

ÍNDICES DE MONITORAMENTO DE OZÔNIO DE SUPERFÍCIE

M. M. Mariano e V.W.J.H. Kirchhoff

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Cx. Postal 515, 12201/970 São José dos Campos, SP, Brasil

A queima de biomassa na época seca produz gases precursores (CO , NO , NO_2) que em presença de OH e radiação ultravioleta, na baixa atmosfera, podem produzir ozônio, O_3 . A concentração deste gás tem sido observada há vários anos pelo INPE. Mostramos neste trabalho que as concentrações e o seu potencial de afetar o meio ambiente são melhor descritas por índices de monitoramento que são definidos quantitativamente: o **Índice de Exposição** e o **Índice de Queima**. O primeiro índice refere-se à expressão da dose (concentração x tempo) relacionada a eventos de curta duração. O segundo descreve a intensidade de produção de gases da queima de matéria orgânica.

INDICES FOR MONITORING SURFACE OZONE - Biomass burning during the dry season produces precursor gases (CO , NO , NO_2) which in the presence of OH and ultraviolet radiation can produce ozone in the lower atmosphere. The Brazilian Institute for Space Research, INPE, has been monitoring this gas for many years. It is shown that the ozone concentration and its potential to affect the environment are better described by numerical indices derived from the measured concentrations. Two indices are described: The **index of exposure**, and the **burning index**. The first parameter is an expression of the concentration amount in time, similar to the concept of dose, important for the description of large short duration events. The second describes the intensity of the production of O_3 caused by the biomass burning.

INTRODUÇÃO

A presença de O_3 na troposfera pode ser explicada pela interação entre processos dinâmicos e fotoquímicos de produção e perda (Liu et al., 1987; Chatfield e Delany, 1990). Durante as duas últimas décadas foram observadas modificações de comportamento de concentração de O_3 decorrentes da intensificação de atividades antropogênicas (atividades industriais, agrícola e de geração de energia; Stern et al., 1984; Logan, 1985).

Em regiões tropicais observa-se uma participação expressiva das atividades agrícolas, em especial a queima de matéria orgânica nos processos de poluição atmosférica. Em termos de emissão de carbono, por exemplo, a queima, no Brasil de combustíveis fósseis nos automóveis é da mesma ordem

de grandeza da emissão de carbono pelas queimadas da região Amazônica. Investigações dos padrões de concentração de O_3 nesta região sugerem que os processos fotoquímicos entre poluentes precursores oriundos da queima de matéria orgânica contribuem de forma acentuada para o aumento das concentrações deste gas-traço na troposfera durante a estação seca (Crutzen et al., 1985; Kirchhoff et al., 1989; Kirchhoff e Marinho, 1990; Crutzen e Andreae, 1990).

O aumento de concentração de O_3 na troposfera pode ser responsável pela maior parte dos danos causados pela poluição atmosférica sobre a vegetação e culturas agrícolas (Lefohn, 1992; ver também lista adicional de referências no apêndice). Dentre estes efeitos citam-se os danos relacionados à pigmentação foliar, efeitos fisiológicos e conseqüentemente queda

de produção (Stern et al., 1984; ver apêndice).

As concentrações de O_3 têm sido utilizadas como parâmetro de qualidade do ar em vários países. São estabelecidos índices de monitoramento de concentração de O_3 com o objetivo de evitar ou minimizar os impactos da poluição atmosférica sobre o meio-ambiente. Os padrões são definidos como o valor de concentração de O_3 máxima permitida durante um determinado intervalo de tempo. Nos Estados Unidos e Canadá é estabelecido um valor máximo de 120 ppbv durante uma hora (Lefohn e Runeckles, 1987). A legislação vigente no Brasil determina que a concentração máxima de ozônio não deve ultrapassar o limite de 80 ppbv durante uma hora. Esta recomendação, cuja formulação é semelhante à de outros países, não é uma limitação de um máximo de concentração apenas, mas implica que a concentração se mantenha no tempo, por até uma hora. Esta conceituação considera que a Exposição a um gás tóxico, deve ser medida não apenas pela concentração, mas sim pela integral de concentração no tempo. Assim sendo, terá quase a mesma consequência ficar exposto a 100 ppbv de ozônio durante uma hora ou a 200 ppbv de ozônio durante meia hora. Portanto, somente a concentração do ozônio não é suficiente para caracterizar seus efeitos sobre a vegetação. Surge daí a necessidade de definir índices que tragam consigo mais informação do que apenas o valor da concentração.

Neste trabalho são propostos dois índices de monitoramento: O Índice de Exposição e o Índice de Queima. O Índice de Exposição representa a dose (concentração \times tempo) imposta ao ambiente pela ocorrência de concentrações de O_3 elevadas. A definição deste índice representa a primeira etapa na avaliação dos impactos causados pela poluição atmosférica sobre o meio ambiente.

A necessidade de definição de um índice de queima surge da seguinte constatação. Um medidor de ozônio na região das queimadas não mede apenas o efeito das queimadas, mas também o ozônio produzido por processos naturais. O resultado indicado no medidor é a soma de todos os efeitos. Não é possível separar o efeito que se deseja visualizar, no caso, a queimada. O Índice de Queima visa descrever, em primeira aproximação, a quantidade de ozônio produzido apenas pela queimada. Caracteriza assim a quantidade de ozônio produzido

num tipo especial de interferência antropogênica que é a queimada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta e Redução dos Dados

Os dados de concentração de O_3 foram obtidos durante 3 anos de observações em Cuiabá e Natal (1988-1990) e durante 1 ano em Goiânia (1989-1990).

As medidas de O_3 foram obtidas através de um sensor que opera usando a absorção da radiação ultravioleta (UV) pela molécula de O_3 , de acordo com a lei de Beer-Lambert. O aparelho opera continuamente fornecendo um novo valor a cada 20 segundos e apresenta uma precisão a nível de 5% (Kirchhoff, 1988).

