

Cadernos Didácticos de Ciências - Volume 2

# Cadernos Didácticos de Ciências

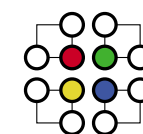
Volume 2





# Cadernos Didácticos de Ciências

Volume 2





## Ficha Técnica

Biblioteca Nacional - Catalogação na Publicação

Cadernos didácticos de ciências / Paulo Ivo Teixeira  
[et al.];  
2º v.: p. - ISBN 972-20-8417-84-5

I- Teixeira, Paulo Ivo, 1965-

CDU 556 (042.3)  
001.89 (042.3)  
373.5

As opiniões expressas nos textos apresentados nesta publicação são da responsabilidade dos autores e não reflectem necessariamente a opinião do Departamento do Ensino Secundário ou do Ministério da Educação

**Título:** Cadernos Didácticos de Ciências

**1ª Edição:** Janeiro de 2001

**ISBN:** 972-20-8417-84-5

**Edição:** Ministério da Educação, Departamento do Ensino Secundário (DES), Av. 24 de Julho, 138, 1399-026 Lisboa

**E-mail:** des@des.min-edu.pt

**Internet:** www.des.min-edu.pt

**Design e Grafismo:** SELEPRINTER, sociedade gráfica, lda.

**Fotolito e Impressão:** SELEPRINTER, sociedade gráfica, lda.

**Tiragem:** 4 000 exemplares

**Depósito Legal:** 161696/01

Publicação co-financiada pelo Fundo Social Europeu no âmbito do Programa de Desenvolvimento Educativo para Portugal - PRODEP

# Índice

Nota de abertura <i>Domingos Fernandes</i> .....	5
Biologia .....	7
Os macroinvertebrados como indicadores da qualidade da água Uma experiência no Rio Lis <i>Cláudia Pascoal e Isabel Caseiro</i> .....	9
Geologia .....	19
Águas subterrâneas Uma abordagem metodológica <i>José Martins Carvalho e Filomena Amador</i> .....	21
E se a estufa em que vivemos for inundada? A subida do nível médio do mar: algumas causas e consequências <i>César Andrade e Conceição Freitas</i> .....	39
Química .....	59
A água e as muitas águas <i>Maria Filomena Camões</i> .....	61
Física .....	79
Este líquido é a água <i>Paulo Ivo Teixeira, José M. Tavares e Margarida M. Telo da Gama</i> .....	81
A medida em Física <i>Fernando Parente</i> .....	91

---

# Nota de abertura

*Domingos Fernandes\**

*O Departamento do Ensino Secundário, no âmbito da Revisão Curricular, tem promovido a publicação de materiais de apoio aos docentes de diversas disciplinas. A Coleção Cadernos Didácticos de Ciências, voltada preferencialmente para os professores de Biologia, Geologia, Física e Química, pretende ser um espaço de divulgação científica e didáctica promotor de um ensino renovado das ciências onde a componente experimental seja valorizada.*

*Efectivamente a Educação em Ciências constitui uma área essencial da formação básica e secundária dos cidadãos, na qual o trabalho prático e experimental se assume como uma dimensão fundamental, de elevado valor formativo, estruturante na construção de uma cultura científica, indispensável ao cidadão do século XXI.*

*No 2º volume desta colecção, a água constitui o tema central. A sua problemática, de inquestionável importância e actualidade, é trabalhada à luz de perspectivas diversificadas que facilitam a abordagem transversal de áreas-chave no âmbito da educação para a cidadania e para a sustentabilidade.*

*Não podemos deixar de agradecer as contribuições recebidas da Comissão de Acompanhamento do Ensino das Ciências, criada no âmbito do Departamento do Ensino Secundário, para a consecução deste projecto de apoio aos professores de Ciências. Um agradecimento especial é naturalmente devido aos autores e revisores científicos e didácticos dos textos incluídos neste número dos Cadernos Didácticos de Ciências, pelo interesse e especial cuidado que lhe dedicaram.*

\* Director do Departamento do Ensino Secundário



Biologia



# Os Macroinvertebrados como Indicadores da Qualidade da Água

Uma Experiência no Rio Lis

*Cláudia Pascoal e Isabel Caseiro*

## Introdução

A avaliação e a monitorização dos ecossistemas aquáticos têm sido essencialmente baseadas em medidas químicas e bacteriológicas da qualidade da água. Contudo, estes parâmetros não providenciam, *per se*, a informação adequada sobre o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos, por dizerem muito pouco sobre o efeito da poluição nos organismos vivos. Por exemplo, uma fracção de uma substância potencialmente tóxica, estimada por análise química, pode encontrar-se numa forma inócua para os organismos aquáticos ou, a sua toxicidade pode ser amplificada ou reduzida por conjugação com outras substâncias. Por outro lado, se uma descarga não é contínua corremos o risco de não a detectar através de análises físico-químicas ou bacteriológicas. No entanto, os seus efeitos são registados pela maioria dos seres vivos e podem conduzir a perturbações no equilíbrio existente. Será, portanto, de toda a conveniência complementar tais análises à água com um estudo mais pormenorizado da comunidade biótica. Tal estudo baseia-se no pressuposto de que a contaminação produz alterações estruturais nas comunidades, como seja, no número de organismos, na sua distribuição e biomassa e alterações funcionais no ecossistema. Desta forma, os efeitos de uma dada fonte de poluição podem ser avaliados através do estudo da própria comunidade ou do funcionamento do ecossistema.

Os macroinvertebrados bentónicos incluem larvas e ninfas de insectos, moluscos e crustáceos que vivem no fundo do rio e servem de alimento aos peixes (Parker, 1992). As comunidades bentónicas são dotadas de elevada sensibilidade respondendo a diversos factores inerentes ao próprio biótopo, como a velocidade da corrente, o tipo de substrato e a disponibilidade de alimento bem

**Cláudia Pascoal** nasceu em Évora em 1960. Concluiu a Licenciatura em Biologia na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra em 1990. Concluiu o Mestrado em Ciências do Ambiente na Universidade do Minho em 1998. Foi professora do Ensino Secundário entre 1990 e 1998. É Assistente do Departamento de Biologia da Universidade do Minho desde 1998 e está a preparar a sua tese de Doutoramento na área de Ecologia de sistemas lóticos.

**Isabel Cristina da Costa Caseiro** nasceu a 27 de Junho de 1968, em Leiria, é casada e reside em Leiria. É licenciada em Biologia (Ramo de Formação Educacional) pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra em 1991 e obteve o grau de Mestre em Ciências do Ambiente (especialização em Ensino), pela Universidade do Minho, em 1997. É Professora do Quadro de Nomeação Definitiva do 11º grupo B da Escola Secundária Afonso Lopes Vieira desde 1997 e Formadora nas áreas e domínios da Biologia e Ciências do Ambiente. No presente ano lectivo lecciona as disciplinas de Biologia e de Técnicas Laboratoriais de Biologia, bloco 3, ao décimo segundo ano de escolaridade e a disciplina de Técnicas de Saúde ao décimo ano de escolaridade. Desempenha ainda o cargo de Delegada de Segurança da escola e Coordenadora do Gabinete de Saúde e Segurança.

Consultor

**Mário Jorge Freitas** é licenciado em Biologia, em 1981, pela Universidade do Porto e Doutorado em Educação pela Universidade do Minho, em 1999. Foi professor dos Ensinos Básico e Secundário de 1978 a 1983. É professor Auxiliar do Departamento de Currículo e Metodologias de Educação do Instituto de Educação da Universidade do Minho. Tem-se dedicado à investigação em Didáctica das Ciências e à Formação Inicial e Contínua de Professores, em particular de professores de Biologia-Geologia e de Ciências da Natureza.

É autor e co-autor de vários artigos em revistas nacionais e estrangeiras de Educação e de manuais de Ciências para o Ensino Básico e Secundário. É actualmente Director Geral do Parque Nacional Peneda Gerês.

como a modificações do estado da água, pelo que se têm revelado úteis no estudo de ecossistemas aquáticos. Sendo organismos consideravelmente sedentários, os diferentes grupos não conseguem escapar a alterações ambientais adversas, podendo exibir diversos graus de tolerância à poluição, acumulando essa informação ao longo do tempo (Fellrath, 1980). Pelos motivos apontados têm sido considerados úteis na avaliação e monitorização da qualidade da água (Fontoura, 1985; Pascoal, 1997).

Este trabalho foi desenvolvido com o objectivo de envolver alunos e professores no problema concreto da poluição fluvial e também de dar a conhecer métodos simples de avaliação biológica da qualidade da água. O método utilizado foi proposto por Collins (1994) e é de fácil aplicação por parte dos alunos tendo, por isso, elevado valor pedagógico. Na concretização do projecto participaram os alunos do Clube do Ambiente da Escola Secundária Afonso Lopes Vieira de Leiria.

À semelhança do que tem vindo a ser feito noutros países, as Escolas podem ter um papel activo na vigilância e monitorização da qualidade da água dos rios da sua região. Estes projectos de Educação Ambiental permitem, se houver interacção com outras Escolas, a caracterização a nível nacional dos cursos de água em termos geográficos, geológicos, químicos e biológicos.

### Seleção das estações de amostragem

Para a selecção das estações de amostragem no rio Lis foi efectuado o reconhecimento prévio do curso de água acompanhado da análise de mapas ou cartas da bacia hidrográfica, tendo sido contemplados os seguintes aspectos: a presença de afluentes, de centros populacionais, actividades agro-industriais e a acessibilidade dos locais.

