

# DEPOSIÇÃO ATMOSFÉRICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ÁGUA DE CHUVA

Valdenor Nilo de Carvalho  
Júnior  
nilo@funceme.br

## Resumo

A influência da composição química das chuvas nas concentrações de solutos finais nas águas subterrâneas ou superficiais é um aspecto importante nos estudos geoquímicos. Imaginar que as precipitações pluviométricas sejam uniformes quanto às características de qualidade pode levar à conclusões errôneas quanto ao seu comportamento hidroquímico no ambiente. Este artigo apresenta alguns conceitos a respeito da origem da composição química das águas das chuvas. Descrevem-se alguns processos hidroquímicos na atmosfera, discutindo aspectos básicos da formação dos componentes iônicos das precipitações pluviométricas.

**Palavras-chave:** hidroquímica da atmosfera; deposição total, deposição úmida, deposition seca

## Abstract

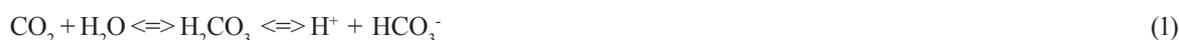
The impact of chemical composition of rain on groundwater and surface water final solute concentration is an important aspect of geochemical studies. Considering the pluviometric precipitation as uniform from quality point of view it may lead to erroneous conclusions about its hydrochemical behavior in the environment. This work presents critical concepts rainon the sources of rainwater chemical composition. It describes main hydrochemical process in the atmosphere, discussing basic aspects about the formation of ionic components for pluviometric precipitation.

**Keywords:** hydrochemistry of atmosphere, bulk deposition, wet deposition, dry deposition

## 1 Introdução

A atmosfera é uma mistura de gases na qual estão presentes partículas sólidas e líquidas em suspensão. A proporção dos constituintes gasosos principais ( $N_2$ ,  $O_2$ , Ar, Ne, He, Kr, H, Xe, Rn) são praticamente constantes no tempo e espaço. Os componentes variáveis assumem, assim, importante papel no balanço de energia da atmosfera e na formação de nuvens e das precipitações (DINGMAN, 1993).

A água é um excelente solvente nos sistemas naturais, assim a interação da umidade atmosférica com os gases e as partículas em suspensão no ar é um processo comum, mesmo em ambientes não poluídos. A precipitação pluviométrica tem um pH naturalmente ácido, ao redor de 5,6, devido à solução de ácido carbônico:



A acidez das águas naturais é o aspecto mais importante a ser considerado, porém, esta reação é apenas uma dentre as mais variadas interações que ocorrem na atmosfera. Os materiais particulados em suspensão na atmosfera, tanto naturais como

antropogênicos, têm um papel fundamental na composição final da precipitação. Em especial os aerossóis (partículas finas com diâmetro  $< 1\mu\text{m}$ ) facilitam a condensação do vapor d'água e a coalescência das gotículas de chuva. Quando a chuva ocorre, há o movimento tanto de solutos como de partículas em suspensão para a superfície terrestre (WILBY, 1997).

Neste contexto, o estudo da composição química da precipitação pluviométrica é importante na quantificação dos processos biogeoquímicos nos ecossistemas naturais, dado que os fluxos hídricos no ambiente são dependentes da distribuição espaço-temporal das chuvas. Diversos trabalhos sobre o balanço geoquímico em bacias hidrográficas rurais (REYNOLDS et al., 1988; ROBSON et al., 1993; CHAPMAN et al. 1993 e OSÓRIO et al., 2003) têm verificado esta hipótese através de dados experimentais e/ou de modelagem matemática. Já nas áreas urbanas, estes estudos são necessários para o entendimento dos processos de incorporação de compostos de origem antropogênica na água precipitada.

## 2 Composição básica da atmosfera

Considerando primeiramente a composição geral da atmosfera, mostramos na Tab. (1), nas duas primeiras colunas, a composição média dos gases em percentagem do volume abaixo dos 25km de altitude. Nas colunas seguintes são apresentadas as proporções em volume dos constituintes variáveis mais significantes hidrológicamente, dado que estes afetam diretamente o balanço de energia da atmosfera e a formação das nuvens e da precipitação.

**Tabela 1:** Composição da atmosfera

<i>Constituintes permanentes</i>	<i>Percentagem em volume</i>	<i>Constituintes variáveis</i>	<i>Percentagem em volume</i>
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	78,084	Vapor d'água	<4
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	20,946	Água (líquida e sólida)	<1
Argônio (Ar)	0,934	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0,0345
Neon (Ne)	0,001818	Metano (CH <sub>4</sub> )	0,00017
Hélio (He)	0,000114	Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )	<0,0001
Criptônio (Kr)	0,000114	Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	0,0000304
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0,000050	Monóxido de carbono (CO)	0,00002
Xenônio (Xe)	0,0000087	Poeiras (cinzas, solo, sais)	<0,00001
Radônio (Rn)	$6 \times 10^{-18}$	Ozônio (O <sub>3</sub> )	<0,000007
		Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	<0,000002
		Amônia (NH <sub>4</sub> )	Traços