A redução dos dados foi realizada através da leitura dos dados contidos na fita de registro. Considera-se que as concentrações de O_3 atingem o equilíbrio fotoquímico dentro de uma hora (Levy, 1971; Levy, 1972). As variações de concentração de O_3 neste intervalo não são significativas e o valor das concentrações medidas representa a média de todas as concentrações de O_3 que ocorrem neste intervalo. Os dados foram integrados a cada 60 minutos.

Índices de Monitoramento

Com o objetivo de se estabelecer índices de monitoramento, dois aspectos são abordados: o aumento de concentração de O_3 devido à queima de matéria orgânica e a dose de O_3 imposta ao ambiente pela ocorrência de concentrações elevadas.

Índice de Queima

A queima de biomassa gera ozônio na baixa atmosfera. Concentrações de O_3 em excesso têm sido observadas, nestas condições, por vários pesquisadores (Crutzen et al., 1985; Greenberg et al., 1984; Kirchhoff, 1988; Kirchhoff et al., 1990). Sabe-se, portanto, que em locais onde ocorre queima de matéria orgânica a concentração de O_3 está acima do valor natural que seria observado sem queimadas. No entanto, com base em uma única observação (um local, um instrumento), não se pode determinar que fração desta concentração de ozônio é devida à queimada.

A informação básica do valor da concentração de O_3 é sem dúvida importante, e pelo exposto acima, seria útil conhecer também o valor da concentração de excesso, isto é, saber o valor da concentração devida somente à queimada. Para obter este parâmetro, ou índice adicional, escolhe-se um local que em princípio não é afetado pela queimada e mede-se neste local a concentração do O_3 . Obtém-se o índice desejado subtraindo-se as concentrações de O_3 obtidas no local onde não há interferência das queimadas, das que foram obtidas nos locais de queima (Goiânia e Cuiabá). O índice de queima é portanto, em primeira aproximação, o valor da concentração de O_3 devida somente às queimadas, e tem dimensão de concentração (ppbv).

Natal, RN (6°S, 35°W) foi escolhido como local que não sofre ação direta das queimadas. Isto ocorre porque as massas de ar que chegam a Natal vêm sempre do Oceano Atlântico e não do continente. Durante a estação chuvosa, as concentrações de O_3 são quase idênticas às observadas no continente. Pode haver um efeito secundário sobre a atmosfera de Natal, como discutido em Logan e Kirchoff (1986).

Índice de Exposição

A definição de índices ou padrões de qualidade do ar que forneçam uma medida real de proteção exige o conhecimento da relação entre dose (concentração \times tempo) e os efeitos adversos sobre o meio-ambiente (Lefohn e Runeckles, 1987). Tem sido observado que concentrações de O_3 elevadas (>80 ppbv) que ocorrem durante curtos intervalos de tempo (concentrações episódicas) podem induzir danos mais acentuados que a ocorrência de baixas concentrações (20 ppbv) durante intervalos de tempo maiores. Esta afirmação é válida mesmo quando as doses de Exposição são idênticas (Hogsett et al., 1985; Reich e Amundson, 1985).

O cálculo do Índice de Exposição de O_3 exige o conhecimento do intervalo de ocorrência de concentrações máximas. Define-se Índice de Exposição como a dose imposta ao ambiente pela ocorrência de um episódio de O_3 . Um episódio de O_3 digno de nota seria a ocorrência de concentrações elevadas, maiores que a média horária mensal. Calcula-se o Índice de Exposição através da expressão:

$$I_E = \int_{\delta t} C dt$$

onde C representa a concentração de O_3 e δt o intervalo de tempo de ocorrência do episódio.

O Índice de Exposição pode ser comparado à dose máxima recomendada pela legislação através da definição de Índice de Exposição Legal (Fig. 1). A figura ilustra um exemplo da ocorrência de um episódio de O_3 e os índices relacionados. O evento que se deseja caracterizar está representado pela curva C_3 . É o gráfico de concentração média horária de um certo dia. A curva C_1 é a média horária do mês em que C_3 foi observada, que vai servir como elemento de comparação, e a curva C_2 e a curva C_1 após translação, de tal modo que o máximo de C_2 seja igual ao limite legal de 80 ppbv. As áreas sob estas curvas representam os valores dos índices. I_1 sob a curva C_1 , I_2 sob C_2 , e I_3 sob a curva C_3 . O intervalo de tempo é arbitrário mas deve ser igual para os três parâmetros e deve refletir também a duração aproximada do evento que se deseja caracterizar. Observa-se através da figura que a diferença ($I_3 - I_2$) entre a dose legal e a dose de exposição representa a quantidade de O_3 que excede à estabelecida pela legislação.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Índice de Queima

A análise do índice de queima permitiu observar que durante a estação chuvosa (novembro a fevereiro) praticamente não há diferenças entre os valores de O_3 observados nos sítios de Cerrado (Goiânia e Cuiabá) e Natal. Durante a estação seca (julho-setembro), no entanto, observa-se um aumento da quantidade de O_3 na atmosfera. Este resultado comprova a eficiência e correção do procedimento adotado. A Figura 2 mostra os resultados obtidos para Cuiabá durante 1988, e a Figura 3 os resultados para Goiânia, para 1989-1990.

Índice de Exposição

Observa-se através dos resultados obtidos no período destas observações que a ocorrência de concentrações episódicas elevadas é comum em qualquer período do ano, com talvez um pequeno aumento durante a estação chuvosa. Os eventos episódicos registrados são, em geral, de curta duração (2 horas).