Para testar o impacto da cidade de Leiria no rio Lis seleccionaram-se duas estações de amostragem situadas respectivamente a montante (E1) e a jusante (E2) do referido centro urbano (fig.1).

### Caracterização das estações de amostragem

Para a caracterização das estações de amostragem procedeu-se ao preenchimento da ficha de campo, a seguir apresentada, que permitiu a identificação das amostras e ajudou na interpretação dos resultados.

### Os Macroinvertebrados como Indicadores da Qualidade da Água



Figura 1 Localização das estações de amostragem E1 e E2 seleccionadas ao longo do troço do rio Lis.

### Ficha de campo

Curso de água: Rio Lis

Distrito: Leiria Concelho: Leiria

Data da colheita: 14 de Junho de 1995

Local de amostragem: E1 E2

Método de amostragem: Rede de mão

Tipo de curso de água:

Nascente: E1 Curso médio: E2 Foz: \_\_\_\_\_

Corrente:

Rápida: E1 E2 Lenta: \_\_\_\_\_



Tipo de substrato:

Blocos: \_\_\_ Calhaus: [E1](#) [E2](#) Areia: [E1](#) [E2](#) Lodo: \_\_\_

Profundidade:

< 10 cm: \_\_\_ 10 - 30 cm: [E1](#) [E2](#) 30 - 50 cm: \_\_\_

50 - 100 cm: \_\_\_ > 1 m: \_\_\_

Flora aquática:

a) Existente: [E1](#) [E2](#) Inexistente: \_\_\_

b) Escassa: \_\_\_ Abundante: [E1](#) [E2](#) Muito abundante: \_\_\_

c) Superficial: [E1](#) [E2](#) Bentónica: \_\_\_

d) Uma espécie: \_\_\_ Muitas espécies: [E1](#) [E2](#)

Fauna piscícola:

Observada: [E1](#) [E2](#) Não observada: \_\_\_

Aspecto da água:

Límpida: \_\_\_ Pouco turva (vê-se o fundo facilmente): [E1](#)

Turva (dificuldade em ver-se o fundo): [E2](#) Muito turva: \_\_\_

Poluição física:

Não observada: \_\_\_

Observada (especifique): [E1: metais, plásticos](#) [E2: metais, plásticos, madeiras, pneus, vidros, electrodomésticos](#)

Temperatura da água: [E1=16,9°C](#) [E2=16,5°C](#) pH da água: [E1=6,8](#) [E2=7,4](#)

Dados climatéricos: Céu limpo e sol aberto

### Amostragem de macroinvertebrados

Durante o processo de amostragem interessa recolher o maior número e variedade possíveis de macroinvertebrados de forma a que a colheita seja representativa da fauna local.

### Os Macroinvertebrados como Indicadores da Qualidade da Água

A amostragem foi efectuada pelo método da rede de mão. A rede de mão é constituída por uma armação metálica onde se fixa uma rede cónica com um comprimento de 50 cm e uma malha de 0,6 mm a 0,9 mm, sustentada por um cabo de madeira com cerca de 1,5 m (fig.2). O operador deslocou-se contra a corrente remexendo o substrato arenoso com os pés, desalojando os macroinvertebrados que, ficando em suspensão, eram recolhidos pela abertura da rede. Para que os resultados fossem comparáveis o esforço de amostragem foi idêntico em ambos os locais de recolha, utilizando-se, para isso, o tempo efectivo de cinco minutos. Complementarmente foram exploradas as pedras imersas e a vegetação existente em cada local e extraídos os organismos bentónicos presentes. Os macroinvertebrados que se fixavam a estes substratos foram removidos à mão (fig. 3), lavados para um balde ou para a abertura da rede e adicionados ao resto da amostra.

O material recolhido foi colocado em recipientes de plástico com tampa e devidamente etiquetados, onde foi registado o número da amostra, o local e a data da recolha.



Figura 2 Amostragem de macroinvertebrados bentónicos pelo método da rede de mão.





Figura 3 Extracção de organismos fixos à superfície de pedras imersas.

### Tratamento das amostras

O material foi de imediato transportado para o laboratório onde as amostras foram lavadas com um jacto de água utilizando um jogo de crivos metálicos com uma malha de tamanho decrescente. O material correspondente a cada crivo foi colocado em tabuleiros, nos quais os organismos foram separados, com a ajuda de uma pinça, e colocados em pequenos frascos com álcool a 70% (fig. 4).

dos, com a ajuda de uma pinça, e colocados em pequenos frascos com álcool a 70% (fig. 4).



Figura 4 Triagem dos macroinvertebrados recolhidos.

### Os Macroinvertebrados como Indicadores da Qualidade da Água

Na identificação e contagem dos organismos foi importante recorrer a lupas para os distinguir (fig. 5). Os grupos sistemáticos foram identificados de acordo com o método proposto por Collins (1994). Para uma identificação mais detalhada aconselha-se a consulta de Fontoura (1985) e de Tachet *et al.* (1994).

### Avaliação da qualidade da água

Os macroinvertebrados identificados, a partir das amostras recolhidas em ambas as estações de amostragem (E1 e E2), são apresentados no Quadro I que discrimina os indicadores da qualidade da água, ordenados por grau crescente de tolerância à poluição. As unidades sistemáticas representadas por um único indivíduo não foram tidas em conta pois o seu aparecimento pode ser devido ao acaso.



Figura 5 Identificação à lupa de larvas de libelinhas (Odonatas).

(1) <i>Chironomus tentans</i> (larva)	(2) Larva de <i>Chironomus tentans</i> (larva)	(3) Larva de <i>Chironomus tentans</i> (larva)	(4) <i>Tubificoides benedicti</i> (larva)
	<b>E 1</b>		
(5) Larva de <i>Chironomus tentans</i>	(6) <i>Chironomus tentans</i> (larva)	(7) <i>Chironomus tentans</i> (larva)	(8) Larva de <i>Chironomus tentans</i>
<b>E 1</b>	<b>E 1</b>	<b>E 1; E 2</b>	<b>E 2</b>
(9) <i>Chironomus tentans</i> (larva)	(10) <i>Chironomus tentans</i> (larva)	(11) <i>Chironomus tentans</i> (larva)	(12) <i>Chironomus tentans</i> (larva)
<b>E 2</b>	<b>E 2</b>		<b>E 1; E 2</b>
(13) <i>Chironomus tentans</i> (larva)	(14) <i>Chironomus tentans</i> (larva)	(15) <i>Chironomus tentans</i> (larva)	(16) <i>Chironomus tentans</i> (larva)
			<b>E 1; E 2</b>

Quadro I - Macroinvertebrados indicadores da qualidade da água [Collins, 1994]. A cada organismo está associado o código de entrada no Quadro II. Estão assinalados os indivíduos presentes para cada estação de amostragem 1 e 2 (E1 e E2).

Por interpretação do quadro I verificou-se que na primeira estação de amostragem (E1) estava presente um maior número de macroinvertebrados sensíveis à poluição relativamente ao segundo ponto de amostragem (E2), onde predominavam organismos com maior grau de tolerância à poluição.

Seguidamente a cada *taxon* do Quadro I foi associado um código que entrou no Quadro II. A presença / ausência relativa dos organismos permitiu avaliar a qualidade da água de cada local (Quadro II).

Quadro II - Chave de consulta para a avaliação da qualidade da água pela presença (P) / ausência (A) de macroinvertebrados.

Qualidade da Água	Macroinvertebrados presentes (P) / Ausentes (A)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Nenhum
Excelente	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	A	A	A	P	-
Boa	A	A	A	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	-
Satisfatória	A	A	A	A	A	A	PP	P	P	PP	P	P	P	P	-
Fraca	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	PP	P	PP	-
Má	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	P

A consulta da quadro II indicou que o curso de água junto à nascente (E1) apresentava uma qualidade boa, mas não excelente. Estes dados sugerem a contaminação do sistema hídrico subterrâneo originada por actividades humanas e/ou pelas características naturais de certas áreas da bacia do Lis, podendo levar à contaminação das reservas aquíferas ou à perda de qualidade da água devido à saturação dos filtros naturais. É conhecido o costume de atirar animais mortos e “lixos” vários para os algares do maciço calcário da serra de Aire e Candeeiros. É sabido também que a generalidade das povoações serranas não dispõe de rede de saneamento básico, pelo que os dejectos humanos entram directamente na rede cársica indo contaminar as águas de circulação interna dos calcários. No entanto, a fraca pressão demográfica na área e a grande quantidade de água em circulação levam a uma minimização do problema.

Na segunda estação de amostragem (E2) a qualidade da água revelava-se entre o satisfatório e o fraco, sugerindo que a presença da cidade de Leiria contribuía para a diminuição da qualidade biológica do curso de água. Estes dados

confirmaram que a influência antropogénica do centro urbano se fez sentir na comunidade biótica. Os esgotos domésticos e o seu deficiente tratamento são responsáveis por uma parte significativa da poluição das águas fluviais. A sua importância adquire maior relevo nas concentrações populacionais de maior dimensão devido à grande quantidade de efluentes quer domésticos quer resultantes de pequenas indústrias do ramo alimentar (lagares de azeite, destilarias, matadouros e fábricas de conservas), e outras bem mais nocivas com destaque para os curtumes, as pequenas metalurgias e as estações de serviço, que lançam, directa ou indirectamente nas águas fluviais, produtos químicos variados. As pocilgas e as vacarias, pelo elevado número de unidades, pela dimensão de algumas delas e pela localização concentrada em determinadas áreas, como na ribeira dos Milagres, têm uma importância determinante no processo de poluição deste sistema fluvial.