Fonte: DINGMAN, 1997

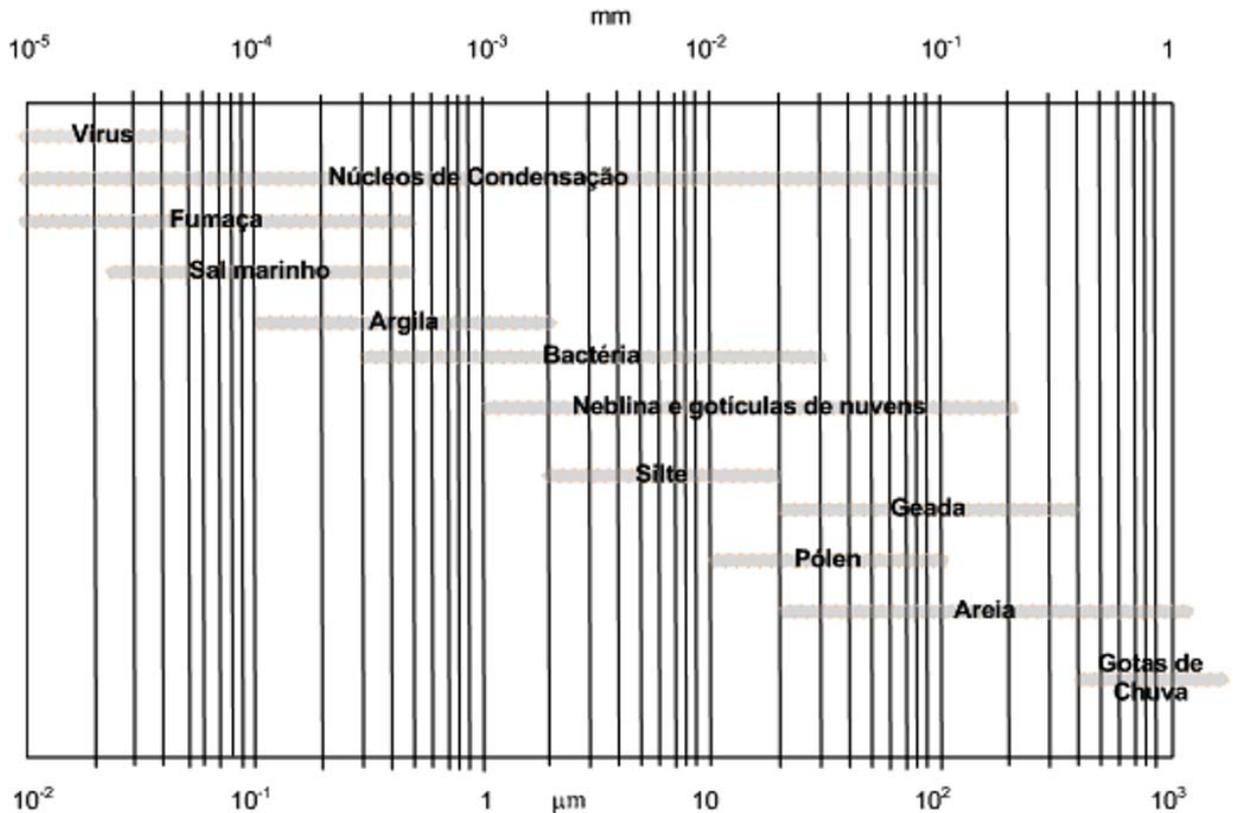
As concentrações médias de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) têm aumentado globalmente a uma taxa de 0.001 em %volume por ano devido à queima de combustíveis fósseis, manufatura de cimento e desmatamento. As concentrações de metano aumentam em 0,000002 em %volume por ano devido à cultura de arroz por inundação, animais e outras causas. As concentrações de NO<sub>2</sub> na estratosfera estão aumentando 0,0000003 em percentagem por volume ao ano. Devido ao uso de fertilizantes e queima de combustíveis fósseis, a concentração de N<sub>2</sub>O tem crescido a uma taxa de 0,000001 em % volume ao ano.

## 3 Distribuição regional dos aerossóis

A presença de aerossóis está intrinsecamente ligada ao sistema climático e ao ciclo hidrológico. O efeito de resfriamento do clima pelos aerossóis deve-se à reflexão da luz solar. Dependendo da sua composição, estes podem absorver a radiação solar na atmosfera, esfriando ainda mais a superfície da terra, mas aquecendo a própria atmosfera no processo. Estes efeitos dos aerossóis no perfil de temperatura, juntamente com o seu papel na formação dos núcleos de condensação, têm impacto significativo no ciclo hidrológico. Estes impactos são reforçados por variações na fração de terra coberta por nuvens, nas propriedades físico-químicas das nuvens e nas modificações das características iônicas da precipitação bruta. Avaliar este "feedback" é particularmente difícil já que os aerossóis têm composições, concentrações e formas muito diversas, variando desde poeira do deserto à poluição urbana. O estudo da distribuição e composição dos aerossóis numa escala global exige o uso de satélites, redes de monitoramento em terra e experimentos de campo dedicados. As tendências de incremento na concentração de aerossóis e mudanças na sua composição química, influenciadas pela industrialização e expansão populacional podem adversamente afetar o clima da Terra e a disponibilidade dos recursos hídricos.

A experiência tem mostrado que o vapor d'água contido no ar pode ser resfriado a altos graus de supersaturação sem a formação de gotas. Isto se deve ao fato de o ar, no ponto de orvalho, conter menos do que 4% de moléculas de água, reduzindo

para próximo de zero a chance de formação de uma gotícula estável ( $10^{-4}$  mm de diâmetro,  $H \cdot 10^8$  moléculas) através de colisões aleatórias. Assim, a ocorrência da condensação próxima ao ponto de orvalho depende de partículas maiores do que  $10^{-4}$  mm para as quais são atraídas as moléculas de água *via* ligações de hidrogênio. Nas condições naturais, o ar contém milhares dessas partículas por centímetro cúbico, as quais são denominadas Núcleos de Condensação de Nuvens. Quando o ponto de orvalho é atingido e as condições termodinâmicas permitem, estas superfícies fornecem os locais em que ocorre condensação.