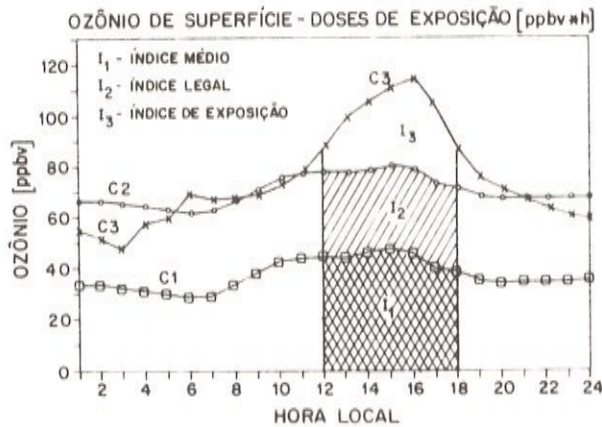


Figura 1. Representação esquemática do procedimento para definir os índices de exposição. O evento que se deseja caracterizar está representado pela curva C3. É o gráfico de concentração média horária de um certo dia. A curva C1 é a média horária de um certo dia. A curva C1 é a média horária do mês em que C3 foi observada, que vai servir como elemento de comparação, e a curva C2 é a curva C1 após translação, de tal modo que o máximo de C2 seja igual ao limite legal de 80 ppbv. As áreas sob estas curvas representam os valores dos índices. I_1 sob a curva C1, I_2 sob C2, e I_3 sob a curva C3. O intervalo de tempo é arbitrário mas deve ser igual para os três parâmetros e deve refletir também a duração aproximada do evento que se deseja caracterizar.

(Schematic representation of the procedure to define the exposure indices. The event to be described is represented by curve 3. It is the curve of hourly averages for a given day of measurements. Curve C1 is the hourly average for the month in which C3 was observed, and will be used for comparison. Curve C2 is curve C1 after a process of translation, such that the maximum of C2 coincides with the Brazilian legal limit of 80 ppbv. The areas under the curves represent the numerical values of the indices. I_1 under curve C1; I_2 under C2, and I_3 under C3. The time interval is arbitrary, but must be equal for the three indices to be compared. It should also represent the approximate duration of the event that one wants to characterize.)

Há casos de concentrações elevadas durante vários dias consecutivos. A Tabela 1 mostra os resultados do cálculo dos Índices de Exposição, Médio e Legal para Goiânia.

Da mesma forma, a Tabela 2 mostra os resultados para Cuiabá. A duração dos episódios em Cuiabá foi maior que os registrados em Goiânia, assim como

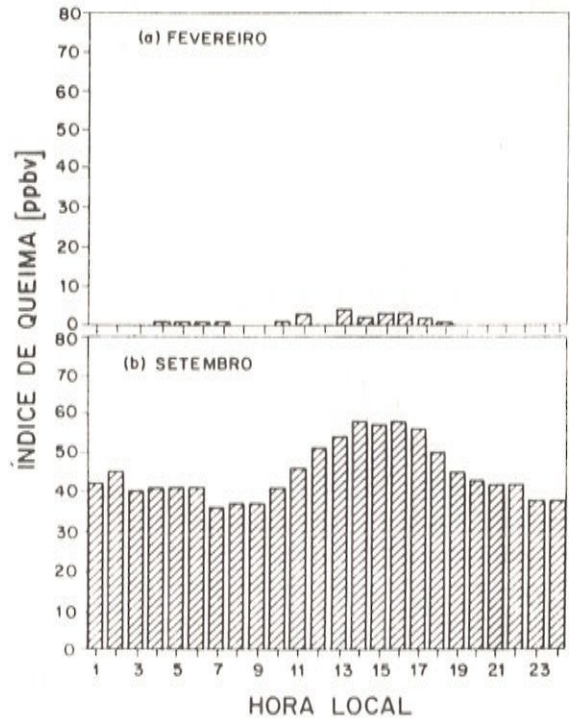


Figura 2. Índice de Queima calculado para Cuiabá durante 1988, para fevereiro e setembro. Notar que para o mês de chuvas o índice é praticamente nulo, o que implica em concentrações iguais em Natal e Cuiabá. Já em setembro a concentração observada em Cuiabá excede à de Natal pelo valor indicado.

(Burning index calculated for Cuiabá for February and September of 1988. Note that for the rainy period the index is almost zero, meaning equal concentrations at Natal and Cuiabá. On the other hand for September values of the index are large meaning much higher concentrations in the burning area.)

as concentrações de O_3 . Dois episódios dos vários registrados apresentaram uma dose de exposição maior que a permitida pela legislação. As Figuras 4 e 5 mostram dois exemplos.

A Figura 4 mostra o caso de um episódio que ocorreu dia 07.07.90 em Cuiabá. Pode-se ver que o evento foi bastante significativo em relação ao comportamento da média, o índice de exposição sendo quase o dobro do índice médio. O nível legal, porém, não foi efetivamente alcançado. A Tabela 2 mostra os valores calculados para os índices, para um intervalo de tempo de 4 horas, entre 9 e 13 horas.

A Figura 5 mostra um caso de concentração de O_3 que na maior parte do dia seguiu o padrão médio,

Tabela 1. Cálculo da exposição imposta ao meio ambiente durante a ocorrência de um episódio de O₃.
(*Calculation of the environmental exposure during an ozone event (Goiânia event.)*)

Goiânia Data	Duração do Evento (horas)	I ₁ Índice de Exposição Médio (ppbv.h)	I ₂ Índice de Exposição Legal (ppbv.h)	I ₃ Índice de Exposição do Evento (ppbv.h)
23.11.89	2	93,02	233,12	206,0
23.12.89	4	70,98	313,74	192,0
10.04.90 (3 picos)	2	64,52	232,22	159,0
	2	68,92	236,62	130,0
	2	43,70	211,40	121,0
05.07.90	4	150,07	377,02	279,0
27.07.90	2	69,82	206,06	131,0

Tabela 2. Cálculo da exposição imposta ao meio ambiente durante a ocorrência de um episódio de O₃.
(*Calculation of the environmental exposure during an ozone event (Cuiabá event.)*)

