

# Características mineralógicas e granulométricas das fontes de poeiras no Polo Cerâmico de Santa Gertrudes - SP

## *(Mineralogical and granulometric characteristics of dust sources in the Ceramic Cluster of Santa Gertrudes - SP)*

M. Oliveira<sup>1</sup>, A. Zanardo<sup>2</sup>, S. G. de Carvalho<sup>2</sup>, R. R. da Rocha<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, <sup>2</sup>Curso de Geologia, Departamento de Petrologia e Metalogenia, <sup>3</sup>Programa de Pós-Graduação em Geologia Regional Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Av. 24-A, 1515, Bela Vista, Rio Claro, SP 13506-900

### Resumo

Estudos recentes relativos à presença de fluxos de poeiras que entram na atmosfera atestam que eles podem ser até oito vezes maiores do que as estimativas até então consolidadas. Com origem atribuída principalmente às novas demandas de usos dos solos, combustíveis e rochas, essa concentração pode modificar globalmente os principais componentes do Geossistema Climático e colocar em risco os limites ecossistêmicos que suportam a vida no planeta. Em que pese a relevância do Brasil como produtor de commodities minerais e agrícolas e, portanto, um grande produtor de poeiras minerais, poucos estudos dessa natureza têm sido realizados. O presente estudo aborda esse tema em uma região conhecida como Polo Cerâmico de Santa Gertrudes que, além de abrigar as maiores indústrias cerâmicas do Brasil, destaca-se pela sua grande produção agrícola. Técnicas de difração de raios X e difração a laser foram utilizadas para caracterizar a composição mineralógica e granulométrica relativamente dos solos (fonte pedológica), minério de argila (fonte litológica) e seus produtos de transformação (fonte terrígena e industrial), considerados como principais fontes emissoras de poeiras dessa região. A presença de uma assembleia de minerais silicatados ricos em alumínio e ferro que predominam nessas fontes de poeiras explica os altos teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  encontrados no minério, solos e na atmosfera da região. O predomínio de argilas caulínicas pode ser considerado como diagnóstico de fonte pedológica, enquanto que o predomínio de argilas ilíticas caracteriza a fonte litológica. Os estudos granulométricos revelaram que, entre as diferentes fontes, a pedológica é a que possui maior volume de materiais argilosos na fração MP10 e, portanto, a que mais tem condição de contribuir com os processos de ressuspensão que são eficientes na transferência de poeiras minerais da superfície para a atmosfera.

**Palavras-chave:** qualidade do ar, material particulado, Geossistema Climático, indústrias cerâmicas.

### Abstract

Recent studies on the presence of dust flows into the atmosphere show that they can be up to eight times higher than the previously consolidated estimates. With origin mainly attributed to the new demands of uses of soils, fuels and rocks, this concentration can globally modify the main components of the Climate geosystem, and endanger the ecosystem limits which support life on the planet. Despite the importance of Brazil as a producer of mineral and agricultural commodities, and therefore a major producer of mineral dust, few such studies have been conducted. This study is related with this issue in a region known as Ceramic Cluster of Santa Gertrudes that have the largest ceramics industries of Brazil and also large agricultural production. X-ray diffraction and laser diffraction techniques were used to characterize the mineralogical composition and particle size distribution of soil (pedological source), clay mineral (lithological source) and their transformation products (terrigenous and industrial source), considered as the main emission sources of dust in this region. The presence of an assembly of silicate minerals rich in aluminum and iron that prevails in these sources of dust explains the high  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  contents found in the ore, soil and the atmosphere of the region. The predominance of minerals such as kaolinite clays can be considered as pedological source diagnostic, while the predominant illitic clays characterize the lithology source. The granulometric studies revealed that, among the various sources, the pedological is the one with the highest fraction of clay materials in MP10, and therefore has the higher potential to contribute with the resuspension processes that are efficient to transfer mineral dusts of surface to the atmosphere.

**Keywords:** air quality, particulate matter, geosystem Climate, ceramics industries.

## INTRODUÇÃO

Desde a Conferência Internacional do Meio Ambiente realizada em 1972 na cidade de Estocolmo [1], os cientistas vêm afirmando que o acentuado e contínuo crescimento

populacional, que demanda por mais e mais recursos naturais e industriais para atender o sistema socioeconômico instalado no planeta, é o principal responsável pelas mudanças em andamento no Geossistema do Clima. Seus principais componentes ou subsistemas representados pela