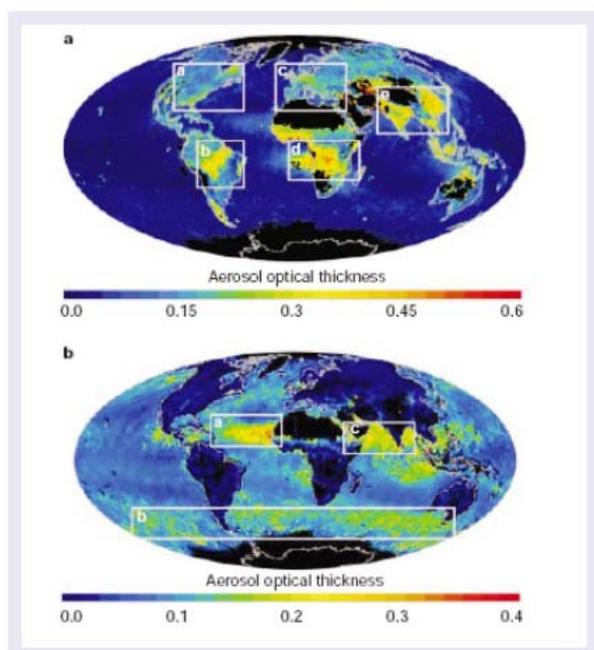


**Figura 1:** Faixas de tamanho dos constituintes atmosféricos não gasosos (escala logarítmica).

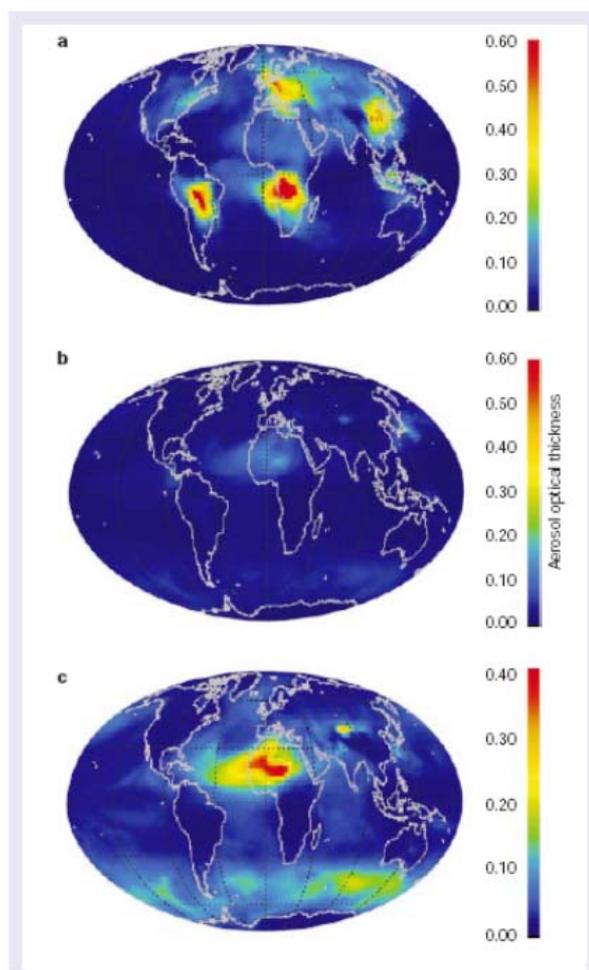
Fonte: Miller et al. (1983) apud Dingman (1994).

A maioria dos aerossóis é regional por natureza devido ao seu tempo de vida curto, à distribuição regional das fontes e à variabilidade das suas propriedades. Condições meteorológicas sazonais determinam as distâncias de transporte a partir das fontes bem como a distribuição vertical na atmosfera. Camadas elevadas de aerossóis podem ser movidas por ventos fortes e transportadas da África ou Ásia para a América e da América para a Europa. À medida que os aerossóis são transportados, suas propriedades são modificadas por deposição seca e úmida, processos físicos no interior das nuvens e reações químicas na atmosfera. A Espessura Ótica dos Aerossóis (AOT - "Aerosol Optical Thickness") descreve a atenuação da luminosidade solar pela coluna de aerossol e, portanto, serve como uma medida da concentração da coluna de aerossol. Na Fig. 2 a,b é mostrada a AOT separadamente para aerossóis finos e grosseiros durante o mês de setembro de 2000, utilizando técnicas específicas de sensoriamento remoto por satélite (KAUFMAN, 2002).

A imagem da Fig. 2 mostra partículas finas (a) na poluição provinda da América do Norte e Europa (regiões a e c), incêndios na vegetação na América do Sul e sul da África (regiões b e d) e poluição no sul e leste da Ásia (região e). b, Distribuição de AOT grosseira. Sedimentos grosseiros provindos da África (região a), partículas de sal em locais com ventos fortes no hemisfério sul (região b) and pó do deserto (região c). Modelos matemáticos de simulação dos processos atmosféricos corroboram as medidas obtidas por sensoriamento remoto e são apresentados na Fig. 3.



**Figura 2:** Partículas finas provenientes da América do Norte e Europa



**Figura 3:** Imagens de simulação de processos atmosféricos

#### 4 Deposição atmosférica

Íons de origem marinha, tais como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{K}^+$  podem ser transferidos pelas tempestades oceânicas na forma de “spray”. Sedimentos finos, normalmente originados em vastas regiões desérticas, são transportados a grandes distâncias, constituindo-se em fontes de minerais terrestres com Ca e Si. Vulcões em erupção lançam grande quantidade de poeira e gases na atmosfera. As interações entre a biosfera e atmosfera também exercem forte controle na química atmosférica já que os organismos vivos atuam fortemente nas trocas gasosas de C, S, e N.

A transferência direta de compostos químicos juntamente com precipitação é apenas um dos mecanismos de deposição atmosférica. Nuvens e neblina normalmente contêm alta concentração de solutos e a deposição acontece quando da condensação nas superfícies expostas, tais como a vegetação e o solo. A presença de umidade não é, entretanto, pré-requisito para a deposição atmosférica de compostos químicos, pois a deposição seca (“dry deposition”) de poeira e de gases é um fenômeno que ocorre naturalmente pela ação da gravidade ou pelo impacto resultante da ação do vento.

O maior projeto de monitoramento de deposição atmosférica encontra-se nos Estados Unidos da América e chama-se NADP/NTN (National Atmospheric Deposition Program / National Trends Network). A rede é um esforço cooperativo entre várias agências governamentais, dentre elas o USGS, o USDA, o Depto. Agricultura do Estado de Illinois, e várias outras instituições. Contava com 22 estações em 1978, crescendo para mais de 200 atualmente espalhadas por todos os EUA. O objetivo da rede é coletar dados sobre a química da precipitação para monitoramento espacial e temporal de tendências de longo prazo. A precipitação é coletada semanalmente sob procedimentos padronizados controlados. As amostras são enviadas ao Laboratório Analítico Central onde são analisados para Hidrogênio (acidez e pH), sulfato, nitrato, amônia, cloreto e cátions básicos, i.e., cálcio, magnésio, potássio e sódio (NADP, 2002). Alguns resultados podem ser vistos na forma de isopletas nos mapas seguintes. É interessante notar a clara tendência de acidez da precipitação no Nordeste dos EUA, uma das regiões com

maior índice de industrialização do Mundo. Isto se repete em proporção semelhante para o íon sulfato. A influência das áreas costeiras na deposição de cloretos pode ser vista na Fig. 6.

