

1743423

IFUSP/P-136

Poluição do ar, subdesenvolvimento  
e pesquisa

Celso M. Q. Orsini  
Instituto de Física da  
Universidade de São Paulo

I.F. - USP

JANEIRO/78

# POLUIÇÃO DO AR, SUBDESENVOLVIMENTO E PESQUISA (\*)

Celso M. Q. Orsini

Instituto de Física da Universidade de São Paulo

## RESUMO

Estará o nosso problema da poluição do ar sendo corretamente equacionado?

Há fortes indícios de que está havendo uma excessiva valorização do enfoque tecnocrata do problema, com prejuízos ao desenvolvimento das pesquisas científicas, principalmente no âmbito das universidades. Tal situação inibe a geração de atividade educacional no assunto em nível compatível com as nossas necessidades. Uma das consequências desse estado de coisas é a permanência, a longo prazo, da nossa dependência tecnológica no combate as poluições ambientais.

Algumas experiências do Grupo de Estudos de Poluição do Ar do IFUSP são descritas para ilustrar o relacionamento entre o nosso problema da poluição do ar e as pesquisas científicas.

---

(\*) Trabalho parcialmente baseado em tese apresentada pelo autor em concurso de Livre-Docência no IFUSP<sup>(1)</sup>. Parcialmente suportado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP.

## ABSTRACT

Is our air pollution problem being correctly equated ?

It seems that there is an excessive emphasis to the technocratic point of view of the question, to the detriment of the scientific researches, mainly in the universities. This situation prevents the development of educational activities on the matter, in levels according to our needs.

One of the consequences of those conditions is the long-term permanency of our technological dependency, concerning the combat to the environmental pollution.

Some of the experiments of the Group of Air Pollution Studies, at the IFUSP, are described, to illustrate the relations between our air pollution problems and the scientific researches.

## 1) UMA QUESTÃO IMPORTANTE

Seguidamente nos indagam (e nós mesmos também nos perguntamos) quais são as nossas chances de vencermos, em prazo razoável, a nossa luta contra a poluição do ar; ou colocando a questão de outra forma: será que o problema está sendo corretamente equacionado pelos encarregados de sua solução ?

Muita gente pensou, há cerca de uma década atrás, que esse problema seria facilmente solucionado; hoje, muitos chegam até a descreer da possibilidade de se encontrar uma solução satisfatória. De qualquer forma, uma solução satisfatória tem de ser persistentemente perseguida, através de etapas sucessivas e lentas, que no seu conjunto envolvem importantes mudanças de hábitos da vida da nossa comunidade.

Se essa meta está sendo percorrida pelos caminhos mais convenientes é o que procuramos examinar em seguida, calcados na experiência que adquirimos nos últimos anos, através da nossa participação nas atividades do Grupo de Estudos de Poluição do Ar (GEPA) do Instituto de Física da USP.

## 2) CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FÍSICA DA POLUIÇÃO DO AR

É notável a crescente preocupação, nos países desenvolvidos, com as chamadas Ciências Ambientais, uma espécie de incorporação das disciplinas que tratam separadamente de problemas específicos do meio ambiente, procurando interligá-las, tendo em vista a solução dos problemas decorrentes da crise ambiental.

Não há dúvida de que esse crescente prestígio dessas ciências nos último anos decorre da também crescente e generaliza-

da preocupação com os efeitos deletérios das poluições na qualidade do meio ambiente e, por essa via, na qualidade de nossas próprias vidas. É óbvio que esses efeitos já produzem diversas alterações sensíveis nas qualidades do meio ambiente natural.

Por outro lado, não há dúvida também, de que as causas antropogênicas desses efeitos indesejados residem, ao menos em grande parte, no consumo crescente da energia pelo homem, com a finalidade (oposta) de melhorar suas condições de vida.

Tudo parece indicar porém que vamos chegando ao ponto limite, e irônico, em que os benefícios gerados pelo aumento do consumo de energia anulam-se pela ação dos seus efeitos deletérios. Em outras palavras, essas duas componentes da ação do homem, consumir energia e poluir o meio ambiente, contrapõem-se, podendo redundar em resultado positivo, nulo ou negativo.