Cuiabá Data	Duração do Evento (horas)	I ₁ Índice de Exposição Médio (ppbv.h)	I ₂ Índice de Exposição Legal (ppbv.h)	I ₃ Índice de Exposição do Evento (ppbv.h)
11.05.88	7	115,0	611,0	253,0
09.06.88	5	111,0	459,0	210,0
28.08.88	12	810,0	992,0	1298,0
25.09.88	11	911,0	857,0	1330,0
07.07.90	4	147,98	379,28	270,0
01.08.90	6	342,48	538,36	646,0

mensal, porém entre 11 e 17 horas a concentração aumentou muito acima dos valores normais (indicado pela média mensal) e dos valores máximos legais (estipulados por definição). Definindo a duração do evento de 6 horas, entre 11 e 17 horas, os índices calculados são os da Tabela 2, para o dia 1 de agosto de 1990. O índice de exposição neste caso é quase o dobro comparado com o índice médio, e ultrapassa o índice legal por uma margem elevada.

Deve-se notar que a expressão do Índice de Exposição é bastante flexível, não só pela escolha mais conveniente que se pode fazer da duração do evento (mas que deve ser igual para os três parâmetros I₁, I₂ e I₃), mas também pode-se aprimorar a definição de excesso subtraindo-se, por exemplo, o valor do índice médio (que pode ser considerado como uma espécie de ruído de fundo) e expressando os índices legal e de exposição do evento porcentualmente.

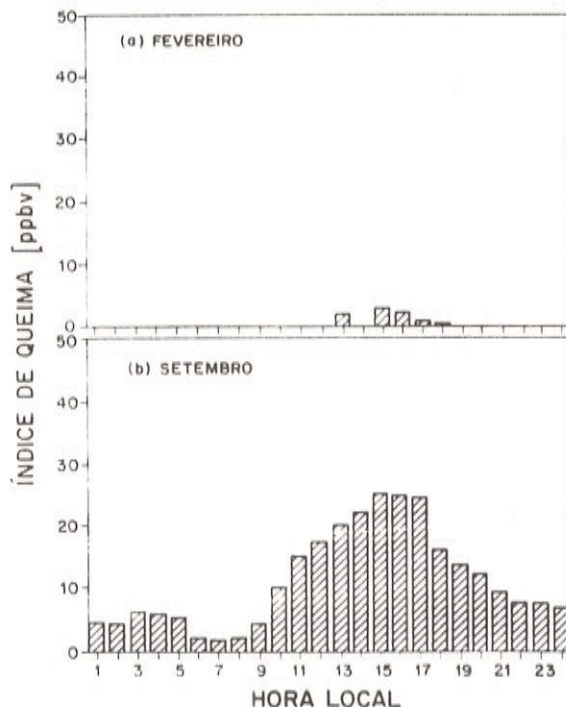


Figura 3. Índice de Queima calculado para Goiânia, no período 1989-1990, para fevereiro e setembro. Vale o mesmo comentário da figura anterior.

(Burning index for Goiânia, for February and September of 1989-1990. Same comments as above apply here as well.)

CONCLUSÕES

A legislação é simplista com relação à definição de máximas exposições frente a gases tóxicos. O nível máximo de 80 ppbv durante uma hora recomendado para ozônio de superfície não leva em conta a possibilidade de ocorrer concentração muito maior em tempo menor, com o mesmo efeito de exposição desta dose ao meio ambiente. Para checar esta situação definimos um índice numérico que chamamos de **índice de exposição**, e analisamos dados de concentração de ozônio em Cuiabá e Goiânia. Concluímos deste estudo que, de fato, há ocasiões em que o índice de exposição calculado é maior do que os valores recomendados legalmente.

Um segundo parâmetro definido foi o **índice de queima**. Este índice permite expressar, em primeira aproximação, quanto ozônio é produzido na queimada. Ambos os índices definidos neste trabalho permitirão uma avaliação mais correta dos efeitos de

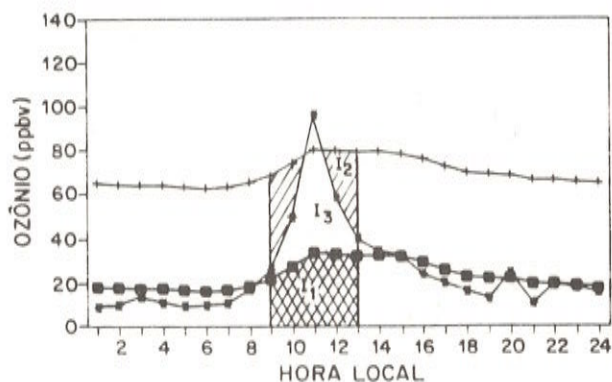


Figura 4. Episódio de ozônio em 07.07.90 em Cuiabá. A média horária das 11 horas, neste dia, foi muito maior do que o valor máximo legal. As curvas mostradas correspondem às definições da Fig. 1. Os valores dos índices estão na Tabela 2.

(Ozone episode of 07 July 1990 at Cuiabá. The mean for 1100 hours local time was much higher than the maximum legal limit. The curves shown correspond to the definitions of Fig. 1, and the numerical values of the indices are shown in Table 2.)

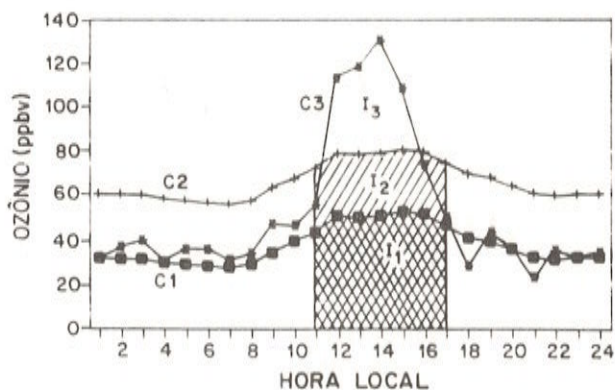


Figure 5. Episódio de ozônio observado em 01.08.90, em Cuiabá. Os valores dos índices estão mostrados na Tabela 2.

(Ozone episode observed 01 August 1990 at Cuiabá. The numerical values of the indices are shown in Table 2.)

altos valores de concentração de ozônio no meio ambiente, já que são índices quantitativos, calculados a partir das concentrações medidas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o resultado de uma Dissertação de Mestrado. Agradecemos o apoio do INPE, da

FAPESP, e do grupo de ozônio do INPE, e a colaboração da UFGO, da UFMT e da UFMS.

REFERÊNCIAS

- CHATFIELD, R.B.; DELANY, A.C. - 1990 - Convection links biomass to increased tropical ozone: however, model will tend to overpredict O₃. *Journal of Geophysical Research* 95:473-18.488.
- CRUTZEN, P.J.; DELANY, A.C.; GREENBERG, J.; HAAGENSON, P.; HEIDT, L.; LEUB, R.; POLLOCK, W.; SEILER, W.; WARTBURG, A.; ZIMMERMAN, P. - 1985 - Tropospheric chemical composition measurements in Brasil during the dry season. *Journal of Atmospheric Chemistry* 2:233-256.
- CRUTZEN, P.J.; ANDREAE, M.O. - 1990 - Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science* 250:1669-1678.
- GREENBERG, J.P.; ZIMMERMAN, T.; HEIDT, L.; POLLOCK, W. - 1984 - Hydrocarbons and carbon monoxide emissions from biomass burning in Brasil. *Journal of Geophysical Research* 89:1350-1354.
- HOGSETT, W.E.; PLOCHER, M.; WILDMAN, V.; TINGEY, D.T.; BENNETT, J.P. - 1985 - Growth response of two varieties of slash pine seedlings to chronic ozone exposures. *Canadian Journal of Botany* 63:2369-2376.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H. - 1988 - Variações temporais da concentração de ozônio de superfície. *Revista Brasileira de Geofísica* 6:3-8.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H.; SETZER, A.W.; PEREIRA, M.C. - 1989 - Biomass burning in Amazônia: seasonal effect on atmospheric O₃ and CO. *Geophysical Research Letters* 16:459-472.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H.; MARINHO, E.V.A. - 1987 - Surface carbon monoxide measurements in Amazônia. *Journal of Geophysical Research* 95:16.933-16.943.
- LEFOHN, A.S.; RUNECKLES, V.C. - 1987 - Establishing standards to protect vegetation - ozone exposure/dose considerations. *Atmospheric Environment* 21:561-568.
- LEFOHN, A.S. - 1992 - Surface level ozone exposures and their effects on vegetation, Lewis Publishers.
- LEVY, H. II. - 1971 - Normal atmosphere: large radical and formaldehyde concentration predicted. *Science* 173:141-143.
- LEVY, H. II. - 1972 - Photochemistry of the lower troposphere. *Planetary Space Science* 20:919-935.
- LIU, S.C.; TRAINER, R.M.; FEHSENFELD, F.C.; PARRICH, D.D.; WILLIAMS, E.J.; FAHLWY, D.W.; HUBLER, G.; MURPHY, P.C. - 1987 - Ozone production in the rural troposphere and the implication for regional and global ozone distributions. *Journal of Geophysical Research* 92:4191-4207.
- LOGAN, J.A. - 1985 - Tropospheric ozone: seasonal behavior, trends and anthropogenic influence. *Journal of Geophysical Research* 90:10.463-10.482.
- LOGAN J.A.; KIRCHHOFF, V.W.J.H. - 1986 - Seasonal variations of tropospheric ozone at Natal, Brasil. *Journal of Geophysical Research* 91:7.875-7.881.
- REICH, P.B.; AMUNDSON, R.G. - 1985 - Ambient levels of ozone reduce net photosynthesis in tree and crop species. *Science* 230:566-570.
- STERN, A.C.; BOUBEL, R.W.; TURNER, D.B.; FOX, D.L. - 1984 - *Fundamentals of Air Pollution*. Orlando, Florida. Academic Press, 530 pp.

APÊNDICE

LITERATURA SELECIONADA SOBRE EFEITOS NEGATIVOS DO OZÔNIO SOBRE PLANTAÇÕES

- Aneja, V.P., Clairborn, C.S., Li, Z., and Murthy, A. (1990) Exceedances of the national ambient air quality standard for ozone occurring at a "pristine" area site. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 40:217-220.
- Aneja, V.P., Businger, S., Liz, Z., Clairborn, C.S., and Murthy, A. (1991). Ozone climatology at high elevations in the southern Appalachians. *J. Geophys. Res.* 96:1007-1021.
- Ashmore, M. (1972) Effects of chronic exposure to ozone on soluble sugar and ascorbic acid contents of pine seedling. *Can. J. Bot.* 50:215-219.
- Ashmore, M.R. (1988) A comparison of indices that describe the relationship between exposure to