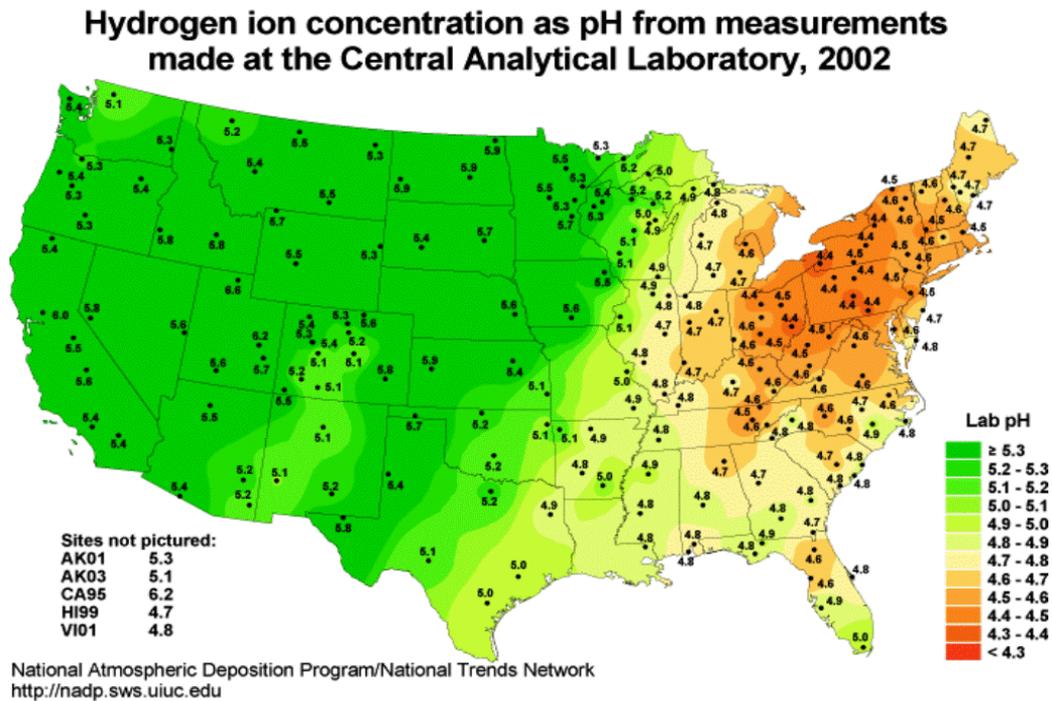


Figura 4 : Distribuição espacial do pH nos EUA de acordo com NADP (2002)

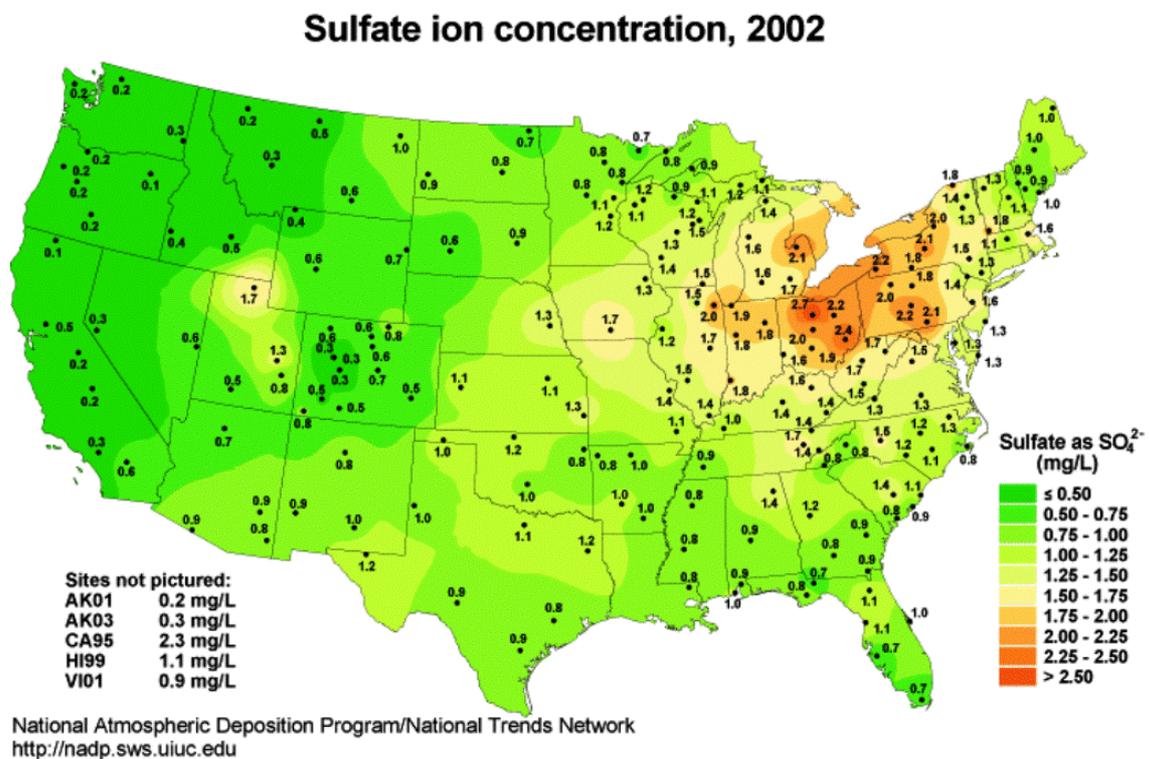
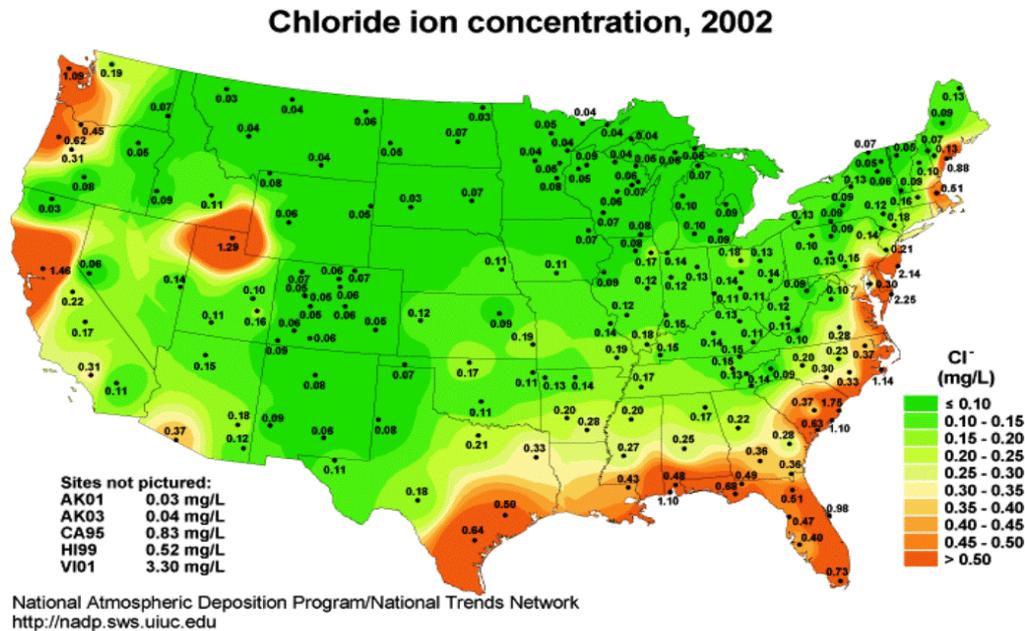