Muitos têm esperança de que a ciência-tecnológica venha a superar essa disputa, por meio da descoberta de uma fórmula mágica, capaz de deslocar a atual tendência desfavorável de equilíbrio novamente para o lado positivo. Vale dizer, esperam que seja encontrada a maneira de consumir sem poluir, seria, portanto, o "consumo limpo"!

Mas, à ciência-tecnologia, que via de regra não baseia a sua ação em fórmulas mágicas, parece restar apenas a missão de encontrar a situação de compromisso ideal entre as duas componentes em jogo; otimizar as duas tendências em oposição, ou seja, procurar o ponto de equilíbrio mais favorável possível (ou, talvez, menos desfavorável possível!).

É dentro desse quadro, segundo nos parece, que se situam os objetivos das ciências ambientais: compreender ou descobrir as regras da interação entre os resultados do consumo de ener-

gia e o comportamento do meio ambiente, entendendo, para isso, os mecanismos das alterações antropogênicas das propriedades do meio ambiente, e, então, encontrar a melhor forma de evitar ou corrigir as distorções verificadas.

De maneira análoga, a Física da Poluição do Ar, que constitui exemplo típico de capítulo das Ciências Ambientais, não visa propriamente a descoberta de fenômenos novos (que por certo não ocorrem em virtude da poluição do ar) mas, simplesmente estudar as alterações que as poluições introduzem nos pesos com que os diretos processos normalmente intervem no comportamento da atmosfera e as suas consequências.

### 3) CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR E PESQUISA CIENTÍFICA

A estratégia de ação de qualquer sistema de controle de poluição ambiental apoia-se em tecnologia e modelos gerados por pesquisas científicas geralmente realizadas no âmbito das Ciências Ambientais. Infelizmente, no nosso caso específico (aliás, bem típico de países subdesenvolvidos em rápido desenvolvimento industrial via tecnologia importada) a qualidade e a quantidade das pesquisas em andamento não tem condições de proporcionar, a curto prazo, as bases necessárias a esse apoio.

Mas, por outro lado, parece haver um consenso nos círculos científico-tecnológicos em considerar que os nossos problemas de poluições ambientais não poderão ser devidamente resolvidos apenas e tão somente com a importação de "pacotes fechados" tecnológicos que, como bem sabemos, independem totalmente de pesquisas científicas locais, que visem determinar ou estudar propriedades do nosso meio ambiente.

Há, é certo, tendências de muitos de nossos tecnocratas em

sentido oposto, porque consideram o fato, de resto óbvio, de que a tecnologia nacional (pitoresca e sugestivamente por eles alcunhada de tecnologia de redescoberta da roda) não tem, e nem terá a curto prazo, condições de resolver problemas da magnitude dos nossos problemas de poluições ambientais.

Contudo, o argumento mais importante em favor do desenvolvimento das pesquisas científicas sobre o meio ambiente, principalmente no âmbito das universidades, está no fato de que essas pesquisas se constituem em poderosos geradores da atividade educacional no assunto. Nos países subdesenvolvidos, que geralmente não dispõem de infra-estruturas convenientes ao combate das poluições, essa atividade educacional constitui, sem dúvidas, a componente mais importante do problema.

Dentro desse enfoque da nossa situação ambiental foi criado o GEPA do IFUSP. Sob os seus auspícios vem sendo oferecido, anualmente, um curso de Física da Poluição do Ar, ao nível de graduação, e que se pretende estender ao nível de pós-graduação no ano corrente, e têm sido desenvolvidas as experiências sobre Aerossóis atmosféricos que relatamos em seguida.

#### 4. OS AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS

Aos sistemas físico-químicos constituídos por matéria particulada (sólida ou líquida) em suspensão no ar denominam-se aerossóis atmosféricos (abreviadamente AA).

Os particulados penetram na atmosfera (natural ou antropogenicamente) por meio das seguintes vias: (i) processos mecânicos, tipo pulverização - dispersão de materiais sólidos ou líquidos (exemplos típicos: poeira levantada pelos ventos,

gotículas produzidas pela arrebentação das ondas do mar, poeiras produzidas por fábricas de cimentos, construção de estradas, etc); (ii) processos de combustão, seguidos de condensação e coagulação (exemplo típico é o caso do gás poluente  $\text{SO}_2$ , produzido na combustão dos combustíveis fósseis (carvão e petróleo) que, através de complicada química da atmosfera na sua maior parte sofre a conversão gás-particulado passando para a forma de sulfatos-particulados); (iii) processos de decomposição (naturais) que, seguem a mesma linha descrita no item anterior (um exemplo interessante é o do gás  $\text{H}_2\text{S}$ , formado na decomposição de matéria orgânica, que na atmosfera sofre oxidação para  $\text{SO}_2$  caindo, portanto, no exemplo anterior).

Os particulados colocados na atmosfera pelos processos mencionados tem "tamanhos" diferentes, que vão desde  $10^{-4}$   $\mu\text{m}$  a  $10^2$   $\mu\text{m}$ , e nela permanecem de horas a semanas ou meses (sofrendo alterações, é claro) até a sua remoção final pela chuva (processos de nucleação e lavagem) ou pela sedimentação ou ainda por impacto com obstáculos diversos.

Como todo o sistema físico-químico os AA têm de ser caracterizados pelas suas propriedades que uma vez conhecidas vão permitir a determinação do seu papel tanto na atmosfera como no problema da poluição do ar. É interessante notar, porém, que cada AA constitui um sistema específico, com as suas características próprias que o diferencia dos demais (algo análogo aos átomos dos diferentes elementos que embora sendo sistemas de mesma natureza guardam diferenças entre si). Assim, por exemplo, o AA de São Paulo deve ter características pronunciadamente diferentes do AA do Rio de Janeiro.

Dentre as várias propriedades físicas e químicas dos AA, duas destacam-se pelo seu papel predominante: as suas "Distri-



buições de Tamanhos", respectivamente, da concentração (nº por unidade de volume) e da composição química dos particulados.

Sem entrar em muitos detalhes técnicos sobre essas distribuições, mas apenas para aquilatar das suas importâncias no problema da poluição do ar, basta mencionar dois exemplos dos seus efeitos: o primeiro, relacionado com a saúde humana, refere-se ao problema da retenção pelo nosso aparelho respiratório dos particulados que obrigatoriamente inspiramos com o ar; experiências sobre inalações humanas de aerossóis com distribuições de tamanho conhecidas e controladas permitem determinar as frações de particulados depositados no sistema respiratório humano. Essas frações variam de indivíduo para indivíduo devido às diferenças nas geometrias dos aparelhos respiratórios e nos padrões de fluxos de ar que se estabelecem; mas, curvas típicas são mostradas na figura 1, para o caso de particulados esféricos de uma determinada densidade.

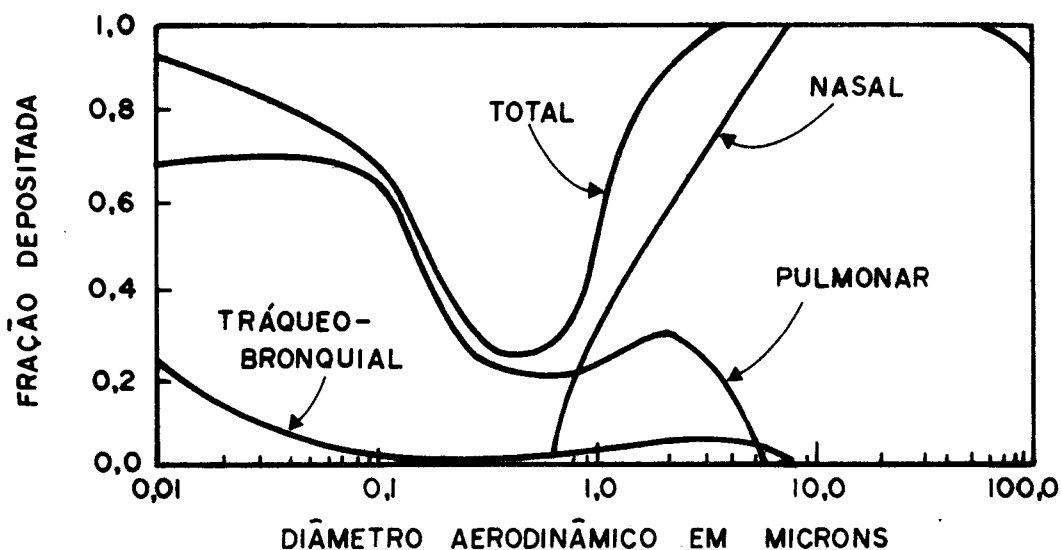


FIGURA 1. EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE PARTICULADOS NO APARELHO RESPIRATÓRIO DO HOMEM.