- ozone and reduction in the yield of agricultural crops (Comments on article by Lefohn et al. 1988a). *Atmos. Environ.* **22**:2060-2061.
- Barnes, J.D., and Davison, A.W. (1987) The influence of ozone on the winter hardiness of Norway spruce. (*Picea abies*. L. Karst.) *New Phytol.* **108**:159-166.
- Benoit, L.F., Skelly, J.M., Moore, L.D., and Dochinger, L.S. (1982) Radial growth reductions of *Pinus strobus* L. correlated with foliar ozone sensitivity as an indicator of ozone induced losses in eastern forests. *Can. J. For. Res.* **12**:673-678.
- Berrang, P.D., Karnosky, D.F., Mickler, R.A., and Bennett, J.P. (1986) Natural selection for ozone tolerance in *Populus tremuloides*. *Can. J. For. Res.* **16**:1214-1216.
- Blank, L.W. (1985) A new type of forest decline in Germany. *Nature* **314**:311-314.
- Bohm, M., McCure, B., and Vandetta, T. (1991) Diurnal curves of tropospheric ozone in the western United States. *Atmos. Environ.* **25A**:1577-1590.
- Braun, S., and Fluckinger, W. (1989) Effect of ambient ozone and acid mist on aphid development. *Environ. Pollut.* **56**:177-187.
- Brown, K.A., and Roberts, T.M. (1988) Effects of ozone on foliar leaching in Norway spruce (*Picea abies* L. Karst): confounding factors due to NOx production during ozone generation. *Environ. Pollut.* **55**:55-73.
- Chappelka, A.H., III and Chevone, B.I. (1989) Two methods used to determine tree responses to pollutants. *Environ. Pollut.* **61**:31-45.
- Chevone, B.I., Yang, Y.S., and Reddick, G.S. (1984) Acidic precipitation and ozone effects on growth of loblolly and shortleaf pine seedlings. *Phytopathology* **74**:756 (Abstr.).
- Coleman, J.S. and Jones, C.G. (1988b) Plant stress and insect performance: cottonwood, ozone and leaf beetle. *Oecologia* **76**:57-61.
- Constantinidou, H.A., and Kozlowski, T.T. (1979) Effects of sulfur dioxide and ozone on *Ulmus americana* seedlings. II. Carbohydrates, proteins, and lipids. *Can. J. Bot.* **57**:176-184.
- Cooley, D.R., and Manning, W.J. (1987) The impact of ozone on assimilate partitioning in plants: a review. *Environ. Pollut.* **47**:95-113.
- Costonis, A.C. and Sinclair, W.A. (1969) Relationship of atmospheric ozone to needle blight of eastern white pine. *Phytopathology* **59**:1566-1574.
- Coyne, P.I., and Bingham, G.E. (1982) Variation in photosynthesis and stomatal conductance in an ozone-stressed ponderosa pine stand: light response. *For. Sci.* **28**:257-273.
- Davis, D.D. and Coppolino, J.B. (1974) Relative ozone susceptibility of selected woody ornamentals. *Hort. Sci.* **9**:537-539.
- Davis, D.D. and Coppolino, J.B. (1976) Ozone susceptibility of selected woody shrubs and vines. *Plant. Dis. Rep.* **60**:876-878.
- Davis, D.D. and Wood, F.A. (1968) Relative sensitivity of twenty-two tree species to ozone. *Phytopathology* **58**:399 (Abstr.).
- Davis, D.D. and Wood, F.A. (1972) The relative susceptibility of eighteen coniferous species to ozone. *Phytopathology* **62**:14-19.
- Davis, D.D. and Wood, F.A. (1973) The influence of environmental factors on the sensitivity of Virginia pine to ozone. *Phytopathology* **63**:371-376.
- Davis, D.D. and Umback, D.M. and Coppolino, J.B. (1982) Susceptibility of tree and shrub species and responses of black cherry foliage to ozone. *Plant. Dis.* **65**:904-907.
- Elliott, C.L., Eherhandt, J.C., and Brennan, E.G. (1987) The effect of ambient ozone pollution and acidic rain on the growth and chlorophyll content of green and white ash. *Environ. Pollut.* **41**:61-70.
- Evans, G.F., Finkelstein, P., Martin, B., Possiel, N., and Graves, M. (1983) Ozone measurements from a network of remote sites. *JAPCA* **33**:291-296.
- Foster, K.W., Timm, H., Lawrence, C.K., and Oshima, R.J. (1983) Effects of ozone and sulfur dioxide on tuber yield and quality of potatoes. *J. Environ. Qual.* **12**:75-80.
- Hayes, E.M., and Skelly, M. (1977) Transport of ozone from the northeast U.S. to Virginia and its effect on Eastern White Pines. *Plant. Dis. Rep.* **61**:778-782.
- Heagle, A.S., Body, D.E., and Neely, G.E. (1974) Injury and yield response of soybean to chronic doses of ozone and sulfur dioxide in the field. *Phytopathology* **64**:132-136.
- Heagle, A.S., Heck, W.W., Rawlings, J.O., and Philbeck, R.B. (1983) Effects of chronic doses of ozone and sulfur dioxide on injury and yield