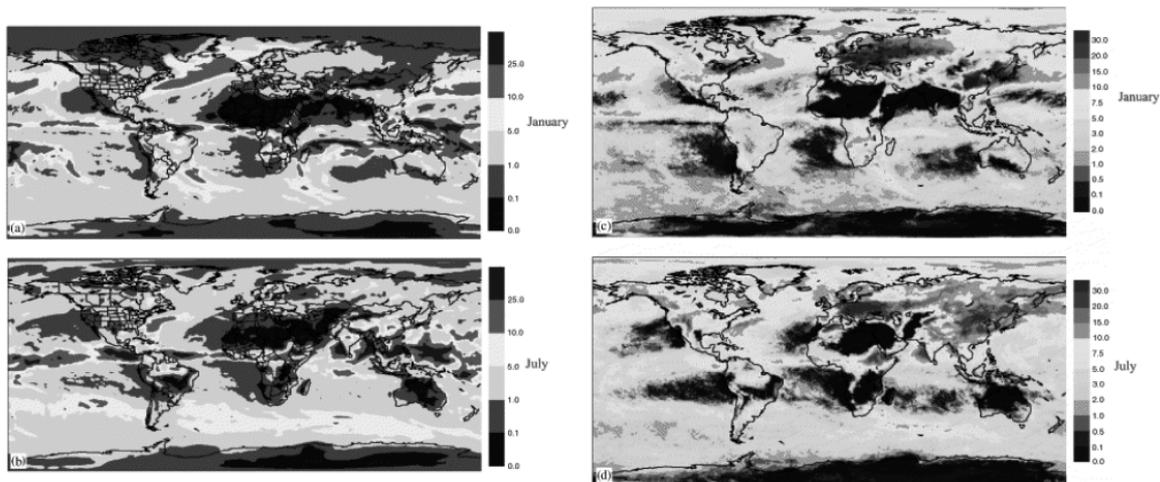
Figura 5 : Distribuição espacial de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> nos EUA de acordo com NADP(2002)



**Figura 6 :** Distribuição espacial de Cl<sup>-</sup> nos EUA de acordo com NADP (2002)

Na agenda atual dos debates sobre redução da emissão de poluentes está o mercúrio, principalmente, devido aos potenciais prejuízos à saúde humana. Os processos biológicos naturais convertem o mercúrio inorgânico emitidos na atmosfera em espécies altamente tóxicas de metilmercúrio. A bioacumulação do metilmercúrio na cadeia alimentar é a principal preocupação quanto a deposição deste elemento na biosfera. O mercúrio interage, se transforma e é transportado na atmosfera numa faixa larga de intervalos de tempo, fazendo com que a modelagem atmosférica global seja útil para a compreensão do ciclo deste elemento.

Vários modelos regionais e poucos modelos globais têm sido empregados para esta tarefa, simulando as concentrações no ar de Hg(II) e Hg(p) na forma de plumas de contaminação ao redor das fontes devido a seu tempo de vida relativamente curto comparado com o Hg(0). O mercúrio divalente é altamente reativo e eficientemente removido pela deposição seca, enquanto o particulado ( $\phi = 2,5 \mu\text{m}$ ) é removido mais lentamente. Os resultados obtidos pelo modelo GRAHM, baseado no modelo GEM (Global Environment Model) do Centro Meteorológico do Canadá indicam uma vida média do Hg(p) de aproximadamente uma semana comparada ao Hg(II) de aproximadamente um dia, o que está de acordo com medidas de laboratório. A seguir são mostrados alguns resultados de uma simulação onde pode ser comparado o campo de precipitação global (mm) com os fluxos de deposição úmida de mercúrio ( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ) (DASTOOR et al., 2002).



**Figura 7:** (a) e (b) são médias mensais das precipitações diárias (mm); (c) e (d) são resultados das simulações do modelo acumuladas mensalmente (multiplicadas por 12) do fluxo de deposição úmida para o mercúrio total ( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ )

## 5 Composição química da água de chuva: alguns exemplos

A distribuição espacial da química da precipitação reflete marcadamente a proximidade de uma dada área com as várias fontes. Assim, solutos de origem marinha como  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$  dominam a composição da chuva em climas marítimos como Llyn Brianne (País de Gales). Outros íons, tais como  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{NO}_3^-$ , tornam-se cada vez mais importantes nas proximidades das emissões industriais na parte central da Inglaterra e em Lang Branke, no interior da Alemanha. Em tais regiões  $\text{SO}_4^{2-}$  pode contribuir com até 70% da acidez das chuvas. Em contraste, íons derivados de poeiras de origem terrestre como o Ca são quantitativamente importantes em Prades, na Espanha, devido aos ventos sobre o Saara que sopram no sentido do continente Europeu.