pedosfera/litosfera (solo/rocha), hidrosfera (água), biosfera (vida) e atmosfera (ar) constituem distintos reservatórios de elementos químicos que funcionam de forma sistêmica e interativa. As referidas mudanças surgem em função do desbalanceamento entre os fluxos de matéria e energia que entram e saem de uma esfera componente para outra, na busca do reequilíbrio do Geossistema. Exemplos desse tipo de atividade podem ser observados durante episódios vulcânicos que transferem gigantescas quantidades de gases, aerossóis, minerais e vapores d'água da litosfera para a atmosfera, ou durante a ação dos ventos que conduzem poeiras da pedosfera/litosfera para a atmosfera, ou ainda pela evaporação e evapotranspiração promovida pela hidrosfera nos continentes e oceanos para transferir grandes quantidades de águas da hidrosfera para a atmosfera [2]. Em todos esses casos, os fluxos de matéria e energia podem formar concentrações anômalas na atmosfera, que reagem com os componentes atmosféricos normais gerando novos compostos químicos (aerossóis) que aí permanecem por tempo indefinido, até serem removidos por movimentos convectivos, advectivos e gravitacionais para as outras esferas do Geossistema do Clima. As poeiras eólicas, em especial, são removidas por deposição úmida e/ou seca, ou por reações químicas de partículas e gases, para as outras esferas presentes na superfície terrestre [3]. A depender do tempo de residência dos elementos e/ou compostos químicos no interior dessas esferas, são potencializados riscos ambientais em escala local, regional e global, capazes de interferir nos limites ecossistêmicos que controlam a vida no planeta [1]. Entre esses limites estão as mudanças climáticas [4], o aumento nas taxas de produção e emissão de aerossóis atmosféricos, como fumos, vapores, cinzas, névoas, sprays e em especial as poeiras eólicas vinculadas aos novos usos dos solos e rochas. Estudos recentes mostrando que a atmosfera atual está concentrando poeiras eólicas relativamente à sua composição química no passado [5] são corroborados por outros pesquisadores [5, 6], que estimam que os fluxos de poeiras que entram na atmosfera, tanto em escala local como regional, são pelo menos o dobro, podendo chegar até a oito vezes o volume das estimativas até então consolidadas. Essa taxa de concentração é capaz de impactar e modificar a composição química de todas as esferas do Geossistema do Clima (da água, do ar, da vida e dos solos), alterar a quantidade de radiação terrestre e colocar em risco todos os ecossistemas existentes no planeta [6]. Em que pese a relevância do Brasil no cenário mundial como um dos maiores produtores e fornecedores de commodities minerais e agrícolas do mundo, estudos dessa natureza e relacionados com processos repetitivos de movimentos ascendentes de poeiras eólicas por ressuspensão têm sido relegados.

A importância de se caracterizar mineralogicamente as fontes de poeiras de uma determinada região deve-se ao fato de que parte importante do fluxo de minerais, elementos e/ou compostos químicos que chega à atmosfera transportada pelos ventos é oriunda de solos. A liberação desses materiais ocorre quando os minerais são cominuídos ou transformados naturalmente em outros minerais durante

processos de alteração superficial, ou antropicamente pelas indústrias. Em ambos os casos, podem ser mobilizados para as esferas que compõem o meio ambiente. A eficiência desse transporte por sua vez depende de condições meteorológicas locais e regionais, como temperatura e umidade do ar, velocidade e direção dos ventos, estabilidade atmosférica e condições topográficas, entre outros fatores. Também são importantes os parâmetros decorrentes da natureza dos materiais particulados (MP), tais como: densidade, morfologia, natureza físico-química, tempo de residência e especialmente o diâmetro das partículas que interfere na distância e no transporte dos fluxos de elementos e compostos químicos. Nesse contexto o presente trabalho tem como objetivo contribuir para o entendimento da composição mineralógica e granulométrica das fontes emissoras de poeira na região do Polo Cerâmico de Santa Gertrudes, que possui vocação agrícola e mineira, e contém a maior aglutinação de indústrias cerâmicas das Américas. Para tanto, foi necessário atingir outros objetivos intermediários, como: i) determinação da composição mineralógica das diferentes fontes emissoras de poeiras minerais para a atmosfera local de uma região localizada na porção central do Polo Cerâmico de Santa Gertrudes; ii) determinação das respectivas composições granulométricas de cada fonte de poeira; iii) interpretação sobre a presença dos principais minerais e ou compostos químicos que constituem o material particulado na atmosfera local.

#### *Área de estudo*

A área estudada está situada no centro da região conhecida como Polo Cerâmico de Santa Gertrudes (PCSG) na porção leste do estado de São Paulo (Fig. 1). Sua origem na segunda metade do século passado, e o seu acelerado crescimento atual, vincula-se à qualidade e quantidade das reservas de minério argiloso de composição ilítica presentes no subsolo regional [7], e ao método industrial designado como via seca utilizado na transformação do minério argiloso em peças cerâmicas e também à existência de uma mão de obra altamente especializada [8]. As mais de 32 indústrias que integram o PCSG fabricaram, apenas no ano de 2014, cerca de 600.000.000 m<sup>2</sup> de placas e revestimentos cerâmicos que foram equivalentes a mais de 62% da produção brasileira [9]. Formando um eficiente arranjo produtivo, as várias indústrias que compõem a cadeia produtiva ceramista, incluindo as mineradoras de argilas, na sua quase totalidade, concentram-se no entorno das cidades de Santa Gertrudes, Cordeirópolis e Rio Claro, onde o minério é aflorante. Apesar da importância econômica do PCSG para o desenvolvimento sócio econômico local e regional, as atividades nele desenvolvidas impactam o meio ambiente através da geração e propagação de poluentes entre as esferas climáticas, de consideráveis quantidades de resíduos sólidos, líquidos e gasosos [10]. Especificamente com relação ao tema em epígrafe, as fontes emissoras de poeiras para a atmosfera no PCSG, com base nas suas composições mineralógica e granulométrica, podem ser