- of soybeans in open-top chambers. *Crop Sci.* 26:1184-1191.
- Heagle, A.S., Spencer, S., and Letchworth, M.B. (1979) Yield response of winter wheat to chronic doses of ozone. *Can. J. Bot.* 57:1999-2005.
- Heck, W.W., Adams, R.M., Cure, W.W., Heagle, A.S., Heggstand, H.E., Kohut, R.J., Kress, L.W., Rawlings, J.O., and Taylor, O.C. (1983) A reassessment of crop loss from ozone. *Environ. Sci. Technol.* 17:572A-581A.
- Heck, W.W., Core, W.W., Rawlings, J.O., Zaragoza, L.J., Heagle, A.S., Heggstad, H.E., Kohut, R.J., Kress, L.W., and Temple, P.J. (1984) Assessing impacts of ozone on agricultural crops: I. Overview. *J. Air Poll. Contr. Assoc.* 34:729-735.
- Heck, W.W., and Dunning, J.A. (1967) The effects of ozone on tobacco and pinto bean as conditioned by several ecological factors. *JAPCA* 17:112-114.
- Heck, W.W., Dunning, J.A., and Hindawi, I.J. (1966) Ozone: nonlinear relation of dose and injury to plants. *Science* 151:511-515.
- Heck, W.W., Taylor, O.C., Adams, R.M., Bingham, G.E., Miller, J.E., Preston, E.M., and Weinstein, L.H. (1982) Assessment of crop loss from ozone. *JAPCA* 32:353-361.
- Henderson, W.R., and Reinert, R.A. (1979) Yield response of four fresh market tomato cultivars after acute ozone exposure in the seedling stage. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 104:754-759.
- Hogsett, W.E., Plocker, M., Wildman, V., Tingey, D.T., and Bennett, J.P. (1985) Growth response of two varieties of slash pine seedlings to chronic ozone exposures. *Can. J. Bot.* 63:2369-2376.
- Hogsett, W.E., Tingey, D.T., and Holman, S.R. (1985a) A programmable exposure control system for determination of the effects of pollutant exposure regimes on plant growth. *Atmos. Environ.* 19:1135-1145.
- Hogsett, W.E., Plocher, M., Wildman, Y., Tingey, D.T., and Bennett, J.P. (1985) Growth response of two varieties of slash pine seedlings to chronic ozone exposures. *Can. J. Bot.* 63:2369-2376.
- Horvath, M., Bilitzky, L., and Huttner, J. (1985) *Ozone*. Elsevier, New York.
- Jensen, K.F. (1973) Response of line forest tree species to chronic ozone fumigation. *Plant. Dis. Rep.* 57:914-917.
- Jensen, K.F., and Noble, R.D. (1984) Impact of ozone and sulfur dioxide on net photosynthesis of hybrid poplar cuttings. *Can. J. For. Res.* 14:385-388.
- Kirchoff, V.W.J.H. (1988) Surface ozone measurements in Amazônia. *J. Geophys. Res.* 93:1469-1476.
- Kirchoff, V.W.J.H., E.V. Browell, and G.L. Gregory (1988) Ozone measurements in the troposphere of an Amazonian rain forest environment. *J. Geophys. Res.* 93:15850-15860.
- Kirchoff, V.W.J.H., and Marinho, E.V.A. (1989) A survey of continental concentrations of atmospheric CO in the Southern Hemisphere. *Atmos. Environ.* 23:461-466.
- Kirchoff, V.W.J.H., Marinho, E.V.A., Dias, P.L.S., Calheiros, R., Andre, R., and Volpe, C. (1989) O₃ and CO from burning sugar cane. *Nature* 339:264.
- Kohut, R.J., Amundson, R.G., and Laurence, J.A. (1986) Evaluation of growth and yield of soybean exposed to ozone in the field. *Environ. Pollut. (Series A)* 41:219-234.
- Kohut, R.J., Amundson, R.G., Laurence, J.A., Colavito, L., Van Leuken, P., and King, P. (1987) Effects of ozone and sulfur dioxide on yield winter wheat. *Phytopathology* 77:71-74.
- Krause, G.H.M., Arndt, U., Brandt, C.J., Buckner, J., Krenk, G., and Matzner, E. (1986) Forest decline in Europe: development and possible causes. *Water Air Soil Pollut.* 31:647-668.
- Kress, L.W., and Skelly, J.M. (1982a) Response of several eastern forest tree species to chronic doses of ozone and nitrogen dioxide. *Plant. Dis.* 66:1149-1152.
- Kress, L.W. and Skelly, J.M. (1982b) Relative sensitivity of 18 full-sib families of *Pinus taeda* to O₃. *Can. J. For. Res.* 12:203-209.
- Krupa, S.V. and Nosal, M. (1989) Effects of ozone on agricultural crops In *Atmospheric Ozone Research and its Policy Implications* (eds., Schneider, T., Lee, S.D. Wolters, G.J.P., and Grant, L.D.). Elsevier, Amsterdam, 229-238.
- Lee, E.H., Tingey, D.T., and Hogsett, W.E. (1988) Evaluation of ozone exposure indices in exposure-response modeling. *Environ. Pollut.* 53:43-62.
- Lefohn, A.S., Krupa, S.V., and Winstanley, D. (1990b) Surface ozone exposures measured at