**Tabela 2** - Composição química da precipitação ( $\text{m}\ddot{\text{d}}\text{e}\mu\text{g L}^{-1}$ ) em cinco locais da Europa

Local	pH	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{Mg}^{++}$	$\text{SO}_4^{++}$	Cl	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$
Lange Bramke (Alemanha)	4,33	26	7	23	9	104	34	48	71
Beacon Hill (Inglaterra)	4,70	89	14	41	18	112	124	46	-
Llyn Brianne (País de Gales)	5,20	93	5	16	21	47	110	5	5
Llyn Brianne (Neblina)	4,97	1032	20	72	250	281	1334	95	128
Prades (Espanha)	5,00	29	8	56	12	72	36	18	28
Allt á Mharcaidh (Escócia)	5,60	61	4	10	16	37	74	13	8

Fonte: WILBY (1997).

Substâncias emitidas para a atmosfera podem retornar quimicamente transformadas à superfície, via processos de deposição seca ou úmida. A deposição úmida ocorre através de chuva, orvalho, neblina e neve. O interesse científico na deposição úmida tem aumentado como consequência dos prejuízos ecológicos e econômicos, tais como danos às florestas, à flora e fauna aquática, e aos materiais de construção. O valor do pH da chuva se encontra na faixa de 4,5 – 5,6, considerando-se o conteúdo natural de  $\text{CO}_2$  da atmosfera e a contribuição dos compostos de enxofre. As mais importantes substâncias ácidas inorgânicas na atmosfera são o  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{HNO}_3$ . Dos ácidos orgânicos, os presentes em maior quantidade são o ácido fórmico e o ácido acético. A contribuição relativa de compostos na acidez da precipitação depende do tipo de fase aquosa e local de coleta como mostrado na Tab. (3). A contribuição dos ácidos orgânicos pode dominar em regiões tropicais e equatoriais. Fontes naturais destes ácidos ou de seus precursores são as plantas, porém, atividades antropogênicas, incluindo emissão pelo tráfego, também contribuem para a formação destes (MARTINS et al., 2002).

**Tabela 3:** Percentagem de contribuição ácida na água de chuva (HX = HCl,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , ou ácidos orgânicos)

% $\text{H}_2\text{SO}_4$	% $\text{HNO}_3$	%HX	Local
65	17	18	Alasca
38,9	33,6	27,4	Los Angeles, CA
73	31		EUA (NE) - verão
59	61		EUA (NE) - inverno
19	12	63	Brasil
70	30		Inglaterra

Fonte: MARTINS et al. (2002).

A Figura 8 foi derivada de estudos experimentais levados a cabo no território brasileiro, compilados por SILVA FILHO et al., 1995, onde podem ser vistas as concentrações  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{Mg}^{++}$  na precipitação úmida em localidades distintas. Os dados apresentados mostram uma variabilidade que somente pode ser interpretada através do conhecimento da natureza e da distribuição geográfica das prováveis fontes. Por exemplo, o sódio normalmente apresenta-se em concentrações mais elevadas próximos as regiões costeiras devido à sua origem marinha, enquanto que o aumento da concentração de potássio reflete o impacto das zonas urbanas ou industrializadas.

Um estudo de caso da composição da água da chuva sob influência de termelétrica a carvão (Figueira / PR - Brasil) mostrou que as espécies mais significativas foram:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  (Tab. 4). A presença de sulfato deve-se à combustão do carvão com alto teor de pirita, causando significativas emissões de  $\text{SO}_2$ , o qual é oxidado em  $\text{SO}_4^{2-}$  na atmosfera. Em geral,

as prováveis fontes de amônia são: a criação de animais (80%), o uso de fertilizantes (17%) e os processos industriais (1%) que, conseqüentemente geram as altas concentrações de  $\text{NH}_4^+$  encontradas na água de chuva. O grau de acidez da deposição úmida não se mostrou tão crítico quanto o esperado devido às concentrações significativas dos cátions  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{Ca}_2^+$  na atmosfera local, que se comportam como potenciais neutralizadores da ação ácida do sulfato das águas das chuvas (FLUES et al., 2003).