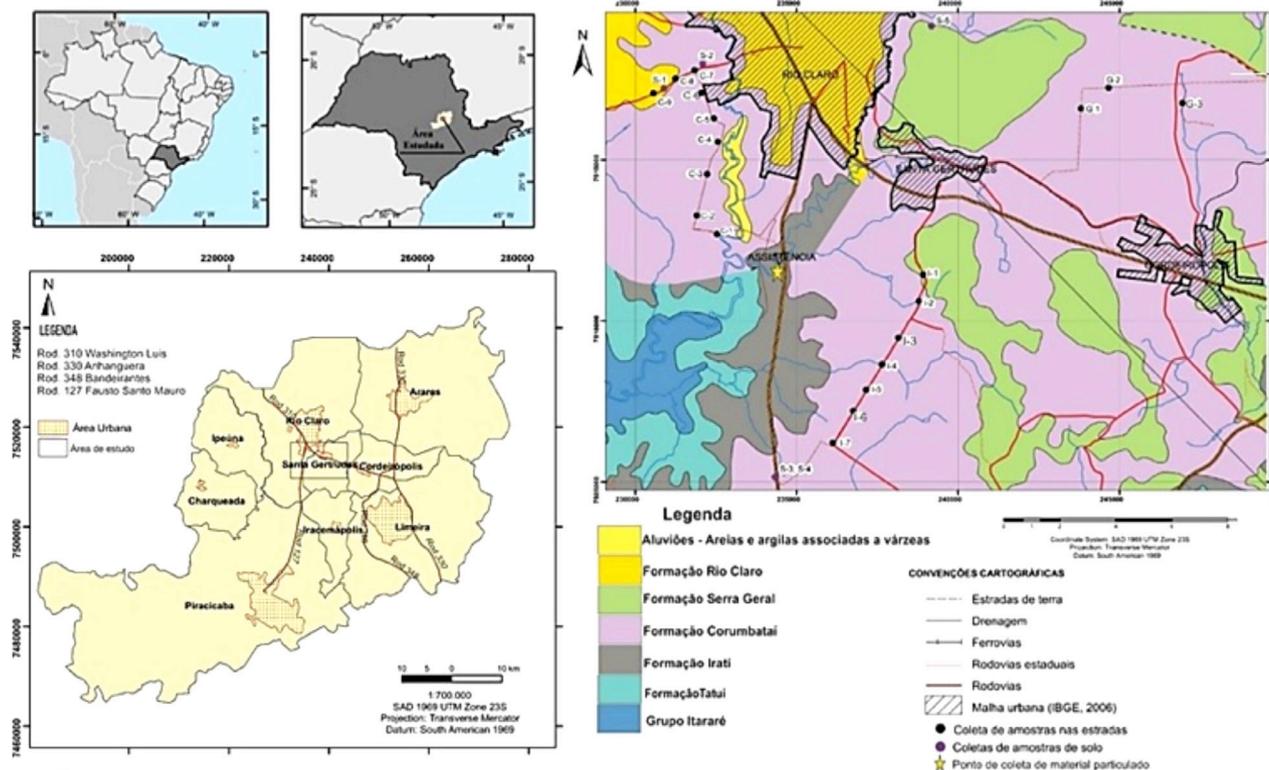


Figura 1: Mapa de localização do Polo Cerâmico de Santa Gertrudes mostrando os locais de coletas de amostra.

[Figure 1: Location map of Ceramic Cluster of Santa Gertrudes showing the sample collection sites.]

classificadas como “fontes litológica, pedológica, terrígena e industrial” [11].

As poeiras produzidas e transferidas para atmosfera a partir da fonte litológica ocorrem nos locais de lavra e áreas de tratamento do minério, que incluem os pátios de secagem nas áreas das minas e das indústrias e também no início da linha de produção de pisos no interior das fábricas. Nesse contexto, a geração de poeira está restrita às ações mecânicas de extração do minério, homogeneização, transporte e redução da umidade e granulometria nos pátios de secagens e britagem e moagem no início da linha de fabricação. Essa fonte (minério) apresenta-se em camadas rochosas pertencentes à Formação Corumbataí, que possui regionalmente espessura média da ordem de 100 m e mais de 100 km de extensão. A grande maioria das minas está posicionada na sua porção basal a intermediária, correspondendo a um pacote com espessuras variáveis entre 30 e 40 m. Esse conjunto litológico é formado por intercalações de camadas sedimentares de siltitos e argilitos e compõe uma reserva de classe mundial. A fonte emissora de poeiras designada como terrígena corresponde ao espaço ocupado pela malha viária utilizada para escoamento agropecuário e de minério. Nesse caso, a emissão de poeiras está restrita à cobertura dos leitos dessas estradas, que é formada pela mistura das variedades de solos da região com grandes quantidades de cacos cerâmicos queimados utilizados para pavimentá-las. O tráfego intenso de veículos nessas estradas provoca a cominuição e redução dos fragmentos cerâmicos para granulometrias de argilas e garante a formação de uma

mistura relativamente homogênea entre esses materiais, que passam a ter características mineralógicas e granulométricas híbridas relativamente à composição dos solos originais. O local onde a emissão de poeira ocorre provocada pelos processos de britagem, moagem e transporte do minério no interior das fábricas e antes de ser transformado em peça cerâmicas é designado como fonte industrial. Informações dos fabricantes dão conta que outros resíduos sólidos produzidos nessa fonte, tais como as raspas cerâmicas e a cal de filtro contendo fluorita, são reaproveitados tanto pelas indústrias ceramistas como por outras indústrias da região. Vale mencionar que autores como [12, 13] registraram outras emissões de material particulado como fluoreto e outros compostos, como enxofre, cloretos e dióxido de carbono e cloretos, que são liberadas pelo minério juntamente com os fluxos de gases das chaminés das fábricas para a atmosfera.