- clean locations around the world. *Environ. Pollut.* **63**:189-224.
- Lefohn, A.S., Laurence, J.A., and Kohut, R.J. (1988a) A comparison of indices that describe the relationship between exposure to ozone and reduction in the yield of agricultural crops. *Atmos. Environ.* **22**:1229-1240.
- Lefohn, A.S., and Runeckles, V.C. (1987) Establishing standards to protect vegetation-ozone exposure/dose considerations. *Atmos. Environ.* **21**:561-568.
- Lefohn, A.S., Hogsett, W.E., and Tingey, D.T. (1987a) The development of sulfur dioxide and ozone exposure profiles that mimic ambient conditions in the rural southeastern U.S. *Atmos. Environ.* **21**:659-669.
- Lefohn, A.S., Laurence, J.A., and Kohut, R.J. (1988b) A comparison of indices that describe the relationship between exposure to ozone and reduction in the yield of agricultural crops (response to comments by V.C. Runeckles). *Atmos. Environ.* **22**:1242-1243.
- Lefohn, A.S., Shadwick, D.S., and Mohnen, V.A. (1990c) The Characterization of ozone concentrations at a select set of high-elevation sites in the eastern United States. *Environ. Pollut.* **67**:147-178.
- Lefohn, A.S., Runeckles, V.C., Krupa, S.V., and Shadwick, D.S. (1989) Important considerations for establishing a secondary ozone standard to protect vegetation. *JAPCA* **39**:1039-1045.
- Lewis, E. and Brennan, E. (1977) A disparity in the ozone response of bean plants grown in a greenhouse, growth chamber or open-top chamber. *J. Air Pollut. Control Assoc.* **27**:889-891.
- Lucas, P.W., Cotham, D.A., Sheppard, L.J., and Francis, B.J. (1988) Growth responses and delayed winter hardening in Sitka spruce following summer exposure to ozone. *New Phytol.* **108**:495-504.
- McLaughlin, S.B. (1985) Effects of air pollution on forests: a critical view. *J. Air Pollut. Control Assoc.* **35**:512-534.
- McLaughlin, S.B. and Taylor, G.E. (1981) Relative humidity: important modifier of pollutant uptake by plants. *Science* **211**:167-169.
- Miller, P.R., Parmeter, J.R., Flick, B.H., and Martinez, C.W. (1969) Ozone dosage response of ponderosa pine seedlings. *J. Air Pollut. Control Assoc.* **19**:435-538.
- Mooi, J. (1980) Influence of ozone on growth of two poplar cultivars. *Plant. Dis.* **64**:772-773.
- Mohnen, V.A., Hogan, A., and Coffey, P. (1977) Ozone measurements in rural areas. *J. Geophys. Res.* **82**:5889-5895.
- Musselman, R.C., McCool, P.M., and Younglove, T. (1988) Selecting ozone exposure statistics for determining crop yield loss from air pollutants. *Environ. Pollut.* **53**:63-78.
- Musselman, R.C., Huerta, A.J., McCool, P.M., and Oshima, R.J. (1986) Response of beans to simulated ambient and uniform ozone distribution with equal peak concentrations. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* **111**:470-473.
- Oshima, R.J., Poe, M.P., Braegelmann, P.K., Baldwin, D.W., and Van Way, V. (1976) Ozone dosage-crop loss function for alfalfa: a standardized method for assessing crop losses from air pollutants. *JAPCA* **26**:861-865.
- Peterson, D.L., Arbaugh, M.J., Wakefield, V.A., and Miller, P.R. (1987) Evidence of growth reduction in ozone-injured Jeffrey pine (*Pinus jeffreyi* Grev. and Balf) in Sequoia and Kings Canyon National Parks. *J. Air Pollut. Control Assoc.* **37**:9006-9012.
- Pryor, W.A., Giamalva, D.H., and Church, D.F. (1984) Kinetics of ozonation. II. Amino acids and model compounds in water and comparison to rates in nonpolar solvents. *J. Am. Chem. Soc.* **106**:7094-7100.
- Pye, J.M. (1988) Impact of ozone on the growth and yield of trees: a review. *J. Environ. Qual.* **17**:347-360.
- Reich, P.B. (1987) Quantifying the response of plants to ozone: a unified explanation. *Tree Physiol.* **3**:63-91.
- Reich, P.B., and Amundson, R.G. (1985) Ambient levels of ozone reduce net photosynthesis in tree and crop species. *Science* **230**:566-570.
- Sasek, A.J., and McClenahan, J.R. (1989) Effects of ozone or sulfur dioxide on pitch pine seedlings. *J. Environ. Qual.* **18**:57-61.
- Shafer, S.R., and Heagle, A.S. (1989) Growth response of field-grown loblolly pine to chronic doses of ozone during multiple growing seasons. *Can. J. For. Res.* **19**:821-831.

- Shafer, S.R., Heagle, A.S., and Camberato, D.M. (1987) Effects of chronic doses of ozone on field-grown loblolly pine: seedlings responses in the first year. *J. Air Pollut. Control Assoc.* **37**:1179-1184.
- Shafer, S.R., Heagle, S.R., and Camberato, D.M. (1987) Effects of chronic doses of ozone in field-grown loblolly pine: seedling responses in the first year. *J. Air Pollut. Control Assoc.* **37**:1179-1184.
- Sheng, S., and Chevone, B.I. (1988) Gas exchange response of soybean cultivars to short term exposure of sulfur dioxide and ozone. *Phytopathology* **78**:1513 (Abstr.).
- Showman, R.E. (1991) A comparison of ozone injury to vegetation during moist and drought years. *JAPCA* **41**:63-64.
- Skarly, L., and Sellden, G. (1984) The effects of ozone on crops and forests. *Ambio.* **13**:68-72.
- Smith, W.H. (1981) *Air Pollution and Forests.* Springer-Verlag, New York, 379.
- Steigner, J.E., Pye, J.M., and Lore, C.S. Air pollution damage to U.S. Forests. *J. of Forestry*, August, 1990.
- Temple, P.J. (1988) Injury and growth of Jeffrey pine and giant sequoia in response to ozone and acidic mist. *Environ. Exp. Bot.* **28**:323-333.
- Tingey, D.T., Wilhour, R.G., and Standley, C. (1976) The effect of chronic ozone exposures on the metabolic content of ponderosa pine seedlings. *For. Sci.* **22**:234-241.
- Tingey, D.T., Standley, C., and Field, R.W. (1976) Stress ethylene evolution: a measure of ozone effects on plants. *Atmos. Environ.* **10**: 969-974.
- Turner, N.C., Rich, S., and Waggoner, P.E. (1973) Removal of ozone by soil. *J. Environ. Qual.* **2**:259.
- Warner, J., and Twomey, S. (1967) The production of cloud nuclei by cane fires and the effect on cloud droplet concentration. *J. Atmos. Sci.* **24**:704-706.
- Warner, J. (1968) A reduction rainfall associated with smoke from sugar cane fires - An inadvertent weather modification? *J. of Appl. Meteorology* **7**:247-251.
- Wilhour, R.G. (1971) The influence of ozone on white ash (*Fraxinus americana* L.) Penn. St. Univ. Cent. Environ. Stud. No. 188-71. Pennsylvania State University. State College.
- Wood, F.A., and Davis, D.D. (1969) Sensitivity to ozone determined for trees. *Sci. Agric.* **17**:4-5.
- Woodman, J.N., and Cowling, E.B. (1987) Airborne chemicals and forest health. *Environ. Sci. Tech.* **21**:120-126.
- Yang, Y.S., Skelly, J.M., Chevone, B.I., and Birch, J.B. (1983b) Effects of long-term ozone exposure on photosynthesis and dark respiration of eastern white pine. *Environ. Sci. Tech.* **17**:371-373.

Versão recebida em: 01/06/92

Versão revisada em: 30/07/92

Versão aceita em: 05/08/92

Editor convidado: Dr. Daniel J.R. Nordemann