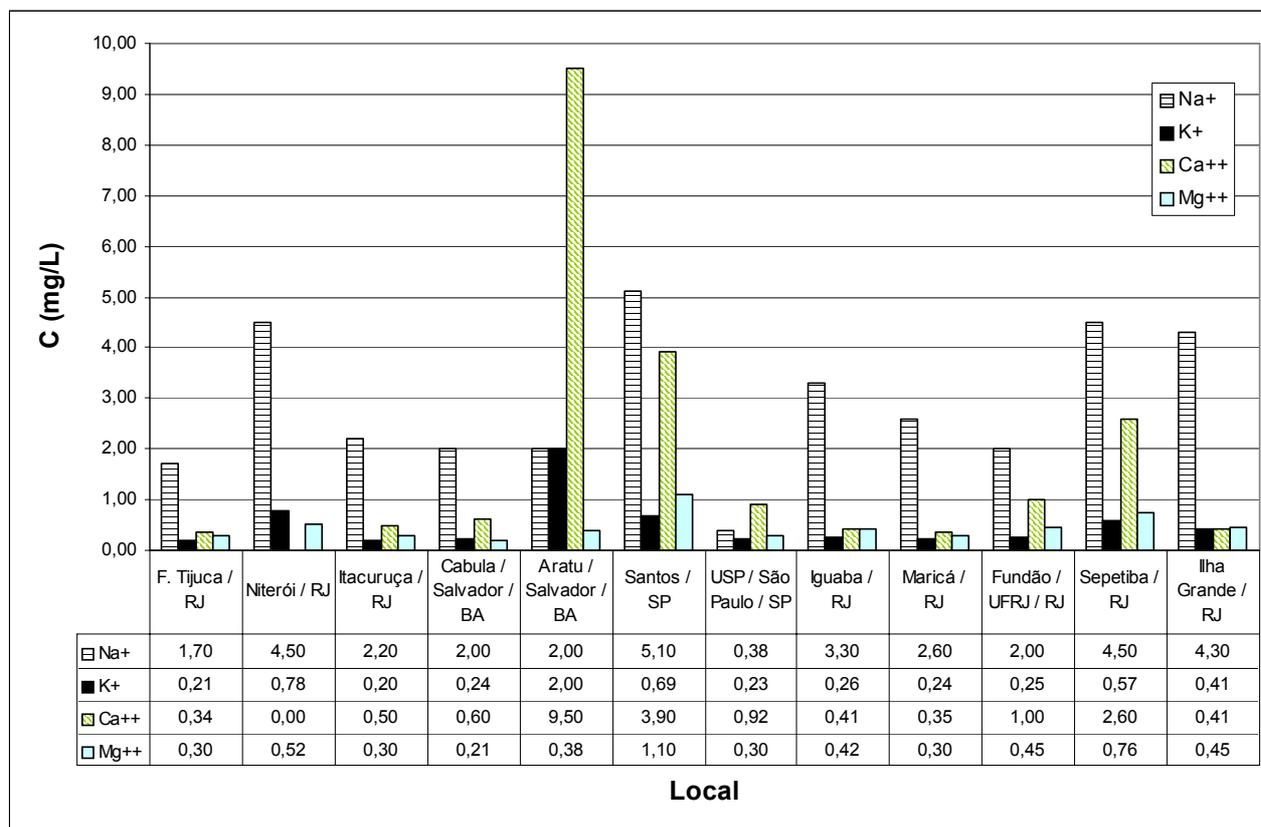


Figura 8 : Concentração de cátions (mg/L) na água de chuva em diversos pontos do Brasil.

Tabela 4 - Concentração mediana, média aritmética, intervalos e média ponderada por volume (MPV) de espécies químicas na água de chuva em Figueira - PR

Íons	Mediana	Média ( $\pm \sigma$ ) ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	Intervalo	MPV
$\text{SO}_4^{=}$	25	37 (42)	2,3 – 304	35
$\text{NO}_3^-$	11	17 (25)	1,0 – 155	13
$\text{Cl}^-$	13	17 (13)	1,3 – 70	16
$\text{NH}_4^+$	13	29 (48)	0,5 - 269	30
$\text{Ca}^{2+}$	7,5	17 (23)	0,95 - 123	16
$\text{Na}^+$	20	37 (42)	0,4 - 192	35
$\text{K}^+$	8	11 (11)	0,3 - 48	10
$\text{Mg}^{2+}$	2,5	6 (11)	0,15 - 59	6
$\text{H}^+$	9	18 (25)	0,4 - 115	14
pH	5	4,7 (0,7)	3,9 – 6,4	4,9

Em 1987 foi constatada na Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA), ocorrência de 65% de chuvas ácidas. O posto de amostragem de águas de chuva de Campos do Vale, nesta mesma época, detectou 75% de frequência de chuvas ácidas, inclusive apresentando um pH médio anual menor que o geral da RMPA. A caracterização da qualidade da chuva neste local foi realizada através de parâmetros de pH, acidez, sulfatos, nitratos, cloretos, amônia, ferro total, cálcio, magnésio, sódio, potássio. A interpretação dos dados foi efetuada associando-se as concentrações encontradas aos dados meteorológicos. A tabela (5) mostra alguns parâmetros médios de qualidade da água das chuvas na Região Metropolitana de Porto Alegre (dez/86 – nov/87). O posto IPH apresenta a segunda menor média de pH na RMPA (pH=5,2), com valor menor que a média geral anual da região. Os valores de nitratos, cloretos, e ferro dissolvidos apresentam-se próximos da média da região (MILANO, 1991).

Além dos ácidos inorgânicos, a presença de certos ácidos orgânicos tem importante contribuição para acidez atmosférica. Os ácidos carboxílicos representam entre 16 e 35% da acidez livre nas águas de chuva em ambientes urbanos e aproximadamente 65% em áreas remotas. Nos últimos anos, os ácidos orgânicos têm chamado a atenção dos pesquisadores devido à diversidade desses compostos na atmosfera. As possíveis fontes de emissão, a sua formação *in situ*, bem como a influência das variações climáticas na origem destas espécies tem sido alvo de investigações em vários locais do mundo.

Os ácidos acético e fórmico, por apresentarem baixo peso molecular e polaridade relativamente alta, são solúveis na fase aquosa e conseqüentemente estão presentes em quantidades significativas nas amostras de água de chuva, gelo, neve e névoa. Dentre os diversos ácidos orgânicos, os mono e dicarboxílicos, como, por exemplo, propiônico, maleico, oxálico, pirúvico, láctico e glicólico também são encontrados na atmosfera, porém representando uma fração bem menor. As concentrações dos diversos ácidos orgânicos em diferentes amostras líquidas da atmosfera estão apresentadas na Tab. (6). A quantidade do ácido na fase aquosa é função do coeficiente de partição gás/líquido e da taxa de precipitação da região. Em geral, os níveis destas espécies variam com a estação do ano apresentando um aumento substancial no período que precede o verão (SOUZA, 2001).

**Tabela 5** - Parâmetros médios de qualidade da água da chuva nos postos da RMPA (dez/86 – nov/87)

Posto de Coleta			Condut.	Acidez	Sulfatos	Nitratos	Cloretos	Fe Tot
No.	Nome	pH	(umho/cm)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
1	Redenção	5,5	17	4,7	6	0,27	4,55	0,67
2	Guaíba	5,5	15	5,2	6	0,31	4,34	0,55
3	Aeroporto	5,4	16	5,2	6	0,30	4,27	0,57
4	Base Aérea	5,4	19	5,1	6	0,31	4,88	0,66
5	Canoas Norte	5,6	14	4,9	6	0,28	4,18	0,61
6	BR 386	5,5	21	5,5	6	0,30	3,91	0,63
7	P.Garibaldi	5,5	14	4,6	6	0,29	4,04	0,60
8	Tabai	5,5	15	4,9	6	0,32	3,91	0,41
9	Volta Grande	6,0	22	5,4	6	0,32	3,66	0,58
10	Sanga Funda	5,5	12	4,6	6	0,29	4,14	1,12
11	Socorro	5,4	13	4,9	6	0,28	4,32	0,54
12	S.S. Caí	5,5	12	4,5	6	0,32	4,03	0,63
13	R.Cascalho	5,4	12	4,7	6	0,30	3,90	0,71
14	Campo Bom	5,4	12	4,7	6	0,28	3,92	0,36
15	Ivoti	5,4	13	4,5	5	0,28	4,48	0,42
16	SEMAE	5,4	17	4,8	6	0,29	3,93	0,64
17	P. Exposição	5,5	30	5,0	6	0,33	4,63	0,92
18	Refinaria	5,1	22	6,1	7	0,29	4,54	0,68
19	Corsan	5,5	20	5,0	6	0,31	4,25	0,76
20	RS 118	5,5	15	4,6	7	0,33	4,03	0,84
21	Gravataí	6,0	22	5,0	6	0,35	4,74	0,69
22	Morro Tapera	5,5	15	4,6	6	0,30	4,08	0,68
23	IPH	5,2	13	4,3	6	0,32	4,39	0,76
Média anual		5,5	17	4,9	6	0,32	4,20	0,65

Fonte: MILANO (2001).