Por último, tem-se a fonte pedológica que ocupa a área de entorno dos ambientes já descritos. Ela é constituída pelos solos oriundos das formações geológicas subjacentes. Nesse sentido, são reconhecidos solos pertencentes à formação geológica Serra Geral de idade Cretácica (diabásio), à Formação Corumbataí de idade permiana (siltitos e argilitos) e Formação Rio Claro de idade terciária/quaternária (sedimentos arenosos recentes). Representa extensas áreas de plantio de cana de açúcar que transcendem os limites geográficos do PCSG. Nesse ambiente são produzidas grandes quantidades de poeiras durante as atividades realizadas para plantio, cultivo e colheita da cana de açúcar e outras atividades agropecuárias. A transferência

e concentração de poeiras na atmosfera realizadas a partir das fontes descritas dependem de vários fatores regionais e principalmente locais. As condições meteorológicas na região do PCSG são marcadas por longos períodos de calmarias que, atuando sobre um relevo aplainado [11], favorecem a concentração episódica de grandes quantidades de poeiras, fazendo com que os limites estabelecidos pelo Decreto Estadual 59.113 de 23/04/2013 sejam ultrapassados [11].

## MATERIAIS E MÉTODOS

Com vistas à caracterização da composição mineralógica e granulométrica dos materiais geológicos componentes das quatro fontes que transferem poeiras para a atmosfera, foram selecionadas três áreas próximas (Campo do Cocho, Fazenda Itaúna e estrada do Goiapá) no interior da área do PCSG (Fig. 1). Nelas foram coletadas, segundo as normas da Embrapa [14], 3 amostras de solos, 16 amostras da cobertura das estradas e 4 amostras de minérios, que foram submetidas para estudos de caracterização mineralógica através de difração de raios X e de difração a laser para os estudos granulométricos. Na preparação das amostras que foram analisadas, foram utilizados os procedimentos rotineiros recomendados por [15, 16]. Para as análises de difração de raios X, foi utilizado um difratômetro da PANalytical operando com tubo de Cu e filtro de Ni, configurado com potência de 40 kV, 30 mA e velocidade de varredura de 2 °/min durante a realização das análises. Os estudos granulométricos foram realizados após peneiramento das

amostras para separação das frações menores que 62 µm (correspondendo a silte argila). Nessas amostras, utilizou-se a técnica de espalhamento de raios laser de baixo ângulo (*low angle laser light scattering - LALL*). Foi utilizado um equipamento da Malvern MSS Mastersizer 2000 configurado para utilização com os parâmetros *pump speed* de 2400 rpm, *ultrasonic displacement* de 12:50 e *ultrasonic timer* de 00:30.

## RESULTADOS

Os estudos utilizando técnicas de difração de raios X permitiram caracterizar as assembleias de minerais presentes em cada fonte emissora de poeira. Para a caracterização petrográfica da fonte litológica foram utilizados resultados de [17], que permitiram quantificar e confirmar uma associação mineral constituída por illita (40% a 60%), quartzo (25% a 30%), feldspatos (15% a 25%) e menores quantidades de muscovitas, biotita, clorita, minerais opacos e, eventualmente, carbonatos, montmorillonita, caulinita e grãos detríticos de zircão, turmalina, rutilo, apatita e granada. A Fig. 2 composta por difratogramas típicos da fração argila/silte muito fina para cada uma das fontes de poeira (exceção da fonte industrial) mostra as principais associações minerais. Complementarmente, a Tabela I destaca os elementos químicos mais comuns formadores desses minerais e que durante os processos de alterações em superfície são disponibilizados para os demais componentes do Geossistema do Clima.