A figura 1 fornece apenas as eficiências de retenção de particulados das várias partes do nosso aparelho respiratório, mas os efeitos desses particulados nos tecidos onde são retidos dependem sobretudo, das suas composições químicas e concentrações.

O segundo exemplo diz respeito ao efeito dos particulados na visibilidade através da atmosfera. Sabe-se que os particulados suspensos no ar funcionam como centros espalhadores e absorvedores da radiação luminosa, com eficiência dependente dos seus tamanhos; a faixa mais eficiente para espalhamento é a entre  $0,1\mu\text{m}$  e  $1\mu\text{m}$ , enquanto que a absorção depende da composição química. Geralmente, o espalhamento da luz pelos particulados é o principal responsável pela diminuição da visibilidade atmosférica (esse, aliás, é um fenômeno bem notório na atmosfera de São Paulo).

##### 5) AS EXPERIÊNCIAS SOBRE AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS NO GEPA

Em trabalhos anteriores<sup>(1,2)</sup> descrevemos o "Projeto PIXE-SP" destinado a investigações sobre AA principalmente na região de São Paulo.

Duas amostragens foram realizadas em 1976 e suas amostras foram analisadas para determinação das massas elementares, pelo método PIXE (Particle Induced X-ray Emission) nos E.U.A.<sup>(\*)</sup>. As amostras procedentes de uma terceira amostragem, realizada em 1977 com equipamento totalmente nacional, estão ainda sendo analisadas, pelo mesmo método PIXE no acelerador Pelletron do IFUSP (na verdade essas amostras estão sendo usadas como ele-

---

(\*) A primeira experiência foi patrocinada pelo GEPA em colaboração com a FSU - EUA, enquanto que a segunda, ao contrário, foi patrocinada pela FSU em colaboração com o GEPA.

mentos auxiliares na implantação do método analítico, isto é, em calibração, ajustes do equipamento, etc).

As amostragens de 1976 foram realizadas a primeira com 3 Amostradores de Filtro Sequencial (AFS) e 1 Impactador em Cascata de 5 estágios (IC), e a segunda com vários (até 6) IC de 5 estágios.

Os IC são instrumentos que diferenciam os particulados amostrados nos seus tamanhos, enquanto que os integram no tempo. Os AFS, ao contrário, diferenciam no tempo, mas integram no tamanho. Ambos os instrumentos coletam a matéria particulada do ar que os atravessa numa vazão de cerca de 1 l/min.

Pelo PIXE determinou-se as massas dos elementos (com  $Z > 13$ ) contidos nas amostras; no caso das amostras de IC, esses resultados, divididos pelos volumes respectivos de ar amostrados, forneceram os valores das concentrações das massas contidas na matéria particulada desse ar para os seguintes elementos: Si, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br e Pb.

O conhecimento adicional dos tamanhos desses particulados permitiu-nos determinar as distribuições de tamanho das concentrações desses elementos.

Com os dados dos AFS obtivemos histogramas das variações das massas dos elementos com o tempo.

## 6. ALGUNS RESULTADOS

Não é nosso objetivo apresentar neste trabalho os resultados das experiências do GEPA o que, aliás, já vem sendo feito em várias publicações<sup>(1,2 e 3)</sup>, mas apenas mostrar e discutir alguns desses resultados a título de exemplo em apoio de nossas discussões sobre as relações entre pesquisas científicas e

o problema do controle da poluição do ar.

Com esse fim, apresentamos na figura 2 os padrões médios das distribuições de tamanho das concentrações das massas dos elementos S, Cl, Br e Pb, obtidas dos dados dos IC, e na figura 3 os histogramas do Pb e Br, obtidos por meio de um dos AFS.

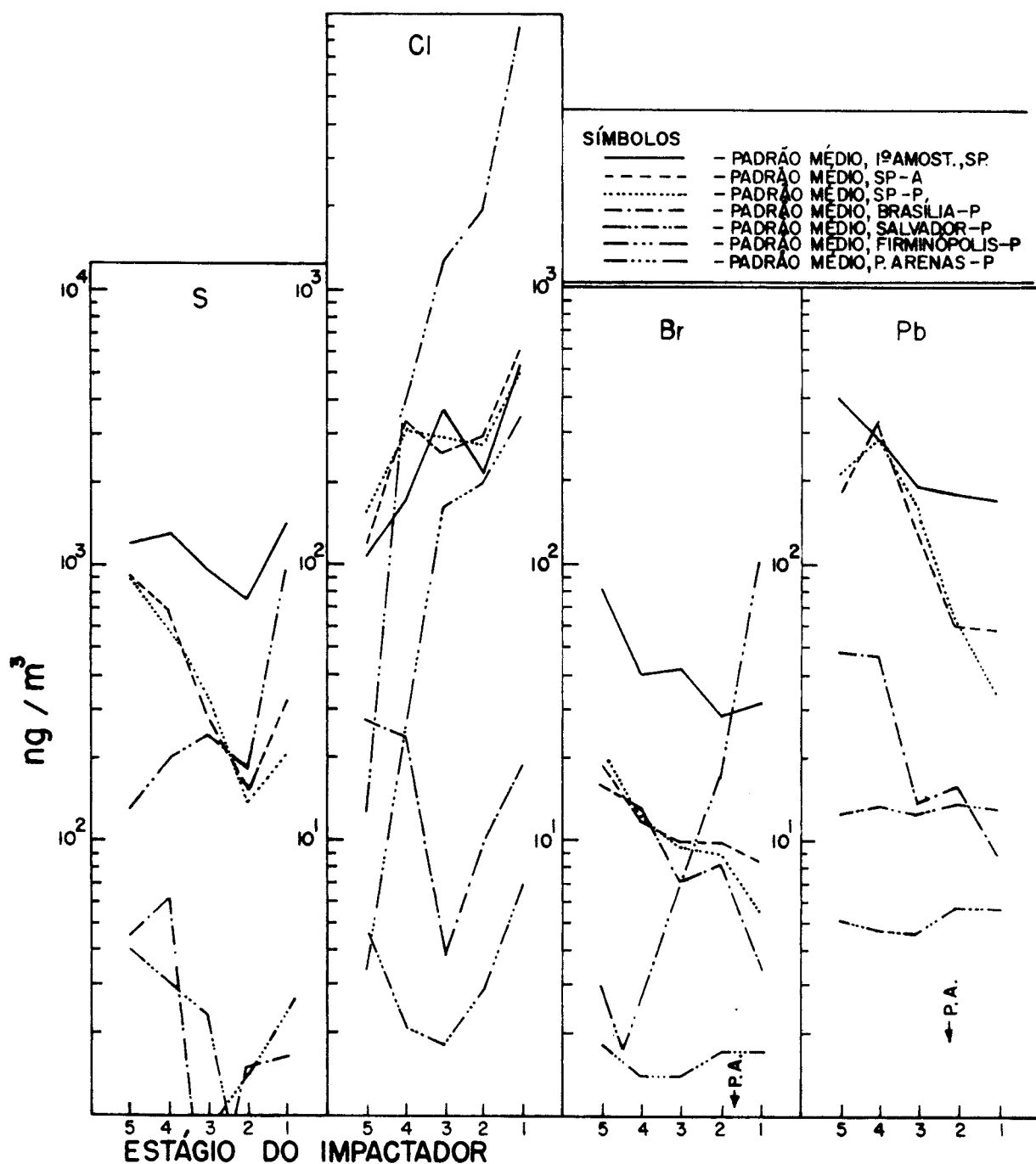


Fig. 2 - Padrões médios das DTs do S, Cl, Br e Pb

Para examinar uma a uma as distribuições apresentadas para cada elemento na figura 2 notamos inicialmente que a variável representada no eixo das abscissas, "estágio do impactador" (em ordem decrescente) é aproximadamente proporcional ao logaritmo, na ordem crescente, dos diâmetros (aerodinâmicos) médios dos particulados retidos no estágio. Os particulados com tamanhos entre  $0,25\mu\text{m}$  e  $0,5\mu\text{m}$  são retidos no 5º estágio; entre  $0,5$  e  $1\mu\text{m}$  no 4º; entre  $1$  e  $2\mu\text{m}$  no 3º; entre  $2$  e  $4\mu\text{m}$  no 2º; e finalmente, os maiores que  $4\mu\text{m}$  no 1º estágio. Observamos também que as amostragens foram sempre feitas a pequenas alturas (alguns metros) do nível do solo.