**Tabela 6** - Ácidos orgânicos encontrados na fase líquida.

Natureza da Amostra	Região (ambiente)	Ácido orgânico	Concentração (a)
Chuva	Amazônia, Brasil (florestal)	Fórmico, acético	5,1; 3,0
Chuva	Washington, EUA (urbano)	Fórmico, acético	6,2; 3,0
Chuva	Dayalbagh, Índia (suburbano)	Fórmico, acético	4,6; 4,2
Chuva	Califórnia, EUA (urbano e suburbano)	Fórmico, acético, propiônico, butírico, monocarboxílicos (C <sub>4</sub> -C <sub>9</sub> )	5,5; 5,4; 0,48; 0,11; 11,8
Chuva	Tóquio, Japão (marinha)	Gloxiílico, pirúvico, benzóico, dicarboxílicos (C <sub>2</sub> -C <sub>10</sub> )	12,9; 11,9; 3,0; 83,8*
Chuva	Los Angeles, EUA (urbano)	Ácido graxos	15,0*
Nuvem	Virgínia, EUA (rural)	Fórmico, acético	5,6; 4,1
Nuvem	Califórnia, EUA (urbano)	Fórmico, acético	112,9; 56,2
Neblina	Po Vally, Itália (rural)	fórmico, acético, pirúvico	39,2; 43,0; 4,1
Neve	Glacier de la Girose, França	Fórmico, acético	1,05; 0,77
Gelo	Antártida	Fórmico, acético	1,0; 0,15

Fonte: SOUZA (2001).

(a), média das concentrações; \* µg/l

## 7 Considerações finais

Os impactos da composição química da precipitação pluviométrica, incluindo os processos de formação e a determinação de suas fontes, são temas científicos fundamentais para a compreensão dos ciclos biogeoquímicos do planeta. A partir desta breve revisão, pode-se vislumbrar uma carência de estudos experimentais em regiões tropicais. A quantificação da interação entre as deposições seca e úmida na qualidade das águas no interior das bacias hidrográficas pode ser vista como uma linha de pesquisa com potencial pouco explorado no semi-árido. Outros temas importantes dizem respeito à quantificação dos impactos das chuvas ácidas na agricultura bem como a elucidação de processos geoquímicos em escala regional. Uma constatação, digna de nota, é a existência de programas de monitoramento da deposição atmosférica nos países desenvolvidos, estes estabelecidos a mais de duas décadas, com objetivos operacionais e científicos. Apesar das dificuldades técnicas e de logística envolvidas, a montagem de uma rede nacional de monitoramento da deposição atmosférica úmida e seca no Brasil deve ser cuidadosamente considerada pela comunidade científica devido à sua importância estratégica e aos potenciais benefícios científicos e econômicos.

## Referências

- CHAPMAN, P. J.; REYNOLDS, B.; WHEATHER, H. S. Hydrochemical changes along stormflow pathways in a small moorland headwater catchment in Mid-Wales. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 151, p. 241-265, 1993.
- DASTOOR, A. P.; LAROCQUE, Y. Global circulation of atmospheric mercury: a modelling study. *Atmospheric Environment*, Norwich, v. 38, n. 1, p. 147-161, 2004.
- DINGMAN, S. L. *Physical hydrology: upper saddle river*. New Jersey: Prentice-Hall, 1993. 575 p.
- FLUES, M.; HAMA, P. Avaliação do nível de vulnerabilidade do solo devido à presença de termelétrica a carvão (Figueira, PR - Brasil). *Quim. Nova*, São Paulo, v. 26, n. 4, p. 479-483, 2003.
- KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D.; BOUCHER, O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, London, v. 419, n. 6903, p. 215-223, 2002.

- MARTINS, C. R.; ANDRADE, J. B. Química atmosférica do enxofre (IV): emissões, reações em fase aquosa e impacto ambiental. *Quim. Nova*, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 259-272, 2002.
- MILANO, L.; CASTRO, C.; DE LUCA, S. J. Qualidade da água das chuvas no Campus do Vale. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9., 1995. Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABRH, 1995. p. 159-163.
- NATIONAL DEPOSITION PROGRAM. 2003. disponível em: <<http://nadp.sws.uiuc.edu>>. Acesso em: 10 jan. 2005.
- OSÓRIO, J. C.; LOPEZ-RENDON; J. E.; HERMELIN, M. Balanço geoquímico para la cuenca alta del Rio Medellín, Cordillera Central (Antioquia, Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, Medellín, v. 27, n. 102, 2003.
- REYNOLDS, B.; POMEROY, A. B. Hydrogeochemistry of chloride in an upland catchment in Mid-Wales. *Journal of Hydrology*, Virginia, v. 99, p. 19-32, 1988.
- ROBSON, A. J. et al. Linking variations in short- and medium-term stream chemistry to rainfall inputs : some observations at Plynlimon, Mid-Wales. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 144, p. 291-310, 1993.
- SOUZA, S. R.; CARVALHO, L. R. F. Origem e implicações dos ácidos carboxílicos na atmosfera. *Quim. Nova*, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 60-67, 2001.
- WILBY, R. L. Contemporary hydrology. London: John Wiley & Sons, 1997. 360 p.
- SILVA FILHO, E. V. et al. Composição química de água de chuva na região costeira do Rio de Janeiro. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 5., Niterói, 1995. *Anais...* Niterói. 1 CD-ROM.

## SOBRE O AUTOR

### **Valdenor Nilo de Carvalho Júnior**

Engenheiro Civil (1988), Mestre em Recursos Hídricos (1992) e Doutorando pela Universidade Federal do Ceará. Suas áreas de interesse envolvem a parametrização física e a modelagem de sistemas de recursos hídricos no ambiente semi-árido. Trabalha atualmente como Pesquisador da FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos.