Berlin: Springer – Velarg, 1998. P. 119-140.

DAVID, S. J.; SAMPAIO, C. H. **Estado da arte da mineração em Moçambique**: Caso carvão de Moatize, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, 2012. 20p.

DAVIDSON, R.M. Mode of trace elements in coal. EIA report CCC/36 36. 2000. pp. 1-36.

DNG – DIREÇÃO NACIONAL DE GEOLOGIA. **Características geológicas e a qualidade de carvão da bacia de Moatize**. Ministério dos Recursos Minerais. Moçambique. 4^a Conferência anual de carvão em Moçambique, Maputo, 2006. 17p. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/informaoz/fatima-roberto-chauque-national-directorate-of-geology-mozambique>>. Acesso em: 15 Set. 2016.

DO, J. H.; CHANG, H. N.; LEE, S.Y. **Efficient recovery of γ -poly(glutamic acid) from highly viscous culture broth**. Biotechnology and bioengineering, v. 76, n. 3, p. 219-223, 2001.

DONTALAA, Siva Prasad; REDDYB, T. Byragi; VADDEC, Ramesh. **Environmental Aspects and Impacts its Mitigation Measures of Corporate Coal Mining**. 2015. Disponível em: www.sciencedirect.com Acesso em: 02 de jun. 2017.

EAGLEMAN, J. **Air pollution meteorology**. Lenexa: Trimedia Publishing Company, 1991. 255p.

FAURE, K., et al. **Provenience of mudstones in the Karoo Supergroup of the Ellisras Basin, South Africa: geological evidence**. J. Afr. Earth Sci. 23 (2). 189-24. 1996.

FERNANDES, Ana Rosa Aon Cardoso. **Extração e caracterização de ácido γ -poliglutâmico em substrato de soja fermentado (natto)**. 2017. Dissertação (Mestre em Ciências Ambientais). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Instituto de Ciências e Tecnologia. Sorocaba. 2017.

FERREIRA, Tatiane Moraes; FORTI, Maria Cristina; ALVALÀ, Plinio Carlos.

Caracterização morfológica e química do particulado atmosférico em uma região urbana: São José dos Campos, INPE. 2011.

FERREIRA, Tiago Henriques. **Estudo de ésteres fortificados provenientes de colofónias de diversas origens**. 2016. Dissertação (Mestre). Universidade de Coimbra, Departamento de engenharia química, Faculdade de ciências e tecnologia. 2016. Disponível em: <<https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/37502/1/Tiago%20Ferreira.pdf>> Acesso em: 7 de jun. 2017.

FINKELMAN, R. B. **Modes of occurrence of potentially hazardous elements in coal: levels of confidence**. Fuel Processing Technology 39, 1994. pp. 21- 34.

FRANÇA, Morgana Cristina. **Produção de painéis aglomerados de fibras Oversized de uma indústria de MDF**. 2015. 170p. Universidade do Estado de Santa Catarina. Dissertação. (Mestre em Engenharia Florestal). Lages, 2015.

GALBREATH, K. C. de WALL, R. A.; ZYGARLICHE, C. J. **International Energy Agency. Coal research collaborative program on mode of occurrence of trace elements in coal- results from the Energy and Environmental Research Center**. Final report. Energy and Environmental Research Center, University of North Dakota, Grand Fork N D, USA, 1999. p21.

GARRIDO, M.A.de O. **Resinagem: Manual Técnico**. Instituto Florestal – Secretaria do Meio Ambiente, 23 p., 1998.

GHOSE, M.K., MAJEE, S.R. **Assessment of dust generation due to opencast coal mining – an Indian case study**. Environmental Monitoring and Assessment, 2000. 61, 255–263p.

GOLDER ASSOCIATES AFRICA. **External audit of coal reserves for Moatize coal projet, Sandton**: Golder Associates, 2010.

GONENC Z.S., et al. **Comparison of coal pyrolysis product distributions from 3 captive sample techniques**, Fuel 69, 1990. 383-390 p.

GOODARZI, F.; RIEDIGER, C.I. **Mineralogicl and element variation of coal from Alberta; Canada: an example from the No. 2 Seam**. Genesee mine. International Journal of Coal Geology 43, 2000. pp. 259-286.