Para todos os elementos considerados na figura 2 estão representadas várias distribuições médias obtidas em diferentes condições e em vários lugares; resumidamente: 3 na cidade de São Paulo, uma em Brasília, uma no litoral, a 20km ao norte de Salvador, uma em Firminópolis, a 200km a oeste de Goiânia e, finalmente, uma no extremo sul da América do Sul em Punta Arenas, Chile.

Comecemos nossas discussões com o exame das distribuições médias do enxofre (S): inicialmente, é notável como as curvas de São Paulo guardam entre si uma estreita semelhança na forma (veja a figura 2), com um nítido predomínio nelas dos "particulados submicrons" (estágios 4 e 5). Por outro lado, é notável também o predomínio (de mais de uma ordem de grandeza) dessas curvas de São Paulo sobre as de Brasília, Firminópolis e P. Arenas. A curva de Salvador supera as de S. Paulo apenas para os casos de particulados grandes (estágios 1 e 2).

O quadro formado pelas curvas do S é perfeitamente compatível com as hipóteses sobre as principais origens desses particulados<sup>(4)</sup>: conversão gás-particulados do  $\text{SO}_2$ , produzido na

combustão de combustíveis fósseis, e do  $H_2S$ , produzido em processos biológicos de decomposição natural, para os particulados submicrons; "spray" das ondas do mar, para os particulados grandes. Os produtos finais de todas essas transformações são, de acordo com as previsões da química da atmosfera, sulfatos-particulados (e dentre estes predomina o  $(NH_4)_2SO_4$ ).

Já para o caso do cloro (Cl), as suas distribuições médias apresentam um quadro radicalmente diferente do caso anterior. É verdade que também aqui evidencia-se uma regularidade nas curvas referentes a cidade de São Paulo, porém, com aspecto bem diverso das do enxofre, sobretudo por causa do visível predomínio de particulados grandes (estágios 1 e 2). Outro fato marcante nessas distribuições é o posicionamento das curvas de São Paulo entre as do litoral (Salvador) e as do interior (Brasília e Firminópolis), favorecendo a hipótese da origem marinha destes particulados (hipótese, aliás, fortalecida pelo predomínio de particulados grandes, maiores que  $1\mu m$ , nessas distribuições).

O bromo (Br) e o chumbo (Pb) geralmente andam juntos no problema da poluição do ar, fato que se deve a sua origem comum na queima da gasolina, onde são adicionados geralmente em proporções bem definidas ( $M_{Br}/M_{Pb} \approx 0,2$  a  $0,5$ ). Esse fato é razoavelmente compatível com o quadro das distribuições médias obtidas para esses elementos, onde também pode ser observado, nas curvas de São Paulo, o nítido predomínio das partículas submicrons (estágios 3, 4 e 5), que caracterizam a produção por combustão.

Mas é observando a figura 3, onde apresentamos os histogramas obtidos por meio dos dados do AFS que operou na estação

IFUSP, em São Paulo, que se torna mais evidente a correlação Pb-Br. Neste caso cálculos de regressão linear permitem avaliar as massas de Pb que provavelmente não são originárias da queima da gasolina (correspondentes aos picos elevados que ocorreram nos dias 2, 3 e 4, na figura 3) e, dessa forma, suspeitar da ação de outras fontes (provavelmente industriais) na produção de particulados de Pb.