Com relação à sua distribuição granulométrica,

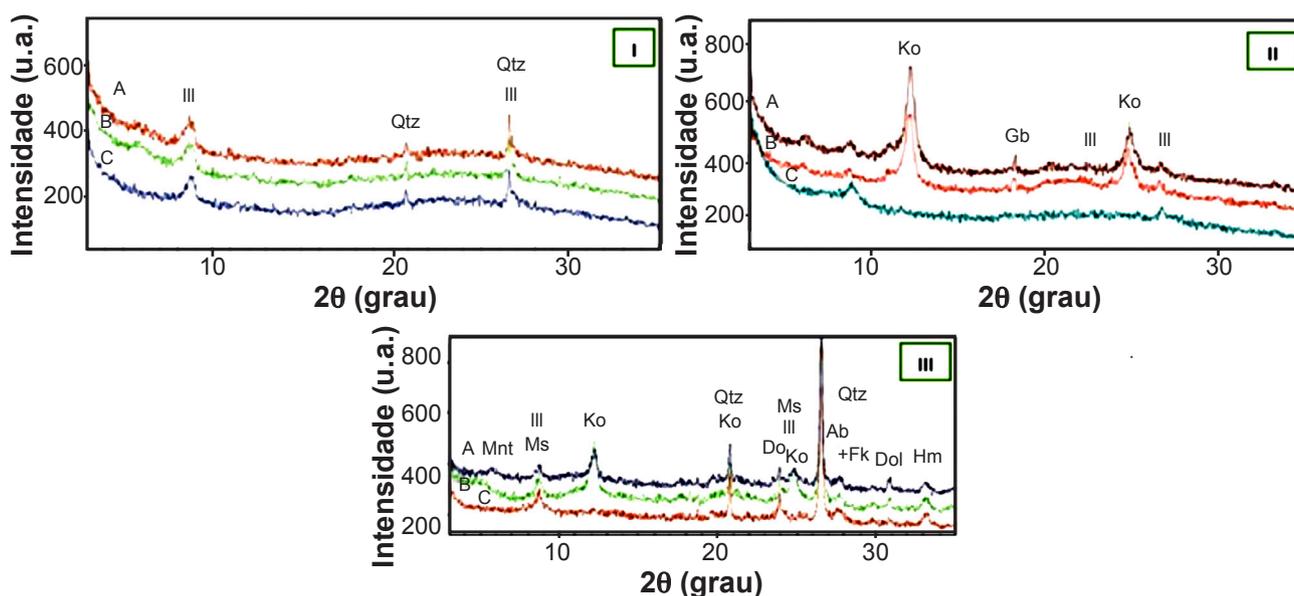


Figura 2: Difratogramas de raios X mostrando os minerais mais representativos das fontes emissoras de poeiras minerais no PCSG: I) fonte litológica; II) fonte pedológica; III) fonte terrígena. Amostra: A - natural; B - glicolada; C - aquecida a 500 °C por 2 h. III - illita, Qtz - quartzo, Ko - caulinita, Gb - gibbsita, Mnt - montmorillonita, Ms - muscovita, Dol - dolomita, Ab - albita, e Ab + Fk - albita + feldspato potássico.

[Figure 2: X-ray diffraction patterns showing the most representative minerals from emission sources of mineral dust in PCSG: I) lithological source; II) pedological source; III) terrigenous source. Sample: A - natural; B - glicolated; C - heated at 500 °C for 2 h. III - illite, Qtz - quartz, Ko - kaolinite, Gb - gibbsite, Mnt - montmorillonite, Ms - muscovite, Dol - dolomite, Ab - albite, and Ab + Fk - albite + K-feldspar.]

Tabela I - Associações mineralógicas identificadas nas fontes litológica, pedológica, terrígena e industrial.  
 [Table I - Mineralogical associations identified in the lithological, pedological, terrigenous and industrial sources.]

Mineral	Albita	Dolomita	Clorita	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Illita	Muscovita	Quartzo	Magnetita	Montmorillonita
Fórmula química	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	$(\text{Mg,Fe}^{2+})_2\text{Al}(\text{Si}_2\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	$\text{Al}(\text{OH})_3$	$\text{Fe}^{2+}\text{O}(\text{OH})$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$(\text{K,H}_2\text{O})(\text{Al,Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,\text{H}_2\text{O}]$	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH,F})_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$	$(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2,n}(\text{H}_2\text{O})$
Pedológica - Solos		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Litológica - Minério	X		X	X		X	X	X		X		
Terrígena - Estradas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X

Tabela II - Principais classes granulométricas nas frações silte/argila das fontes litológica, pedológica, terrígena e industrial.  
 [Table II - Particle size fractions in the silt/clay from lithological, pedological, terrigenous and industrial sources.]

Amostra	Silte argila (%)	10<Ø<62 µm (%) Fração inalável	2,5<Ø<10 µm (%) Fração respirável	0<Ø<2,5 µm (%)
Litológica - Minério	MD1	65,94	16,73	34,05
	MD2	65,56	15,84	34,44
Pedológica - Solos	SR	25,38	6,37	11,79
	SC	86,95	39,82	25,88
	SB	58,17	16,72	20,33
	C-1	21,16	7,84	8,29
	C-2	15,12	4,69	5,60
	C-3	13,42	5,20	5,12
	C-4	35,57	14,13	12,16
	C-5	22,59	7,43	9,34
Terrígena - Estradas	C-6	6,71	1,99	2,57
	F-1	21,23	4,99	8,33
	F-2	17,70	6,09	6,91
	F-3	29,92	9,89	17,13
	F-4	15,65	4,79	5,95
	G1	27,44	9,73	9,98
	G2	73,94	22,56	30,24

Legenda: MD1 e MD2 - minérios de pátios de secagem; SR - solo da Formação Rio Claro; SC - solo da Formação Corumbataí; SB - solo basáltico da Formação Serra Geral; C (1 a 6) - estradas do Campo do Cocho; F (1 a 4) - estrada da Fazenda Itaúna; G (1 e 2) - estrada do Goiapá.

observou-se que durante os processos de britagem industrial, cisalhamento pela passagem de veículos ou, ainda, durante a formação natural de solos são produzidas diversas frações granulométricas finas que totalizam mais de 65% do volume total do material coletado. Vale destacar que a fração respirável (2,5<Ø<10 µm, Tabela II) é a mais abundante (acima de 50%) e, portanto, mais facilmente transportada e concentrada na atmosfera, conforme pode ser verificado na Tabela II.

A Fig. 2.I representativa dos minérios utilizados pelas indústrias cerâmicas do Polo de Santa Gertrudes, que utilizam o processo via seca, demonstra que o mesmo é

composto basicamente por illita e quartzo. Já as fontes pedológicas, como mostra o difratograma de referência da Fig. 2.II, possuem como constituinte predominante a caulinita. Constatou-se que os solos originados pela Formação Rio Claro se caracterizam por apresentarem uma associação de minerais com amplo predomínio de quartzo, seguido por caulinita e menores quantidades de gibbsita, hematita, goethita e magnetita (Tabela I). Os solos formados pelas rochas basálticas da Formação Serra Geral diferenciam-se mineralogicamente dos demais solos pela presença de maiores quantidades de magnetita, hematita e pouco quartzo. Nesses solos os argilominerais formados

são dominados por caulinita e gibbsita, sendo rara a presença de illita. Os solos da Formação Corumbataí são compostos basicamente por caulinita e quartzo, podendo ter gibbsita nos mais evoluídos e montmorillonita e illita nos menos evoluídos. Os difratogramas de referência (Fig. 2.II) apresentam picos bem marcados de caulinita que é o mineral dominante na fração analisada, seguido por illita, montmorillonita/interestratificado e gibbsita. Aparecem ainda goethita, hematita e magnetita (Tabela I). As frações granulométricas observadas nesses solos com destaque para a fração respirável variaram de 11,79% a 25,88%. Na Tabela II verifica-se que os solos das Formações Rio Claro e Serra Geral são os que apresentam menores quantidades de frações finas. A Formação Rio Claro por ocupar localmente uma área muito maior do que a ocupada pelos solos derivados de basaltos, em termos volumétricos, é mais importante na disponibilização de MP10 para a atmosfera. Os solos da Formação Corumbataí são os que apresentam maior volume de finos (Tabela II) potencialmente disponíveis para serem transferidos através dos ventos para a atmosfera.

Na fonte industrial as principais emissões de poeiras para a atmosfera são decorrentes de atividades de reduções granulométricas e umidificação do minério, cuja contribuição química e mineralógica é a mesma da fonte litológica já discutida (Fig. 2.I). A fonte terrígena é constituída por misturas de solos locais com rejeitos das minas e cacos de pisos cerâmicos oriundos da fonte industrial, utilizados para cascalhar as estradas. Este material mostrou ser constituído por quartzo, caulinita, illita, montmorillonita/interestratificados, feldspatos (albita, microclínio/ortoclásio), dolomita e hematita (Fig. 2.III). Análise microscópica desse material possibilitou reconhecer também material vítreo proveniente dos cacos cerâmicos, magnetita, ilmenita e hidróxidos de ferro (goethita e limonita). Os estudos granulométricos realizados nesta fonte revelaram que as misturas entre cacos de pisos cerâmicos com solos das formações geológicas subjacentes geram uma mistura homogênea caracterizada por diversas classes granulométricas. A fração inalável ( $10 < \phi < 62 \mu\text{m}$ , Tabela II), considerada como mais importante, varia entre 1,99% até 22,56% (Tabela II). Como mencionado, essa fonte apesar de ocupar uma área subordinada relativamente às demais fontes produz grandes quantidades de poeiras.

## DISCUSSÃO

Em que pese o reduzido número de amostras utilizado na caracterização mineralógica e granulométrica das fontes de MP10 no PCSG, os resultados obtidos são compatíveis com os estudos geoquímicos e de microscopia eletrônica já realizados por [11] e em andamento para esses mesmos materiais, e permitem concluir que: a emissão de poeiras minerais que afeta a qualidade do ar na região do PCSG origina-se a partir de quatro fontes principais. A fonte pedológica (solos) é a que ocupa maior área geográfica e onde se desenvolvem as atividades agrícolas e de pecuária. Os estudos granulométricos mostraram que esses solos

originados a partir das Formações Corumbataí, Serra Geral e Rio Claro são os que apresentam maiores quantidades de materiais inaláveis disponíveis para ascenderem para a atmosfera. Essa tendência é confirmada por [11], que demonstrou que a caulinita é o argilomineral mais abundante nesses solos e também na atmosfera durante todo o ano. Cabe destacar que as menores granulometrias da fração argila foram observadas nos solos resultantes da Formação Rio Claro. A fonte terrígena (estradas) ocupa lugar de destaque como ambiente emissor de poeiras. Independentemente da sua pequena área de ocorrência e do seu conteúdo em frações granulométricas inaláveis ( $10 < \phi < 62 \mu\text{m}$ , Tabela II), sua produção está relacionada com a intensidade de transporte do minério de argila que utiliza mais de 1400 viagens de caminhões/dia. É composta por uma mistura entre solos, rochas e cacos cerâmicos; esse ambiente não possui uma assembleia mineralógica discriminante. Todavia, apresenta material vítreo (formas não cristalinas) e material utilizado no acabamento final (esmaltação) contendo altos teores de Zr, Zn e/ou outros elementos químicos de baixas concentrações naturais, que podem constituir assinaturas discriminantes [11]. A fonte litológica (minério) aparenta constituir o terceiro maior produtor de poeira, em que pese sua potencialidade na geração de materiais inaláveis com as operações de lavra a céu aberto e desagregação mecânica nos pátios de secagem. Esta fonte possui como discriminante o amplo predomínio do mineral illita seguido por montmorillonita e albita. A sugestão de ser a terceira maior produtora de poeira inalável baseia-se em dados obtidos por [11], que constatou através de amostragem contínua durante um ano, em estação localizada no distrito de Assistência, área vizinha a várias minas e pátios de secagem, que a fase mineral predominante na fração inalável é a caulinita. A emissão de argila íltica na fonte industrial, apesar de ser complementar à produção de poeira da fonte litológica, é pequena e pouco representativa no volume total, em função dos filtros de manga utilizados.

Mineralogicamente as 4 fontes emissoras de poeiras são compostas, em ordem de abundância, por uma assembleia de minerais de composição silicatada, aluminosa e ferruginosa, representados em ordem de abundância por argilas (caulinita, illita, montmorillonita, interestratificados regulares e irregulares), quartzo, feldspatos e clorita. Subordinadamente ocorrem minerais não silicáticos, a exemplo de hematita, gibbsita, magnetita, ilmenita, goethita e rutilo, e outros silicatos, como detríticas (muscovita e biotita), zeólitas e piroxênio. Essa mineralogia é responsável pelos altos teores de silício, alumínio e ferro observados na composição química dessas fontes que, de um modo geral, fornecem altos teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e óxidos alcalinos, entre outros compostos, para a atmosfera do PCSG (Fig. 3). Da mesma forma, análises químicas de MP10 de materiais coletados na atmosfera do PCSG [11] (Fig. 4) também revelaram altos teores desses elementos (à exceção de sílica que não foi dosada), confirmando a contribuição das fontes de poeira mencionadas. A concentração máxima de poeiras na atmosfera do PCSG é observada quando períodos com baixa umidade do ar estão associados com a realização de

atividades agrícolas e de transporte de minério das minas para as fábricas.

As análises granulométricas mostram que os solos possuem maior quantidade de finos em relação os litotipos de origem, e o minério argiloso possui quantidade de finos maior que dos solos desenvolvidos sobre as outras unidades que afloram na região. Entre os solos, o que possui a fração fina maior é da Formação Corumbataí e a menor é o desenvolvido sobre a Formação Rio Claro. Todavia, os argilominerais dos solos da Formação Rio Claro atingem granulação mais fina, aspecto importante para o material ficar mais tempo em suspensão na atmosfera. Outro aspecto a ser considerado é que a caulinita é menos densa que a illita e no caso da caulinita dos solos da Formação Rio Claro, além de ter constituinte com granulação menor, tem menos impregnação de óxidos e hidróxidos de ferro que os

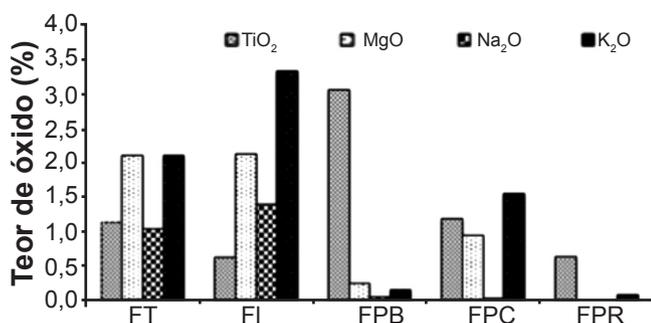


Figura 3: Histograma de variação dos teores (% em massa) dos principais óxidos (média) nas fontes de poeiras do PCSG: FT - fonte terrígena; FL - fonte litológica; FPB - fonte pedológica (solo basáltico); FPC - fonte pedológica (solo da Formação Corumbataí); FPR - fonte pedológica (solo da Formação Rio Claro).

[Figure 3: Histogram of content variation (wt%) of the major oxides (average) at the dust sources of PCSG: FT - terrigenous source; FL - lithological source; FPB - pedological source (basaltic soil); FPC - pedological source (soil of Corumbataí Formation); FPR - pedological source (soil of Rio Claro Formation).]

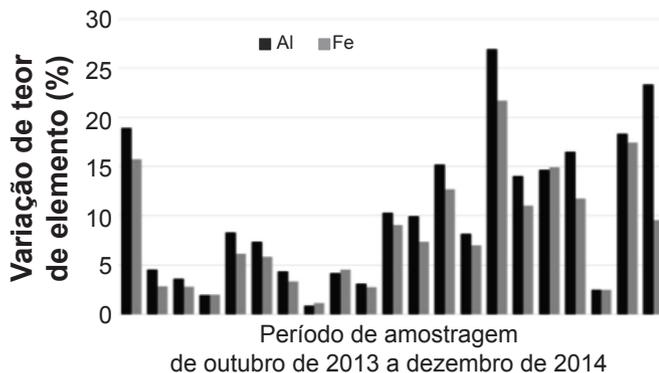


Figura 4: Histograma de variação dos teores de ferro e alumínio (porcentagem em massa) registrada no período de outubro de 2013 a dezembro de 2014 na atmosfera do PCSG [11].

[Figure 4: Histogram of content variation of iron and aluminum (wt%) recorded from October 2013 to December 2014 in the atmosphere of PCSG [11].]

argilominerais dos outros solos e do minério.

## CONCLUSÕES

A constituição mineralógica das quatro principais fontes emissoras de poeira para a atmosfera na região do Polo de Santa Gertrudes mostrou que a fonte a pedológica (solos) é caracterizada pelo amplo predomínio de caulinita, com ou sem gibbsita, enquanto que a litológica (minério) é caracterizada pelo predomínio de illita e quantidades menores de montmorillonita/interestratificados, albita e clorita, configurando assinaturas mineralógicas distintas. A fonte denominada de terrígena (estrada) por ser uma mistura de solo, minério e cacos cerâmicos apenas pode ser discriminada pela quantificação de alguns elementos químicos em concentrações anormais, não comuns às outras fontes, e de uma fase vítrea oriunda dos cacos cerâmicos. A fonte industrial possui assinatura idêntica à litológica e mostra ter participação secundária no processo em função do controle industrial. Desse modo, a presença de illita na constituição dos particulados inaláveis presentes na atmosfera pode ser atribuída, direta ou indiretamente, à atividade da indústria cerâmica, enquanto que a presença de caulinita pode ser atribuída a processos de ressuspensão nos solos e nas estradas. A análise granulométrica é coerente com o esperado, mostrando que os solos possuem maior potencialidade de gerar finos em suspensão para a atmosfera. Também mostra que os solos oriundos da Formação Rio Claro apresentam a menor fração argila, todavia esta fração possui as menores dimensões. As análises de difração de raios X na fração argila mostram que além dos argilominerais estão presentes quartzo, feldspatos (especialmente no minério e nos cacos), óxidos e hidróxidos de ferro, gibbsita e carbonato. Os resultados obtidos evidenciam que é possível qualificar e até mesmo estimar a contribuição de cada fonte de emissão de material particulado para a atmosfera, com base em análises mineralógicas em associação com análises químicas, envolvendo os elementos majoritários e minoritários, das poeiras presentes nas atmosferas. Todavia a acurácia da quantificação depende de maior densidade de dados mineralógicos e químicos referentes às fontes.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido a esta pesquisa na forma de bolsa. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, proc. n° 304535/2011-7), por custear parte das análises e ao Departamento de Petrologia e Metalogenia da Unesp de Rio Claro pelo suporte laboratorial.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. Abramovay, Estudos avançados **26**, 74 (2012) 21.
- [2] J. Grotzinger, T. Jordam, *Para Entender a Terra*, 6ª Ed., Editora Bookman, Porto Alegre (2013) 738.

- [3] J.H. Seinfeld, N.S. Pandis, USA: Wiley - Interscience Publication, Society of America **25** (2006) 655.
- [4] Millennium ecosystems. *Assessment, Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island. Press, Washington, DC. (2005). Disponível em: <http://www.maweb.org/documents/document.356.aspx.pdf>. Acesso em: 20 dez. (2013).
- [5] N.M. Mahowald, S. Albani, J.F. Kok, S. Engelstaeder, R. Scanza, D.S. Ward, M.G. Flanner, *Aeolian Res.* **15** (2014) 53.
- [6] J.F. Kok, S. Albani, N.M. Mahowald, D.S. Ward, *Atmos. Chem. Phys.* **14**, 13 (2014) 043.
- [7] M. Cabral Júnior, L.C. Tanno, *Cerâm. Ind.* **18**, 2 (2013) 10.
- [8] M.M.T.M. Lima, “Característica da poeira do processo de fabricação de materiais cerâmicos para revestimento: estudo no Pólo Cerâmico de Santa Gertrudes”, Diss. Mestrado, Faculdade de Engenharia - UNICAP (2007) 147p.
- [9] Associação Paulista das Cerâmicas para Revestimento (ASPACER), Estatísticas. Disponível em: <http://www.aspacer.com.br/estatisticas.html> Acesso em: 03 mar. (2015).
- [10] E.F.U. Carvalho, “Desenvolvimento de um adsorvedor inorgânico sólido para reduzir a emissão de fluoreto da indústria cerâmica de fluoreto”, Tese Dr. em Tecnologia Nuclear, IPEN/USP (2004).
- [11] M. Oliveira, “Caracterização mineralógica e química das fontes de poeira e sua influência na atmosfera da região do Polo Cerâmico de Santa Gertrudes (SP)”, Tese Dr., Instituto de Geociência e Ciências Exatas - UNESP Rio Claro (2015).
- [12] E.F.U. Carvalho, H.G. Riella, J. Fiori Júnior, “Tratamento das emissões Gasosas com Fluoreto das Indústrias Cerâmicas via Adsorvedor Inorgânico Sólido”, 17 CBECIMAT- Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu - PR (2006).
- [13] K.R. Ferrari, P.M. Figueiredo Filho, C. Roveri, S.G. Carvalho, “Determinação das Emissões de Fluoreto Durante a Queima de Amostras de Massas Cerâmicas”, *Cerâm. Ind.* **8**, 5-6 (2003).
- [14] D.B. Alves, *Boletim de Geociências da PETROBRAS* **1**, 2 (1987) 157p.
- [15] F. dos S. Antunes, W.O. Barreto, “Contribuição ao estudo químico e mineralógico das frações silte e argila de latossolos desenvolvidos de rochas básicas do Sul de Mato Grosso”, Rio de Janeiro: IME (1982). 13p. Disponível em [www.cnps.embrapa.br](http://www.cnps.embrapa.br). Acesso em 10 jan. (2013).
- [16] K. Suguio, *Introdução à sedimentologia*, Ed. da Universidade de S. Paulo, S. Paulo (1973) 312p.
- [17] A. Zanardo, “A pesquisa geológica e de matérias primas cerâmicas do centro nordeste do estado de S. Paulo e vizinhanças”, Tese (livre docência), Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Rio Claro (2003) 283p. (*Rec.* 27/08/2015, *Rev.* 08/12/2015, 15/01/2016, *Ac.* 15/01/2016)