GOODARZI, F.; HUGGINS, F.E. **The speciation of arsenic, chromium and nickel in milled-coal and ashes from a pulverized coal fired power plant in Western Canada**. Journal of Environmental monitoring 3, 2001. pp. 1- 6.

GOODARZI, et al. **A preliminary study of mineralogy and geochemistry of four coal samples from northern Iran**. International Journal of Coal Geology 65, 2006. pp. 35– 50.

GOODRICH, B.A., KOSKI, R.D., & JACOBI, W. R. **Monitoring surface water chemistry near magnesium chloride dust suppressant treated roads in Colorado**. *Journal of Environmental Quality*, 38, 2373-2381. 2009.

GRANTZ, D. A.; GARNER, J. H. B.; JOHNSON, D. W. **Ecological effects of particulate matter**. University of Nevada at Reno, Reno, NV. Environment International 29. 2003, 213–239P. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com>>. Acesso: 13 jun. 2016.

HE, L.; NEU, M. P.; VANDERBERG, L. A. **Bacillus lichenformis γ -glutamyl exopolymer: physicochemical characterization and U(VI) interaction**. Environmental Scince and Technology, v.32, n.9, p. 1694-1701, 2000.

HINDS, W. C. **Aerosol technology**, John Wiley & Sons, New York, 1982.

HO, G. H; et al. Gamma-Polyglutamic Acid Produced by *Bacillus subtilis* (natto): Structural Characteristics, Chemical Properties and Biological Functionalities. **Journal of the Chinese Chemical Society**, v.53, n.6, p.1363-1384, 2006.

HUGHTON, J. **Global warnig**: The complet briefing. 2 ed. Cambridge University Press, 1998. 251p.

IARC. **Air pollution and câncer**. International Agency for Research on Cancer. IARC Scientific Publications; 161, Lyon. 2013. Disponível em: <

<https://www.iarc.fr/en/publications/books/sp161/AirPollutionandCancer161.pdf>> Acesso: 05 mai. 2018.

ISABELL, J. L. CATAUNEAU, O. **Carboniferous-permianglaciation in the main Karoo basin, South Africa.** Stratigraphy, depositional controls and basin dynamics. Geological Society of America, Special paper, 441, 71-82. 2008.

ISABELL, J. L., COLE, D. I., CAUTEAU, O. **Carboniferous-Permian glaciation in the main Karoo basin, South Africa.** Stratigraphy, depositional controls and dynamics. Geological Society of America, Special paper, 441, 71-82. 2008.

ISO 11760. **Classification of Coals**, 1st edition. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. 2005. 9 pp.

KALENGA, Pierre Mubiayi. **Determination and characterization of sulphur in South African coal.** 2011. Degree of Master of Science. University of the Witwatersrand. Johannesburg, 2011. 107 p.

KING, A. H. **Brown seaweed extracts (alginates).** *Food Hydrocolloids*, v. p. 115-188, 1983.

LAKSHMINARAYANA, G. **Geology of Barcode type coking coal seams, Mecondezi sub-basin, Moatize Coalfield, Mozambique.** International journal of coal geology. 2015. 1-13p.

LYRA, Diógenes Ganghis Pimentel de. Modelo integrado de gestão da qualidade do ar da região metropolitana de Salvador, 2008. Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2008. 233p.

LOHNES, R.A. & COREE, B.J. **Determination and evaluation of alternate methods for managing and controlling highway-related dust.** Iowa State University. 2002.

LOPES, Célia Maria Oliveira. **Caracterização de resinas naturais e seus derivados por análise multivariada.** 2008. Dissertação (Mestre). Universidade de Aveiro, Departamento de Química. Aveiro. 2008.

LUCAS, E. F., SOARES, B. G., MONTEIRO, E. **Caracterização de polímeros:** determinação de peso molecular e análise térmica. Rio de Janeiro: E-papers, 2001. 366 p.

MAE. **Perfil do Distrito de Moatize:** Província de Tete. Ministério da Administração Estatal. Série Perfis Distritais. Maputo, Moçambique, 2005.

MANAHAN, S. E. **Environmental chemistry**, 6th ed., CRC Press, USA, 1994.

MANAHAN, S. E. **Environmental chemistry**, 8th ed. Florida: CRC Press, LLC, 2005. P. 279.

MANHARAJE Mateus João F. Carvão de Moatize (Tete): do recurso mineral ao ambiente. 2014. Dissertação (Mestre), Universidade de Aveiro. Departamento de geociências. Aveiro. 2014.

MARQUES, A. **Positional Responses in Lichen TRansplant Biomonitoring of Trace Element Air Pollution**. 2008. Tese (Doutorado), Universidade de Tecnologia de Delf, Departamento de Radiação, Radionuclídeos e Reactores. 2008.

MCPHERSON, M. **Subsurface Fires and Explosions**. Virginia Polytechnic Institute and State University, US. Virginia. 2001.

MEDEIROS, ADRIANA DE S. **Investigação dos danos induzidos pela radiação gama no homopolímero poli(fluoreto de vinilideno) e no copolímero poli(fluoreto de vinilideno-trifluoretileno) para aplicação em dosimetria de altas doses**. 2007. Dissertação. (Mestre), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

MEENALBAL, T., AKIL, K. **Ambient air quality at selected sites in Coimbatore city**. Indian Journal of Environmental Protection, 2001. 20, 49–53.

MELO, G.B. **Efluentes Atmosféricos e Qualidade do Ar**. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

MOURA, M. R; AOUADA, F. A.; FAVARO, S. L.; RADOVANOVIC, E.; RUBIRA, A. F.; MUNIZ, E. C. **Release of BSA from porous matrices constituted of alginate Ca^{2+} and PNIPAAm-interpenetrated networks**. *Materials Science and Engineering C*, v. 29, p 2319-2325, 2009.

MUCHANGOS, A. **Moçambique, Paisagens e Regiões Naturais**. Maputo: Tipografia Globo Lda, 1999.

NEVES, N. M. **Conhecimentos básicos sobre poluição atmosférica**. Salvador. 1999. 70p.
O'NEIL, M. J.; SMITH, A.; HECKELMAN, P. E.; BUDAVARI, S. **The Merck Index: na encyclopedia of chemicals, drugs, and biologicals**. 13th ed. Whitehouse: Merck, 2001.

ORLANDINI, Dario. **Cultivo e resinagem de Pinus**. 66p., CPT - Centro de Produções técnicas, Viçosa, 2000.

PACHECO, E. T. **Estudo do beneficiamento a seco do carvão da mina de Candiota-RS**, 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, RS, 2008.

PAULINO, F., Lopes, L. **Estratigrafia do Karoo em Moçambique. Novas unidades**. X Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, XVI semana de Geoquímica, 2009.

PAULINO, F., Lopes, L. **Proposta duma Estratigrafia do Supreggrupo do Karoo de Moçambique, à luz dos dados da nova cartografia geológica na escala 1:250.000**. Projeto científico de conclusão da Licenciatura em Geologia, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, Moçambique, 2009.

PIECHOTA, T, et al. 2004. **Potential environmental impacts of dust suppressants: Avoiding another times beach**. United States Environmental Protection Agency. Las Vegas, NV. 2004.

PIHUI, Pi, K. et al. **A facile one-step fabrication of robust superhydrophobic/superoleophilic cotton fabric using a crosslinkable POSS-containing fluorinated copolymer.** *Journal of Process in organic coatings*. P. 522-229, 2016.

PONDJA, Estevão A. J. **Treatment methods for water pollution from coal mining in Moatize (Mozambique).** Lund University, Department of Building and Environmental Technology, 2013. 84p.

ROSA, Maria João Serralheiro. Caracterização de amostras de resina por GC-MS, RMN e análise quimiométrica: Composição e origem. 2014. Dissertação (Mestre em Química) Universidade de Coimbra. Departamento de Química. Coimbra, 2014. 85p. Disponível em <<https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/27304/1/TESE%20MJRosa%20.pdf>> Acesso em: 18 jun. 2017.

RUBIRA, A. F. et al. **Morfologia de hidrogeis-IPN termosensíveis e pH-responsivos. Polímeros.** *Ciencia e Tecnologia*, v. 19 n. 105-110, 2009.

RUY, Fernanda. **Análise e pesquisa da variação de cor Gardner em colofônia líquida tropical.** 8º Simposio de Ensino de Graduação. Piracicaba, 2010.

SALDIVA Paulo H. N. et al. **Avaliação do impacto da poluição atmosférica no Estado de São Paulo sob a visão da saúde.** Instituto de saúde e sustentabilidade. São Paulo, 2013.

SANDERS, T.G. & ADDO, J. Q. **Effectiveness and environmental impact of road dust suppressants.** Ft Collins, CO. Colorado State University. 1993.

SANDERS, T.G. et al. **Relative effectiveness of road dust suppressants.** Ft Collins, CO. Colorado State University. 1994.

SEWELL, G. H. **Administração e o controle da qualidade ambiental:** original norte-americano: Environmental quality management. São Paulo, EPU, EDUSP, CETESB, 1978. 295p. 1978.

SHI, X. et al. **Evaluation of alternative anti-icing and deicing compounds using sodium chloride and magnesium chloride as baseline deicers-phase 1.** Colorado Department of Transportation. 2009.

SIA, S., and ABDULLAH, W., **Concentration and association of minor and trace elements in Mukah coal from Sarawak, Malaysia, with emphasis on the potentially hazardous trace elements.** *International Journal of Coal Geology* 88, 2011. 179–193.

SIGAL, L. L, SUTER II GW. **Evaluation of methods for determining adverse impacts of air pollution on terrestrial ecosystems.** *Environ Manage* 1987; 11:675– 94p.

SINGH, et al. **Trace a composição metálica de partículas em suspensão no ar nas áreas de mineração de carvão e não mineradoras da região de Dhanbad, Jharkhand, Índia.** *Atmospheric pollution research*. 2012. 238-246p. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104215304463>> Acesso em: 20 jun. 2017.

SINGH, et al. **Assessment of air pollution around coal mining area:** Emphasizing on spatial distributions, seasonal variations and heavy metals, using cluster and principal component analysis. *Atmospheric pollution research*. 2014. P. 79-86. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104215303445>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

SINHA, S., BANERJEE, S.P., 1997. **Characterisation of haul road in Indian open cast iron ore mine.** *Atmospheric Environment*, 31, 2809–2814.

SMITH. Hearther. **Dust supression options and the triple bottom line.** Roothing network manager, Rodney. 2003.

SOUTH AFRICAN BUREAU of STANDARDS, SOUTH AFRICAN REFERENCE MATERIAL. **SARM 20, certificate of analysis, coal (Sasolburg) certified reference material.** SABS, Pretoria, South Africa, 1984. p 2.

SOUSA, L., RODRIGUES C., DINIS, M. **O Carvão na Actualidade.** Universidade Fernando Pessoa, Lisboa. 2012.

SOUZA, Natan Felipe. **A qualidade do ar em Morro da Fumaça e seus efeitos sobre a saúde da população.** 2011. 80f. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, (SC). 2011.

SWAINE, D. J. **Trace elements in coal.** Butterwoths, London, 1990. pp. 296.

SUÁREZ, Ruiz, I.; WARD R. Colin. **Applied Coal Petrology:** Chapter 2 - Basic factors controlling coal quality and technological behaviorof coal. Elsevier, 2008.

TASEIKO, P. et al. **Air pollution dispersion within urban stret canyons.** *Atmospheric Envaironment* 43, 2009, 245-252p.

THE WORLD BANK & IHME, Institute for Health Metrics and Evaluation. **The Cost of Air Pollution.** Strengthening the Economic Case for Action. University of Washington, Seattle. 2016,. Disponível em: <

<http://documents.worldbank.org/curated/pt/781521473177013155/pdf/108141-REVISED-Cost-of-PollutionWebCORRECTEDfile.pdf>>. Acesso em 25 març. 2018.

TORSVIK, T. H., COCKS, L. R. M. **Gondwana from top to base in space and time.** *GondwanaResearch* 24, 999-1030. 2013.

UNITED NATIONS MOZAMBIQUE. **Um documento síntese de políticas das Nações Unidas:** O papel das Nações Unidas no que diz respeito à gestão de recursos naturais e indústrias extrativas, em Moçambique. 2013.

USEPA. **Code of Federal Regulation, 40. Pt. 58.** Ambient Air Surveillance, 1996.

VALERI, Sérgio V.; PAULA, Rinaldo César de. **Síntese das principais características do Gênero *Pinus***. Universidade Estadual Paulista. Jabutical, 2009.

VASCONCELLOS, P. C. **Um estudo sobre a caracterização de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e seus derivados, e hidrocarbonetos alifáticos saturados em material particulado atmosférico proveniente de sítios urbanos, suburbanos e florestais**. São Paulo, 1996. 103p. Tese (Doutorado) – Instituto de Química, Universidade de São Paulo, 1996.

VASCONCELOS, L. A. T. de Sousa e. **Contribuição para o conhecimento dos carvões da Bacia Carbonífera de Moatize, Província de Tete, República de Moçambique**, 1995. Tese (Doutorado em Geologia) Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 1995, volume I, 243.

VALKOVIC, V. **Trace elements in coal**, Vol II, CRC Press, Inc. USA, 1983. pp. 27-74,103-120,181,203.

VEZIROGLU, T. N., SAHIN, S. **21ST Century`s energy: Hydrogen energy system**. 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890407004281>>. Acesso em 22 mai. 2016.

WAGNER, N. J.; HLATSHWAGO, B. **Occurence of potentially hazardous trace elements in five Highveld coals, South Africa**. International Journal of Coal Geology 63. 2005. pp. 228-246.

WCI – World Coal Institut (2007). **Estágios de carbonificação ou “rank” de carvão mineral e seus usos**. In: *The Coal Resource: A comprehensive overview of coal*. Disponível em <<http://www.homelandenergygroupp.com/s/coal.asp>>. Acesso em 15 abr. 2016.

WESTMAN W. E. **How much are nature’s services worth? Measuring the social benefits of ecosystem functioning is both controversial and illuminating**. Science 1977; 197:960–4.

WILSON W. E, MAGE D.T, GRANT L. D. **Estimating separately personal; Exposure to ambient and nonambient particulate matter for epidemiology and risk assessment: why and how**. Journal of Air and Waste Management Association; 2000, 1167-83.

WILLIS, J.P. **Trace elements studies on South African coals and fly ash**. Special publication-Geological Society of South Africa 7, 1983. pp. 129-135.

WITHYCOMBE, E. & DULLA, R. **Alaska rural dust control alternatives**. Sacramento, CA. Sierra Research, Inc. Report prepared for Alaska Department of Environmental Conservation. 2006.

WHO. **Air quality guidelines for Europe**. WHO regional publications - European series, n. 91. Copenhagen: WHO, 2000.

WHO. **Health effects of particulate matter: Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia**. Copenhagen, 2013. Disponível em:

<http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf> Acesso: 11 Abr. 2018.

_____. **WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.** Global update 2005. Geneva: WHO, 2006.

WOPFNER, H. **Tectonic and climatic events controlling deposition in Tanzanian Karoo basins.** J. Afr. Earth Sci. 34, 167-17. 2002.

WORLD COAL ASSOCIATION. **World coal organization:** UNFCCC & WRI- 2014.

WORLD COAL ASSOCIATION. **Coal facts 2015.** Disponível em: <<http://www.worldcoal.org/resources>>. Acesso em: 06 set. 2017.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. **World resources 2000–2001:** people and ecosystems: the fraying web of life. Washington (DC): World Resources Institute; 2000.

WTIC. **Dust control on unpaved roads.** *Wisconsin Transportation Bulletin.* Madison. WI. 1997. 6 pp.

XIA, Wencheng, XIE, Guangyuan, PENG, Yaoli. **Recent advances in beneficiation for low rank coals.** Powder Technology, 2015. 206-221p.

YAN, et al. **Volatility and chemistry of trace elements in a coal combustor.** Fuel 80, 2001. pp. 2217-2226.

ZHOU, Y.; REN, Y. **Distribution of arsenic in coals of Yunnan Province, China, and its controlling factors.** International Journal of Coal Geology 20, 1992. pp. 85-98.

VALE. **Relatório de Sustentabilidade 2014.** Disponível em: <<http://www.vale.com/PT/aboutvale/sustainability/links/LinksDownloadsDocuments/relatorio-de-sustentabilidade-2014.pdf>> acesso em: 20 out. 2017.

VALE. **Relatório de Sustentabilidade 2015.** Disponível em: <<http://www.vale.com/PT/aboutvale/sustainability/links/LinksDownloadsDocuments/relatorio-de-sustentabilidade-2015.pdf>> acesso em: 01 març. 2018.