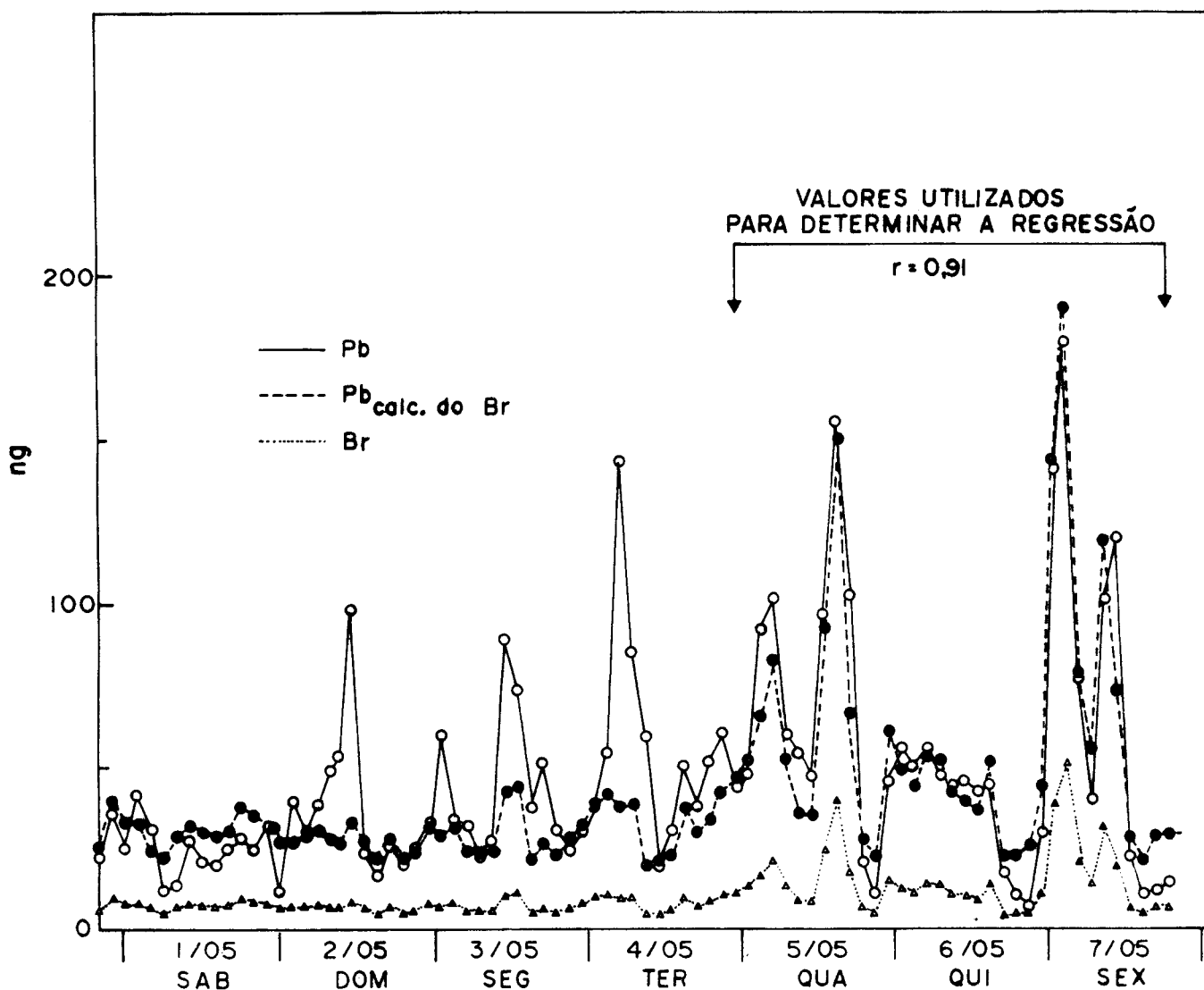


Fig.3 - Histogramas do Pb e Br na estação IFUSP.

## 7. RESPOSTA A UMA QUESTÃO IMPORTANTE

De um ponto de vista puramente acadêmico seria de grande interesse discutir sobre problemas tais como a acurácia, a precisão e a representatividade dos resultados de experiência como essas realizadas pelo GEPA. Assim, por exemplo, é muito interessante examinar até onde vai a representatividade espacial e temporal das distribuições de tamanho das concentrações de massa dos elementos, medidas nos vários AA investigados.

De um ponto de vista mais pragmático, porém, interessa primeiro saber que papel esses resultados podem representar no problema da poluição do ar, ou, de outra forma, que contribuição podem dar para a sua solução. Embora essa não seja para nós a parte mais importante de toda a questão (que, ao nosso ver, reside no seu aspecto educacional), convém discuti-la, ainda que superficialmente.

É comum acontecer em física que investigações sobre determinadas propriedades de um sistema não informem diretamente sobre os aspectos mais relevantes destas propriedades, muitas vezes os recursos disponíveis limitam as observações experimentais a certos aspectos, que não os mais desejados.

Aparentemente este é o caso, até certo ponto, de nossos resultados onde, por exemplo, obtemos as distribuições de tamanho das concentrações de massas elementares, quando segundo parece, seria mais expressivo obter-se as distribuições de tamanho da concentração (do número) de particulados e das suas composições químicas.

Mas isso, repetimos, situação comum na física, não invalida nossos resultados; apenas obriga-nos a interpretá-los a luz de outras informações como, por exemplo, as provenientes



da química da atmosfera. E foi assim que nas seções anteriores pudemos indicar a existência de um evidente relacionamento entre as distribuições que obtivemos para o S e a produção de SO<sub>2</sub> pelas fontes poluidoras; indicações nesse sentido também foram dadas para os casos de Cl, Br e Pb.

Nossa primeira conclusão, portanto, é a de que o método de investigações de AA utilizado pelo GEPA, além do seu interesse acadêmico, permite a obtenção de informações relevantes ao problema da poluição do ar.

Voltemos agora as questões iniciais com que abrimos este trabalho, indagando sobre o acerto e a oportunidade com que o problema da poluição do ar vem sendo tratado entre nós.

Em trabalho anterior<sup>(2)</sup>, elaborado em 1975, enfatizávamos que "... os nossos órgãos de controle de poluições ambientais vão, cada vez mais, comprometendo-se com o enfoque tecnocrata da matéria, e, nesse comprometimento, tornam-se cada vez mais convictos da sua independência e auto-suficiência para levar a bom termo a sua tarefa...". Infelizmente o comportamento dos nossos órgãos responsáveis por esses problemas nos dois últimos anos contribuíram para o fortalecimento dessa afirmação, e da que lhe seguia: "e assim tornam-se cada vez mais obscuras nossas perspectivas de solução desses problemas".

Mas, por que discordávamos então, e continuamos discordando ainda, do comportamento dos nossos tecnocratas no assunto quando parece claro que o desenvolvimento de experiências, como as que acabamos de descrever, em escala capaz de sustentar uma base de apoio às tecnologias e estratégias nacionais no controle das poluições ambientais não é coisa realizável a curto prazo, pelo contrário, demandará provavelmente uma década ou mais? E essa parece ser a razão porque os tecnocratas

sentem-se inibidos em apoiar uma política vigorosa de incentivos às pesquisas científicas sobre problemas ambientais.

Discordamos desse ponto de vista porque consideramos ilusória a solução desses problemas através da já célebre "importação de pacotes fechados tecnológicos", uma vez que o uso desse know-how e dessa tecnologia não são geradores de atividade educacional e, como já dissemos atrás, essa atividade constitui, sem dúvida, a componente mais importante do problema.

Portanto, respondendo as indagações feitas, vai a nossa segunda conclusão: o nosso problema da poluição do ar continua sendo equacionado de maneira inconveniente, prosseguindo-se na super-valorização do enfoque tecnocrático do assunto; e "...as consequências disso tudo aí estão e, provavelmente, aí ficarão por muito tempo: a crescente degradação do nosso meio ambiente" (2).

REFERÊNCIAS

- (1) Celso M.Q.Orsini: "Contribuição ao estudo de aerossóis atmosféricos por meio de espectroscopia de raio-X induzido por partículas", Tese apresentada em Concurso de Livre-Docência ao IFUSP, 1977.
- (2) Celso M.Q.Orsini: "Poluição do Ar: questão de tecnocracia ou ciência?", Ciência e Cultura, 28 (5) (1976) 526-535.
- (3) C.Q.Orsini and L.C.Bouéres: "A PIXE set-up for air pollution studies in South America", Nucl.Inst. and Meth. 142 (1977), 27-32.
- (4) John H. Seinfeld: "Air Pollution, Physical and Chemical Fundamentals", McGraw-Hill, 1975.