**Agradecimentos**

À Escola Secundária Afonso Lopes Vieira, em Leiria, especialmente ao Dr. Jorge Baptista e ao Departamento de Biologia da Universidade do Minho, particularmente aos Professores Doutores Pedro Gomes e Fernanda Cássio.

**Bibliografia**

Collins, N. (1994). River survey. *Catalyst*. GCSE Science Review, vol.5, nº2.

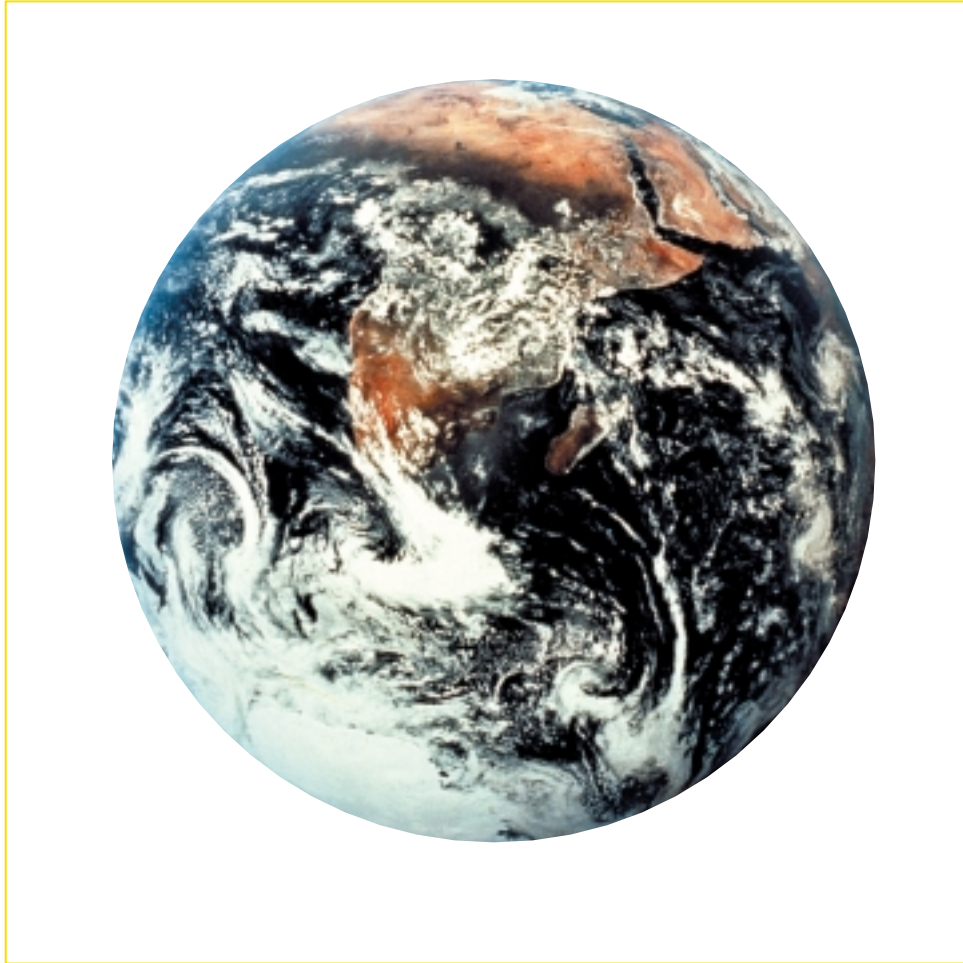
Fellrath, M. (1980). *La rivière milieu vivant*. Ed. Payot Lausanne.

Fontoura, P. (1985) *Manual de vigilância da qualidade das águas superficiais - Avaliação Biológica da Qualidade da Água*. Instituto de Zoologia Dr. Augusto Nobre. Fac. Ciências. Porto.

Pascoal, C. (1997). Contribuição dos macroinvertebrados para a caracterização ecológica do troço superior do rio Cávado. Dissertação de Mestrado em Ciências do Ambiente. U.Minho. Braga.

Parker, S. (1992). *Rios e Lagos*. Enciclopédia Visual. Verbo. 4ª Ed.

Tachet, H.; Bourmand, M. e Richoux, P. (1994). *Introduction à l'étude des macroinvertebrés des eaux douces*. 4ª ed. Université Claude Bernard. Lyon.



Geologia





# Águas Subterrâneas

Uma abordagem metodológica

*José Martins Carvalho, Filomena Amador*

## 1. Introdução

As águas subterrâneas integram a componente não visível e mais lenta do ciclo da água. O tempo decorrido entre a infiltração de uma gota de água da chuva no terreno até à sua aparição em nascentes, galerias, poços, furos, ou outras manifestações naturais ou forçadas, pode variar entre alguns meses a vários anos; centenas ou milhares de anos no caso das águas minerais e termominerais de circuito lento e profundo. Este ciclo é movido pela acção da gravidade, embora para as águas mais profundas possam ser aduzidos outros mecanismos.

Quando o cidadão comum é confrontado com as questões da água (disponibilidade, qualidade, adequabilidade para usos consumptivos e não consumptivos, incluindo os energéticos e os conflitos locais ou internacionais) vem à mente a água superficial: os rios, os grandes lagos, as barragens e as albufeiras, as grandes obras de adução do passado ou actuais. Atente-se, por exemplo, a nível nacional, nas polémicas em volta das barragens do Alqueva ou do Côa, do Aqueduto das Águas Livres, na grande adutora da barragem de Castelo de Bode, enfim, no próprio Plano Nacional da Água.

O grande público das cidades, e os fazedores de opinião, deixam-se impressionar pelas grandes massas de água superficial e esquecem que o futuro passa pelo desenvolvimento harmonioso da totalidade do Ciclo da Água.

O balanço hídrico à escala do planeta conduz a taxas de distribuição que contrariam essa visão redutora: de acordo com Anon (1978), 96,5 % da água da Terra corresponde à água salgada dos oceanos. A água doce é avaliada, apenas, em 3,5 % do total. Desta magra fatia, 69% é constituída por água das calotes glaciárias, icebergs, glaciares e neves eternas, 30% a águas subter-

**Maria Filomena M. F. Amador** é licenciada em Ciências Geológicas - Ramo de Formação Educacional pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Doutora em Didáctica das Ciências pela Universidade Complutense de Madrid. Professora Auxiliar na Universidade Aberta desde 1996. É actualmente Vice-Presidente da Associação Portuguesa de Geólogos. É autora e co-autora de vários artigos de Didáctica das Ciências, e em particular de Didáctica da Geologia.

**José Martins Carvalho** é licenciado em Ciências Geológicas (Faculdade de Ciências da Universidade do Porto). Professor Auxiliar Convidado na universidade de Évora. Responsável pelo módulo 1 – Recursos Hidrogeológicos, no Mestrado de Prospecção e Avaliação de Recursos Geológicos da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Europeólogo (Federação Europeia de Geólogos). Como geólogo profissional tem participado em projectos de hidrogeologia no domínio do ordenamento do território e desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos em Portugal, Espanha, Moçambique, Guiné-Bissau e Brasil. Mais de meia centena de artigos publicados em revistas nacionais e internacionais. Várias dezenas de comunicações, conferências e palestras em Portugal e estrangeiro.

**César Freire de Andrade** é Professor Auxiliar com Agregação no Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, onde se licenciou e doutorou em Geologia. Exerce actividade de investigação científica e aplicada no Centro de Geologia daquela Universidade desde 1980 nos domínios da Geologia do Litoral. Os seus interesses centrais são a sedimentologia, a geomorfologia e a dinâmica da faixa costeira a escalas temporais curtas, incluindo análise e previsão de impactos relacionados com a actividade antrópica e com os eventos singulares de alta energia.

**Maria da Conceição Freitas** é licenciada, mestre e doutora em Geologia pela Universidade de Lisboa. Exerce actividade docente e de investigação no Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da mesma Universidade, onde é Professora Auxiliar. Integra o corpo de investigadores do Centro de Geologia da Universidade de Lisboa onde tem desenvolvido nos últimos quinze anos investigação científica e aplicada nos domínios da Geologia do Litoral e da Geologia do Ambiente. Os seus interesses centrais são a sedimentologia, a geomorfologia e a dinâmica da faixa costeira a diferentes escalas temporais, incluindo os impactos relacionados com a actividade antrópica e a variação climática global.

Consultor

**Luís Manuel Ferreira Marques** é licenciado em Geologia pela Universidade de Coimbra, doutorado em Didáctica das Ciências (Geociências) pela Universidade inglesa de Keele. Professor da Universidade de Aveiro. Coordenador do Mestrado em Ensino da Geologia e Biologia da Universidade de Aveiro. Investigador do Centro de Investigação Didáctica e Tecnologia na Formação de Formadores. Colaborador em vários Projectos de Investigação nacionais e internacionais. Co-autor de vários trabalhos dirigidos para a Formação de Professores de Ciências. Membro de várias organizações científicas portuguesas e estrangeiras.

râneas e uns meros 1 % ao conjunto das águas superficiais, da atmosfera e da água biológica.

Cerca de 50% dos portugueses consomem em casa água subterrânea que alimenta os sistemas de abastecimento público que os servem. Há menos de dez anos aquela percentagem era superior a 70%. É crescente o número dos consumidores de água engarrafada (águas minerais naturais ou de nascente, obrigatoriamente subterrâneas) que leva os sabores puros das montanhas selvagens e impolutas a uma crescente e desenraizada população urbana. A pequena agricultura é maioritariamente realizada a partir de água subterrânea. A tendência para haver diminuição da utilização de águas subterrâneas em abastecimentos públicos em Portugal deve-se à conjugação de vários factores, Carvalho (2001 a): (i) à progressiva desertificação dos campos que engrossa as populações citadinas, (ii) ao facto do padrão de distribuição dos recursos de água subterrânea não favorecer geralmente a sua utilização em grandes aglomerados urbanos, e (iii) à matriz técnico-cultural prevalecte nas políticas de ordenamento do território que, nem sempre com razões objectivas, privilegia a utilização de águas superficiais.

No entanto, aqui e ali ouve-se e lê-se nos media que uma lixeira (ou mesmo um aterro sanitário) polui as águas dos poços que abastecem esta ou aquela povoação, que o grande túnel rodoviário ou hidroeléctrico secou as nascentes desta ou daquela área, que a água deste ou daquele abastecimento (de origem superficial) está imprópria para consumo e que ali ou acolá, as povoações preferem, ou voltaram a utilizar as águas de origem subterrânea.

Realmente a água subterrânea é um recurso geológico de valor económico, social e político ameaçado: questões ligadas à quantidade e qualidade, à contaminação, à degradação e à reabilitação estão na ordem do dia. A essas questões correspondem acções de gestão: investigação pura e aplicada, monitorização, protecção e conservação - a pensar nas gerações futuras - e, claro, a pesquisa e a captação, motor de todas as outras medidas.

Ora, todas as actividades ligadas às águas subterrâneas obrigam à conceptualização dos aquíferos, unidade fundamental da hidrogeologia. Os profissionais da hidrogeologia são os hidrogeólogos que no seu dia a dia executam tarefas a nível da investigação, da pesquisa e captação, do controlo dos recursos e da contaminação das águas subterrâneas.

As presentes notas foram concebidas para servirem de suporte básico à dinamização de actividades de iniciação no domínio das águas subterrâneas. Em campo tão vasto as opções assumidas podem ser controversas. O aprofundamento do tema, a um nível generalista, pode ser conseguido, por exemplo, em Price (1996).

## 2. Investigação e experimentação em hidrogeologia

A hidrogeologia é a ciência das águas subterrâneas e enquadra as relações entre os processos geológicos e a água (Fetter, 1994). É um ramo da hidrologia entendida como a ciência que estuda a ocorrência, distribuição, movimento e fenómenos físico-químicos de todas as águas da Terra.

É uma ciência interdisciplinar: ao hidrogeólogo é exigido treino em geologia, hidrologia, química, matemática, física e computação. A modelação de sistemas hidrogeológicos é hoje uma ferramenta de rotina. Capacidade de comunicação oral e escrita é outro requisito essencial aos hidrogeólogos para integrar as equipas multidisciplinares em que operam e para veicular informação para a Sociedade que os acolhe.

A hidrogeologia é, porventura, o ramo das ciências geológicas que mais se desenvolveu nas últimas três décadas (Fetter, 1994). Este crescimento tem sido marcado, a partir dos meados da década de 70, pelo incremento progressivo de actividades no domínio das questões de transporte de massa, remediação e, mais recentemente, da biorremediação (Belitz, 2001).

Estas alterações na configuração base da ocupação dos hidrogeólogos, e portanto do seu perfil, e o peso crescente do treino computacional, têm levado a esquecer a faceta básica desta ciência: as águas subterrâneas ocorrem no campo e é neste que toda a actividade científica e tecnológica deve começar.

Deste ponto de vista, um hidrogeólogo é credível se molhar os pés na água ou beber da água dos aquíferos que estuda... Antes de ser perito em modelação ou geoestatística, o hidrogeólogo integra as águas subterrâneas no ciclo da água, interpreta as formações geológicas em termos hidráulicos e sabe comunicar com os profissionais de outras áreas na resolução de problemas comuns.

## 2.1. A classificação de aquíferos

O conceito de aquífero (formação geológica de onde é possível extrair água de forma económica sem impactes ambientais negativos) implica a sua classificação em termos litológicos, hidrodinâmicos e hidroquímicos e uma abordagem na óptica do consumidor.

A conceptualização de aquíferos é a tarefa básica que qualquer investigação ou trabalho de hidrogeologia impõe. Não é possível fazer gestão do território sem conhecer os aquíferos que nele ocorrem. E não se pode estabelecer um modelo matemático de um sistema hidrogeológico sem que se dominem cenários credíveis da caracterização geológica, hidrodinâmica, hidroquímica e hidrobiológica no espaço e no tempo.

A caracterização geológica pressupõe a análise dos aspectos seguintes (condicionadores das condições de armazenamento e de circulação da água subterrânea, respectiva qualidade físico-química e condições aos limites): (i) domínio do espaço subterrâneo que controla a entrada da água no sistema, a sua circulação e a descarga, e (ii) a dimensão e continuidade dos espaços vazios onde a água circula.

Atendendo à estrutura os aquíferos podem ser classificados em:

- porosos, quando a água se move através de poros de grandeza milimétrica que constituem o reservatório geológico e de que o exemplo típico são as areias e cascalheiras dos depósitos aluvionares, por exemplo as aluviões do Tejo, do Mondego ou do Douro, entre outros;
- fissurados, quando o reservatório geológico apresenta fissuras e fendas mais ou menos contínuas como é o caso dos granitos e xistos do Maciço Antigo;
- cársicos, em rochas solúveis geralmente calcários e dolomias, onde acções mecânicas e químicas geram cavidades de dissolução que no limite, havendo continuidade hidráulica, constituem cursos de água subterrâneos, caso do Maciço Calcário Estremenho e do anticlinal de Vila Viçosa-Extremoz-Cano, por exemplo.

Quanto à localização geográfica os aquíferos podem ser classificados em:

- costeiros, se estão em ligação hidráulica com o mar;
- interiores ou continentais, caso a ligação hidráulica seja feita a rios e lagos.

Em termos de modo de jazida, considerando a estrutura geológica e as características hidrodinâmicas, os aquíferos podem ser classificados simplesmente em:

- livres, se a água se encontra à pressão atmosférica;
- confinados ou cativos, se a água estiver sob pressão o que pode determinar a ocorrência de furos e poços repuxantes isto é, com artesianismo positivo.

Claro que uma dicotomia deste tipo é falaciosa, havendo na natureza a gama de variação completa entre os dois tipos. É habitual, ainda, considerar os aquíferos suspensos, constituídos por pequenos sistemas livres localizados acima da zona saturada e suportados por corpos lenticulares de baixa permeabilidade que funcionam com camada confinante inferior.

Algumas das macropropriedades dos aquíferos são indiciadas a partir do simples conhecimento da classificação em termos desses grandes grupos. Por exemplo: aquíferos porosos, de granulometria grosseira, podem fornecer caudais muito avultados, particularmente se estiverem em ligação hidráulica com águas superficiais tendo, ainda, apreciável potencial de autofiltração. Os aquíferos fissurados geralmente permitem apenas caudais compatíveis com pequenas extracções locais. Os aquíferos cársicos podem mobilizar caudais enormes, de forma irregular no espaço e no tempo, e são extremamente vulneráveis à contaminação.

A caracterização geológica de um aquífero é, portanto, fruto de observações fisiográficas e geológicas que conduzem à percepção em três dimensões, da geometria do reservatório. É uma tarefa que usa, basicamente, os métodos da geologia.

## 2.2. Caracterização hidrodinâmica dos aquíferos

O entendimento das condições de circulação da água nos aquíferos ultrapassa os limites da geologia. A hidrodinâmica das águas subterrâneas resulta do casamento da hidráulica com a geologia. Uma atitude mental apoiada naquelas disciplinas é indispensável para a resolução de problemas hidrogeológicos comuns. É, por exemplo, o caso do estudo do fluxo e do transporte de massa nos aquíferos, da previsão dos caudais desta ou daquela captação de água e



da análise do impacte das grandes obras de engenharia nos ecossistemas. O comportamento hidrodinâmico do aquífero é condicionado pelos factores seguintes (Castany, 1982): (i) condições e tipos dos limites, caudais das entradas, dos escoamentos e das saídas, (ii) variação das reservas de água subterrânea, (iii) regime de escoamento, (iv) estado inicial e as variações no tempo dos caudais, dos níveis piezométricos e das reservas reguladoras. O comportamento hidrodinâmico exprime-se em termos de modelo conceptual pelo balanço hídrico. Este comportamento é regido pelas leis da hidrodinâmica subterrânea. O modelo conceptual é a base do estabelecimento dos modelos matemáticos, hoje ferramenta indispensável ao hidrogeólogo. O comportamento hidrodinâmico dos aquíferos pode ser descrito através de várias leis e expressões matemáticas e hidráulicas que repousam no conhecimento de diversos parâmetros (parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos). Por comodidade, os parâmetros podem ser agrupados em vários grupos, conforme se descreve no Quadro I.

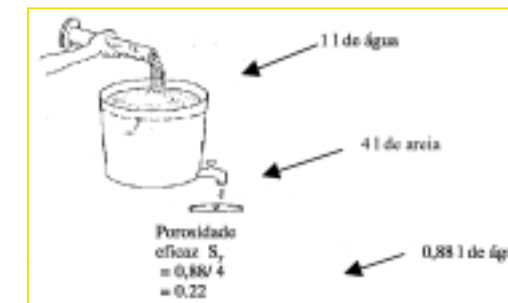
Quadro I - Parâmetros Hidrodinâmicos dos Aquíferos

Tipo	Designação
Função capacitiva (Funcionamento como reservatório)	(S <sub>y</sub> ) Porosidade eficaz (S) Coeficiente de armazenamento (S <sub>0</sub> ) Coeficiente de armazenamento específico
Função transmissiva (Transmissão de água)	(k) Permeabilidade (condutividade hidráulica) (T) Transmissividade
Piezometria e gradiente	(H) Nível piezométrico (h) Carga hidráulica (i) Gradiente hidráulico
Caudal e velocidade	(Q) Caudal (Ve) Velocidade efectiva de circulação

Experiências simples de laboratório permitem materializar alguns dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos.

**A função capacitiva dos aquíferos**, isto é, a função que controla o volume de água contido num dado reservatório geológico pode ser avaliada através de

um parâmetro, a porosidade eficaz, ou cedência específica (S<sub>y</sub>), facilmente determinável em laboratório. Este volume corresponde à água livre ou água gravítica, que está apenas sujeita a forças gravitacionais, isto é, à água que não está ligada aos grãos de areia por forças de adesão, de coesão ou de capilaridade ou retida nas anfractuosidades dos grãos. O volume escoado que no nosso caso foi de 0,88 l permite calcular uma porosidade eficaz, porosidade útil, ou porosidade disponível para o fluxo (S<sub>y</sub>), dada por  $0,88/4 = 0,22$ , isto é, 22 %.



**Figura 1 - Porosidade e Porosidade Eficaz.** Experiências simples de laboratório permitem materializar alguns dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos

*Construa-se um conjunto constituído por um balde de cerca de 5 l de capacidade em cuja base é instalada uma torneira, conforme se representa na figura 1.*

*Encha-se o balde com 4 l de areia bem seca (v<sub>1</sub>).*

*Junta água até que no balde alcance o topo da areia. Suponha que gastou 1 l de água (v). A água adicionada, neste caso 1 litro, preencheu todos os espaços intergranulares, isto é, a porosidade total da amostra (η) que é dada pela expressão  $\eta = v/v_1$ , isto é,  $1/4 = 0,25$ . A porosidade é, neste caso, igual a 25%.*

*Abra agora a torneira e deixe escoar a água na totalidade. Verifique se é escoado um volume inferior ao que foi adicionado inicialmente.*

*Repita a experiência com materiais de composição granulométrica diferente e compare os resultados. Constatará que, usando areias uniformes, as mais grosseiras tendem a apresentar porosidades eficazes mais elevadas.*

A porosidade eficaz é tipicamente uma grandeza de laboratório.

À escala do terreno existem ensaios, os ensaios de caudal, com os quais é possível determinar um parâmetro hidrodinâmico ligado ao armazenamento que em aquíferos livres é equivalente à porosidade eficaz, salvaguardadas as questões da representatividade da amostra e do efeito de escala. Esse parâmetro é o coeficiente de armazenamento (S).

Ensaio de campo, sobretudo se fornecerem informações à escala decamétrica ou hectométrica, são muito mais fiáveis que ensaios laboratoriais onde se coloca sempre a questão da amostra ser ou não representativa.

Conhecendo o parâmetro hidrodinâmico porosidade eficaz ( $S_e$ ) é possível avaliar os recursos renováveis de um aquífero livre, isto é, os que correspondem à infiltração anual média.

Imagine-se um aquífero detrítico, poroso, instalado numa estrutura em graben com uma área de afloramento de  $4 \times 2 = 8 \text{ km}^2$ , rodeado por camadas confinantes graníticas ou xistentas. Em poços existentes é possível verificar que, em regime não influenciado por bombagens, a oscilação de níveis entre o Verão e o Inverno é de cerca de 3 m. Quais são os recursos anuais renováveis considerando a porosidade eficaz de 22 % ?

Volume anual (recursos renováveis) =  $8\,000\,000 \times 3 \times 0,22 \text{ m}^3$   
 =  $5\,280\,000 \text{ m}^3$  (5,2 hm<sup>3</sup>). Com um coeficiente de segurança de

20%, chega-se a um caudal médio de cerca de 134 l/s, o que é suficiente para o abastecimento de uma cidade de cerca de 58 000 habitantes (considerando uma capitação de 200 l/habitante/dia).

Este exemplo pode ser aproveitado para discussão dos impactes que podem ser provocados caso se explorem ou se ultrapassem a totalidade dos recursos médios anuais renováveis.

O conhecimento da maior ou menor facilidade com que as formações geológicas se deixam atravessar pela água, isto é, da **função transmissiva dos aquíferos**, é geralmente traduzido pelo coeficiente de permeabilidade (k).

Henry Darcy que nos meados do século XIX exercia as funções de responsável pelo abastecimento de água à cidade de Dijon em França, procurou entender e teorizar sobre as questões que a prática lhe suscitava. Para isso realizou uma série de ensaios com um dispositivo semelhante ao apresentado na figura 2.

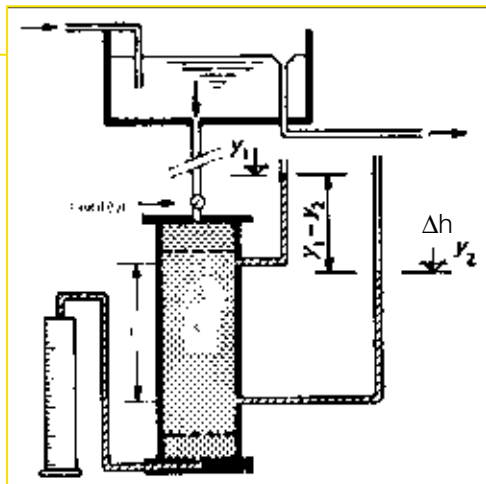


Figura 2 - Experiência de Darcy.

Os tubos verticais tinham uma altura de 2,50 m de altura e diâmetros interiores de 0,35 m, preenchidos com areia natural, Darcy (1856). Esses ensaios são hoje conhecidos com o nome de Experiência de Darcy e a lei que foi, então, deduzida experimentalmente recebeu a designação de lei de Darcy.

Darcy mostrou que, para um dado material, o caudal escoado em regime permanente, isto é, a caudal constante, era proporcional à secção de escoamento (S) e ao gradiente hidráulico ( $\Delta h/L$ ) ou (i)<sup>3</sup>. A constante **k** é o coeficiente de permeabilidade, conceito que pode ser generalizado ao que hoje se designa por condutividade hidráulica.

$$Q = k S \Delta h/L \dots\dots\dots (1)$$

<sup>3</sup> $y_1 - y_2$  na Figura 2, adaptada de Quintela (1996).

A compreensão da lei de Darcy e a sua aplicação correcta às condições de campo permite entender, avaliar e resolver muitas situações práticas e problemas concretos do dia a dia de um hidrogeólogo.

A experiência de Darcy pode ser realizada com um dispositivo com fluxo horizontal, conforme representado na figura 3, que porventura reproduz melhor a circulação da água no terreno do que o dispositivo tradicional com fluxo vertical.

A experiência pode ser encarada como a reprodução do funcionamento de um aquífero confinado com alimentação a Oeste (supondo que o Norte aponta para a parte de cima do desenho) e fluxo para Este. Neste aquífero existem dois furos nos quais é possível realizar medições de níveis de água. Conhecida a diferença entre os níveis piezométricos<sup>4</sup> dos dois furos e a distância entre eles temos o gradiente hidráulico ( $\Delta h/L$ ).

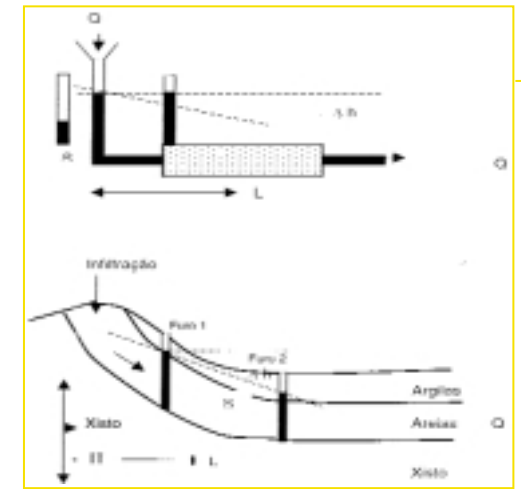


Figura 3 - Experiência de Darcy utilizando um dispositivo com fluxo horizontal comparada com as condições de escoamento real no terreno.

*Tente com o professor de física ou de geologia construir um permeâmetro artesanal.*

*Use, inicialmente, areias grosseiras para conseguir estabelecer facilmente um regime de funcionamento a caudal constante.*

*Repita a experiência com vários materiais diferentes e compare os valores dos vários coeficientes de permeabilidade obtidos.*

*Esta experiência e a anteriormente referida a propósito da porosidade eficaz ( figura 1) pode levá-lo a evoluir para a concretização de um "experimentarium" de hidrogeologia como o que existe no Departamento de Geologia da UTAD ( rpereira@utad.pt).*

*Utilize um motor de busca, em Português ou Castelhana, na Internet a palavra hidrogeologia ou água subterrânea e descubra um mundo... Ouse hidrogeology e groundwater....*

A expressão da lei de Darcy pode ser expressa por  $Q/S = k \Delta h/L$  ou  $V=k i$ , atendendo à equação da continuidade e sendo (i) o gradiente hidráulico.

V tem as dimensões de uma velocidade, designada por velocidade de filtração de Darcy, mas não é a verdadeira velocidade de circulação da água no terreno ( $V_e$ ). O volume efectivo de material disponível para a circulação é menor que o volume total que decorre da experiência de Darcy - em que foi tomada toda a secção (S) e todo o comprimento de amostra (L).

<sup>4</sup> Em Portugal geralmente é usado o NGP (nível médio da água do mar ao marégrafo de Cascais) como nível de referência.

Segundo Quintela (1996), a porosidade efectiva - ou seja a relação ( $S_y$ ) entre o volume dos poros disponível para o escoamento e o volume total do meio - pode assemelhar-se à relação entre a área da secção efectivamente disponível ( $S_e$ ) para o escoamento e a da secção total do meio ( $S$ ).

A equação da continuidade permite escrever:  $V_e S_e = V S$ . Então:

$V_e = V S / S_e$ , e, conforme anteriormente justificado:

$V_e = V / S_y$ .

Portanto:

$$V_e = k i / S_y \quad (2)$$

onde  $V_e$  é a **velocidade efectiva, verdadeira, de circulação da água nos aquíferos**.

No caso da figura 3 suponha que o gradiente  $\Delta h/L$ , ou ( $i$ ), é de 0,017, e que a transmissividade ( $T$ ) é de  $540 \text{ m}^2/\text{dia}$ . A espessura é designada por ( $e$ ).

Calcule o caudal de escoamento numa frente de aquífero ( $l$ ) de 300 m.

$$Q = k S \Delta h/L \quad T = k e \quad \text{Então } Q = T/e \cdot l \Delta h/L, \quad \text{e, } Q = T l \Delta h/L$$

Resposta:  $Q = 540 \times 300 \times 0,017 \text{ m}^3/\text{dia}$ , isto é,  $2754 \text{ m}^3/\text{dia}$ , portanto, cerca de 32 l/s.

Em termos reais esta situação pode ser considerada semelhante à que ocorre, por exemplo, no flanco Sul do Sinclinal Ordovícico de Penha Garcia onde está instalado o aquífero hidromineral dos quartzitos Caradocianos das Termas de Monfortinho (consulte, por exemplo, a carta geológica 1/500 000 do Instituto Geológico e Mineiro e Carvalho (in press). O aquífero hidromineral de Monfortinho é alimentado na região de Penha Garcia, cerca da cota +470 m (NGP) e descarrega nas Termas de Monfortinho numa frente de 300 m, à cota 260 (NGP). A circulação é de NW para SE ao longo da banda quartzítica. O gradiente ( $i$ ) de cerca de 0,017 é indiciado pela diferença de cota entre a zona de alimentação (a Este do rio Ponsul em Penha Garcia) e a de descarga, nas termas, e respectiva distância (12 500 m). A frente de descarga é determinável na carta geológica e no terreno: é a espessura aparente do afloramento quartzítico do Caradociano ao longo da qual ocorrem emergências. A transmissividade foi determinada a partir de vários ensaios de caudal. O caudal de escoamento assim determinado corresponde, aproximadamente, ao caudal total fornecido pelas várias captações existentes nas Termas.

A velocidade de propagação de contaminantes por transporte advectivo, isto é, sem intervenção de fenómenos complexos de difusão, diluição, dispersão ou retardamento pode ser aproximada pela expressão simples (2).

Decorre do que foi exposto que, a partir da lei de Darcy, conhecidos a geometria do aquífero, o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), o gradiente hidráulico ( $i$ ) e a porosidade eficaz ( $S_y$ ) é possível:

- determinar os recursos de água subterrânea numa dada secção de aquífero;
- determinar os caudais extraíveis em captações;
- propor cenários de propagação de contaminantes.

O coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), não é uma característica intrínseca do meio pois depende do fluido que atravessa a formação (água "normal", água quente, petróleo, gás, ar, etc.). Por isso, é preferível utilizar a designação condutividade hidráulica que se aplica às águas "normais".

A transmissividade ( $T = k e$ ), em que ( $e$ ) é a espessura do aquífero, corresponde à capacidade de um aquífero para transmitir água em toda a sua espessura saturada. É claramente uma grandeza de terreno, determinável apenas com ensaios de caudal, em obras de captação. Sendo a função transmissiva a que mais condiciona o fluxo de água subterrânea para uma captação, a transmissividade é, porventura, o parâmetro hidrodinâmico mais usado na avaliação de recursos hídricos subterrâneos.

### 2.3. Ordenamento do território e qualidade da água

A composição química da água subterrânea é fruto da sua história, isto é, do tipo de água meteórica infiltrada, do tempo de permanência no reservatório geológico, do tipo de rochas em que circula, das interferências com outros aquíferos ou com águas superficiais, da ocorrência e da tipologia de acções antrópicas, das metodologias de extracção etc. Por isso a composição química de uma água subterrânea é o verdadeiro "bilhete de identidade" dessa água. Da mesma forma a biologia da água, e particularmente das águas subterrâneas, constitui um mundo vastíssimo que pode propiciar experiências multidisciplinares enriquecedoras. Estamos num domínio em que a caracterização das águas subterrâneas abre as portas à Ecogestão e às Ciências do Ambiente. A biologia, a química inorgânica e a química orgânica têm um peso crescente nos estudos hidrogeológicos porque cada vez mais é necessário caracterizar as águas subterrâneas em termos qualitativos para as diversas utilizações.

O ordenamento do território impõe estudos qualitativos da água subterrânea e a defesa das suas características originais. Em Portugal está em vigor o Dec-Lei 243/01 que impõe as características que as águas devem apresentar para as diversas utilizações.

A esta questão da qualidade da água está ligado o problema da definição dos perímetros de protecção que o Dec-Lei 382/99 impõe para captações destinadas a abastecimento público. Estas áreas, em que a ocupação do solo é condicionada, são promulgadas pelo Governo, sob proposta das Direcções Regionais do Ambiente com base em estudos hidrogeológicos realizados pelas entidades exploradoras das captações. Nelas são interditas certas ou quaisquer actividades antrópicas que possam pôr em risco a qualidade da água. Para as águas minerais naturais e águas de nascente que são águas, vendidas engarrafadas ou consumidas nas termas, que não podem sofrer qualquer tratamento, os Dec-Lei 90/90, 84/90 e 86/90 prevêm, igualmente, a definição de Perímetros de Protecção com implicações óbvias no ordenamento do território.

No Quadro II tenta caracterizar-se a tipologia das águas disponíveis para consumo no mercado europeu.

Quadro II- Águas disponíveis para consumo

Designação	Definição breve
Água da torneira	Água potável tratada. A sua qualidade rege-se pelo Dec-Lei 243/01
Água mineral natural	Água subterrânea, de quimismo constante, bacteriologicamente própria na origem, podendo ter efeitos terapêuticos ou favoráveis à saúde. Controlo de qualidade específico assegurado pelo Instituto Geológico e Mineiro (IGM) e Direcção Geral de Saúde (DGS). Sem tratamento.
Água de nascente	Água subterrânea, bacteriologicamente própria na origem, de qualidade compatível com o Dec-Lei 243/01. Controlo de qualidade específico assegurado pelo Instituto Geológico e Mineiro e Direcção Geral de Saúde. Sem tratamento.

## 2.4. Sugestões complementares para actividades laboratoriais e de campo

Sem prejuízo das actividades de laboratório como por exemplo determinação da porosidade eficaz, do coeficiente de permeabilidade e a utilização de programas de simulação simples (Unesco 1999; Murk & Skinner 1999), o palco da hidrogeologia é o campo. Por isso serão aqui enumeradas algumas actividades simples que retomam as questões críticas que geralmente têm de ser respondidas, quando se inicia uma investigação hidrogeológica, (Sanders, 1998).

A hidrogeologia é um tema facilmente enquadrável numa perspectiva CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente). Se do ponto de vista científico é importante que os alunos desenvolvam modelos mentais correctos do ciclo da água, nomeadamente, da sua parte subterrânea, da estrutura de um aquífero e dos processos que permitem a circulação da água, é igualmente importante que nessas aprendizagens se integrem perspectivas relacionados com aspectos tecnológicos, sociais e ambientais. Deve privilegiar-se a substituição de actividades abstractas ou descontextualizadas de introdução de novos conceitos, por actividades CTSA que coloquem os alunos em contacto com o mundo que os rodeia, principalmente, com o seu meio próximo. Estas actividades podem ser de diversos tipos: actividades práticas de campo e de laboratório, de consulta bibliográfica, incluindo nesta a consulta de cartas topográficas e geológicas e a pesquisa de informação na Internet, a resolução de problemas de lápis e papel, etc.

Esta orientação é semelhante à preconizada nos novos programas de geologia do ensino secundário onde são propostos conteúdos conceptuais, processuais e atitudinais, que visam a interpretação de alguns fenómenos naturais, com base no conhecimento geológico, procurando simultaneamente fomentar a formação de cidadãos cientificamente informados e preparados para assumirem uma atitude responsável na Sociedade, participando em discussões e tomadas de decisão. As actividades propostas, neste trabalho, inserem-se nesta perspectiva CTSA. No seu conjunto, constituem um projecto de tipo investigativo sub-dividido em várias actividades.

*Actividade 1 - Em que bacia hidrográfica se situa a região onde vive? Que aquíferos estão presentes?*



Um estudo prévio de gabinete é uma tarefa fundamental no início de qualquer investigação hidrogeológica. Documente-se bem antes de sair para o campo.

Adquira as folhas da carta 1/25 000 do Instituto Geográfico do Exército ([www.igeoe.pt](http://www.igeoe.pt)) e da carta 1/50 000 do Instituto Geológico e Mineiro ([www.igm.pt](http://www.igm.pt)) da área onde vive. Consulte o site do Instituto da Água (INAG) ([www.inag.pt](http://www.inag.pt)) e neste o SNIRH e os recém aprovados Planos de Bacia Hidrográfica. Verifique em que aquífero ou aquíferos se situa o local em termos de Inventário Nacional de Aquíferos.

Actividade 2 - Qual é a natureza da permeabilidade dos aquíferos da região onde vive?

A caracterização qualitativa e quantitativa da permeabilidade é de importância relevante em investigações hidrogeológicas.

Organize uma saída de campo a um local próximo onde existam afloramentos. Registe com precisão o local nas cartas 1/25 000 e 1/50 000.

Observe com atenção os afloramentos. Os espaços vazios onde a água pode circular estão relacionados com o tamanho dos grãos, com o seu arranjo e com a compactação (permeabilidade primária ou por poros) ?

Ou a circulação da água faz-se ao longo de descontinuidades, fracturas ou cavidades de dissolução (permeabilidade secundária ou fissural)?

Caso haja nascentes implante-as na carta e tente relacioná-las com a topografia e a litologia.

O Quadro III fornece-lhe **valores indicativos** para a permeabilidade e porosidade eficaz de algumas formações aquíferas

Quadro III- Valores indicativos do coeficiente de permeabilidade e da porosidade eficaz

Designação	Coeficiente de Permeabilidade (k) em m/dia	Porosidade eficaz (Sy)
Aluvião	200	0,20
Arenito	2	0,10
Basalto	0,05	0,05
Calcário	50	0,03
Granito	0,02	0,005
Tufo vulcânico	0,01	0,10
Xisto	0,02	0,01

Note que para obter velocidades efectivas de circulação (equação 2) tem de conhecer a porosidade eficaz ( $S_y$ ), o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) e o gradiente hidráulico ( $i$ ).

Conhecida a velocidade efectiva de circulação pode determinar o tempo de transporte aproximado de uma carga contaminante entre um foco de contaminação e uma dada captação.

Actividade 3 - Quais são os níveis da água sob o terreno na região onde vive? Que variações sazonais apresentam ?

Para se saber como se desloca a água no subsolo é necessário conhecer os níveis de água nos aquíferos. Como já foi demonstrado a quantificação dos recursos pode ser iniciada pelas oscilações sazonais dos referidos níveis.

Escolha três poços (ou furos) que possa representar na carta 1/25 000. Localize-os. Determine as coordenadas e a cotas a partir da leitura das cartas.

Tente medir a profundidade à água (nível hidroestático) com os sistemas de bombagem, se existentes, em repouso. Improvise um dispositivo se necessário. Faça apelo ao professor de Física para construir uma sonda eléctrica artesanal !!

No passado foi muito comum a utilização de um apito metálico suspenso por um fio que ao tocar a água emite um silvo.

No caso de captações municipais, industriais ou agrícolas peça essas informações aos proprietários. Faça medições no mesmo local no Verão e no Inverno.

Caso haja fontanários, ou nascentes naturais, represente-as na carta e meça os caudais de Verão e de Inverno com auxílio de balde e cronómetro. Registe a data e a hora.

Os dados hidrogeológicos têm de ser referenciados no espaço e no tempo...

Registe os valores de forma ordenada, de preferência numa folha de cálculo, para posterior utilização na realização de gráficos.

Actividade 4 Qual o sentido do fluxo da água subterrânea ?

Determinados o sentido de fluxo e a velocidade efectiva de circulação poderemos conhecer em que sentido e a que velocidade se dá a propagação de contaminantes.

A partir das cotas e dos níveis hidroestáticos obtidos (Actividade 3) determine o nível piezométrico em cada local.

Construa sobre a carta topográfica, a partir dos três pontos referidos, um esboço de carta piezométrica (curvas de nível do tecto da superfície livre ou da superfície piezométrica, conforme o caso).

Em que sentido circula a água subterrânea ? Qual o gradiente hidráulico (sentido e valor numérico)?

Actividade 5 - Que aquíferos são utilizados localmente ?

A informação bibliográfica que recolheu pode ser escassa, porque se encontra a uma escala pouco precisa. Pode ser que exista um aquífero local ainda não inventariado (!!).

Confronte a informação obtida, localmente, com a lista dos aquíferos reconhecidos pelo Instituto da Água (INAG). Existirão aquíferos distintos dos que identificou através da recolha bibliográfica ? Se tem essa suspeita contacte a Direcção Regional do Ambiente e Ordenamento do Território mais próxima.

Actividade 6 - Quais as fontes locais de contaminação das águas subterrâneas da área ?

A vulnerabilidade à poluição é uma característica intrínseca aos sistemas hidro-geológicos, mas o risco depende da natureza e distribuição das fontes poluidoras.

Na área estudada implante nas cartas topográficas as fontes de contaminação (pontuais ou difusas). Exemplos: lixiviados de lixeiras ou aterros sanitários, fugas de reservatórios subterrâneos de produtos químicos ou de combustíveis, efluentes de fossas sépticas, efluentes de unidades industriais ou agro-pecuárias, aplicação de pesticidas e fertilizantes, estradas, intrusão salina, etc. Estabeleça um perfil topográfico e geológico entre as captações que estudou e as fontes de poluição mais próximas. Há riscos de contaminação ?

Actividade 7 - Quais as características das obras de captação que inventariou? As obras de captação podem constituir um perigo para os recursos hídricos subterrâneos se mal executadas, exploradas ou abandonadas.

Tente determinar ou conhecer a profundidade e o diâmetro das obras de captação, a posição dos tubos-ralo e a posição do isolamento sanitário com argila ou cimento.

A propósito: informe-se se os furos de captação para abastecimento público da área têm **Perímetro de Protecção** definido conforme é exigido pelo Dec-Lei nº 382/99. O perímetro está sinalizado no terreno para conhecimento da população ?

Para saber mais sobre o estabelecimento de perímetros de protecção a captações consulte Carvalho (2001b)

Actividade 8 – Quais as características físico-químicas da água captada ?

Recolha algumas amostras da água bruta de uma ou várias captações. No laboratório de química anote o pH, a condutividade eléctrica e outros parâmetros que seja possível determinar com os meios disponíveis. Compare esses valores com as recomendações do Dec-Lei nº 243/01 referente à qualidade da água. Caso tenha dificuldade em obtê-lo recorra à Direcção Regional do Ambiente e Ordenamento do Território da sua área.

Faça as mesmas determinações numa amostra da água superficial mais próxima. Compare os resultados. Que água será mais fácil de tratar para cumprir a legislação?

Se a água apresentar características claramente distintas das águas normais da região poderá estar perante uma água mineral natural. Consulte [www.igm.pt](http://www.igm.pt) ( o site do IGM).

### 3. Referências bibliográficas

- Anon (1978). World water balance and water resources of the earth. URSS. Comm for the International Hydrological Decade. Hydrological Decade. Paris:Unesco.
- Anon (1999). Blue Gold. The interactive encyclopaedia of water. (CD-Rom). Paris: Unesco.
- Belitz, K. (2001). Ground water is alive and well-it just keeps shifting. Ground Water, NGWA. vol 39, nº 4, pp 481.
- Carvalho, J. M. (2001a). As Aguas Subterrâneas no Abastecimento de Núcleos Urbanos no Norte de Portugal. Tecnologia da Agua. Elsevier. Barcelona. Ano XXI, Vol 4, nº 1 pp 4-18.
- Carvalho, J. M. (2001b). Perímetros de Protecção a captações para abastecimento público. Tecnologia da Agua. Elsevier. Barcelona. Ano XXI, Vol 4, nº 2 pp 48-52.
- Carvalho, J. M. ( in press). A hidrogeologia das águas minerais naturais de Monfortinho. Geonovas, Revista da Associação Portuguesa de Geólogos. Lisboa.
- Castany, G. (1982). Principes et Methodes de l'Hydrogéologie. Paris: Dunod Université.
- Darcy, H. (1856). Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. Paris: V. Dalmont.



- Fetter, C. W. (1994). Applied Hydrogeology. New Jersey: College Publishing Company.
- Murk, B. & Skinner, B. (1999). Geology Today, Understanding our Planet. New York: John Willey & Sons.
- Price, M. (1996). Introducing Groundwater. Londres: Chapman & Hall.
- Quintela, A. (1996). Hidráulica. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Sanders, L. (1998). A Manual of Field Hydrogeology. New York: Prentice Hall.



# E se a estufa em que vivemos for inundada?

A subida do nível médio do mar:  
algumas causas e consequências

*César Andrade e Conceição Freitas*

## Introdução

A posição da interface entre o oceano e a margem continental (a linha de costa) varia ao longo do tempo. Estas variações, designadas por *transgressões* e *regressões*, são bem conhecidas dos geólogos e não constituem episódios particulares da história da Terra; antes pelo contrário, são parte integrante das transformações lentas que a superfície do nosso planeta vem acumulando ao longo do tempo, desde que as massas continentais e os oceanos se diferenciaram.

A variação do nível médio do mar é forçada por causas diversas, que operam a escalas temporais distintas, desde algumas horas (marés, resultantes da atracção gravitacional) a milhões de anos (alterações da geometria e da capacidade de acomodação das bacias oceânicas, induzidas pela tectónica ou pela sedimentação). A escalas temporais intermédias, décadas - séculos, as variações do nível médio do mar relacionam-se fundamentalmente com as modificações climáticas; é destas que nos ocuparemos neste trabalho, por serem muito importantes à escala da vida humana e porque o Homem tem hoje um papel preponderante na (des)regulação do clima e, em consequência, influencia o nível eustático global.

## A Hidrosfera – uma característica que distingue a Terra de outros planetas

A Terra é, entre os planetas do Sistema Solar, o único onde se reúnem condições de temperatura e pressão superficiais que permitem a existência de água

nos três estados da matéria e que a contém em abundância –  $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$ . A hidrosfera compreende toda a água residente à superfície ou perto da superfície do planeta, e corresponde a uma região com 10 – 20 km de espessura, que inclui a parte superficial da litosfera e a região inferior da atmosfera, até cerca de 12 km de altitude. Os oceanos, golfos e mares contêm 97.4% do volume da hidrosfera e são constituídos por água salgada - salinidade média de 3.5%, que resulta da carga dissolvida nas águas provenientes das massas continentais e da contribuição do vulcanismo submarino. O volume remanescente (2.6%) distribui-se pela atmosfera, sob a forma de vapor (0.001%), pelos rios, lagos e reservatórios subterrâneos de água doce (0.6%) e ocorre ainda sob a forma de gelo, em glaciares de montanha e nas regiões circum-polares (aproximadamente 2%). Actualmente, os gelos cobrem cerca de 10% das massas continentais mas a extensão por eles ocupada variou significativamente (até um máximo de 30%) através do tempo geológico (nomeadamente durante as épocas glaciárias) devido a variações climáticas, resultantes de perturbação do balanço térmico global do planeta ou de modificação dos padrões de distribuição do calor e da precipitação à escala planetária.

## Factores que forçam as variações climáticas

A superfície da Terra absorve parte da radiação de pequeno comprimento de onda provinda do Sol (principalmente na gama do visível), relativamente à qual a atmosfera é virtualmente transparente. Esta energia é redistribuída pela circulação atmosférica e oceânica e reemitida para o exterior, mas agora preferencialmente em comprimentos de onda mais longos (infravermelho) que são absorvidos por alguns constituintes da baixa atmosfera (gases de estufa). Considerando valores médios anuais e a Terra como um todo, a energia solar recebida é aproximadamente equilibrada pela radiação reemitida para o espaço. Qualquer factor que perturbe o balanço entre a radiação recebida e perdida do e para o espaço, ou que modifique a distribuição desta energia dentro da atmosfera ou entre a atmosfera, a superfície terrestre e o oceano, modifica o balanço térmico global e pode afectar o clima.

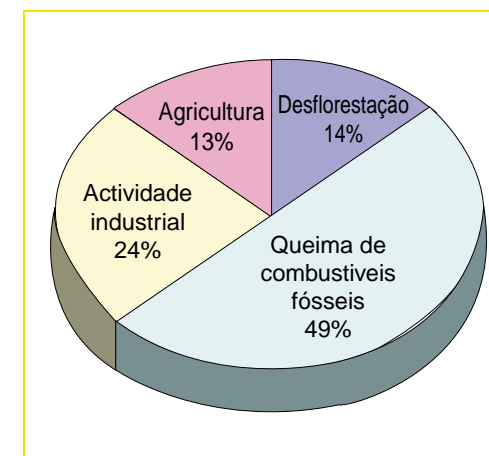
E se a estufa em que vivemos for inundada?

As variações climáticas podem ser forçadas por causas naturais ou antropogénicas, que ainda hoje são objecto de debate científico. De entre as causas naturais, as modificações da energia associadas às manchas e ciclos magnéticos solares e dos parâmetros orbitais da Terra em torno do Sol, bem como a actividade vulcânica explosiva, são consideradas das mais importantes. Enquanto as primeiras são responsáveis por variações cíclicas de período curto (da ordem de 10 a 20 anos), as segundas, muito lentas, com períodos da ordem de  $20 \times 10^3$  a  $100 \times 10^3$  anos, parecem ser as principais responsáveis pela alternância de ciclos glaciais/interglaciais. As causas antropogénicas – actividade industrial, agricultura, desflorestação e queima de combustíveis fósseis (Fig. 1) – resultam em modificação rápida da composição da atmosfera, especialmente no que respeita aos gases com efeito de estufa.

## O efeito de estufa

O efeito de estufa consiste na retenção de calor junto à superfície da Terra em virtude da "opacidade" dos gases de estufa que se concentram na baixa atmosfera e regulam o seu equilíbrio térmico (Fig. 2). Este efeito possibilita a manutenção de uma temperatura média global perto da superfície do planeta da ordem de  $15^\circ\text{C}$ , que seria de  $-18^\circ\text{C}$  na sua ausência, inviabilizando a Vida como a conhecemos actualmente. Assim, aquilo que os *media* vulgarmente referem como *efeito de estufa* associado à actividade antrópica é, na verdade, a potenciação de um fenómeno presente através da história geológica do Planeta e crucial para a biosfera.

Os principais gases de estufa (que integram o Protocolo de Quioto) representam menos de 1% da composição da atmosfera: vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), clorofluorcarbonetos (CFC), hidrofluorcarbonetos (HFC), perfluorcarbonetos (PFC) e ainda hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), sendo estes quatro últimos de origem sintética (Quadro 1). No milénio anterior à Era Industrial, a concentração atmosférica dos gases de estufa naturais permaneceu relativamente constante. Porém, a



**Figura 1** - Contribuição relativa dos diferentes tipos de actividades humanas para o aquecimento global em 1990 (fonte: World Resources Institute).

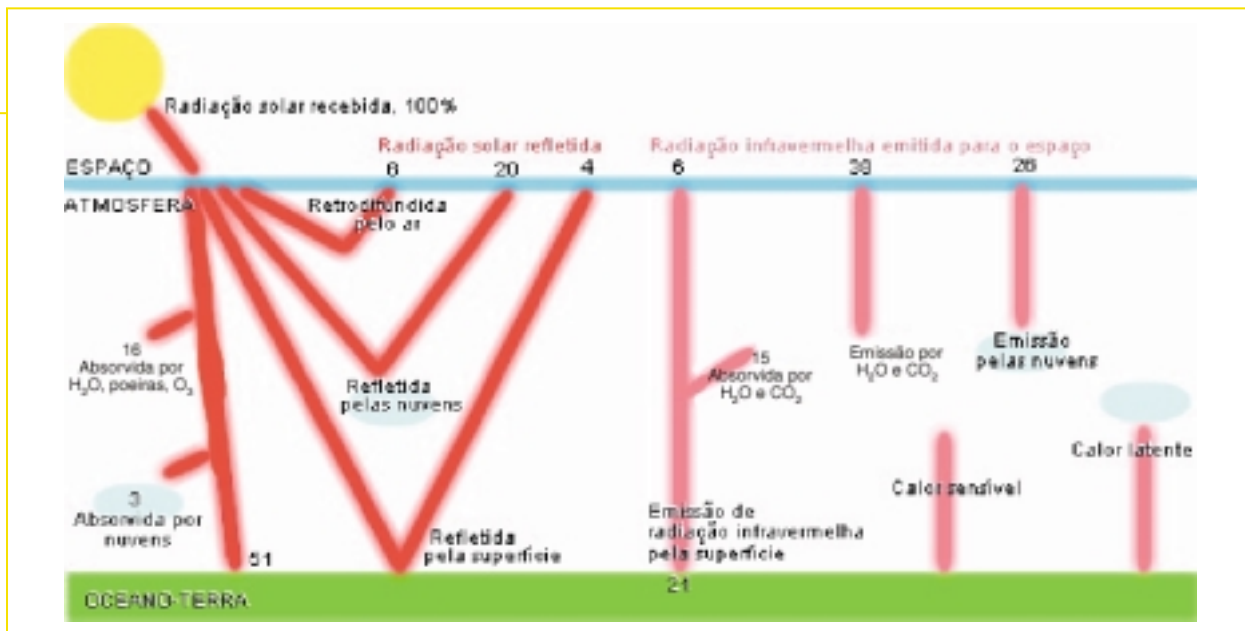


Figura 2 - Balanço energético da radiação recebida e emitida pela Terra (Fonte: <http://www.geocities.com/Augusta/7135/estufaestufa.htm>).

sociedade industrializada depende da utilização do carvão e dos hidrocarbonetos naturais (gás natural, petróleo) como fontes primárias de energia, e o aumento exponencial das necessidades energéticas, aliado à desflorestação, trouxe como consequência a libertação de quantidades cada vez maiores de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. A quantidade de carbono retida hoje na atmosfera sob a forma de

CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> é seguramente a maior dos últimos 420 000 anos e, provavelmente, dos últimos 20 milhões de anos (Fig. 3), e a combustão actual de combustíveis fósseis eleva anualmente esta quantidade de 6 x 10<sup>9</sup> T. No que respeita ao metano, um pouco mais de metade das emissões actuais são de origem antrópica (produção de arroz, aterros sanitários, utilização de gás natural), sendo as zonas pantanosas responsáveis pelas emissões naturais. Também a concentração actual de óxido nítrico não foi excedida nos últimos mil anos. A actividade antrópica é a única responsável pela libertação

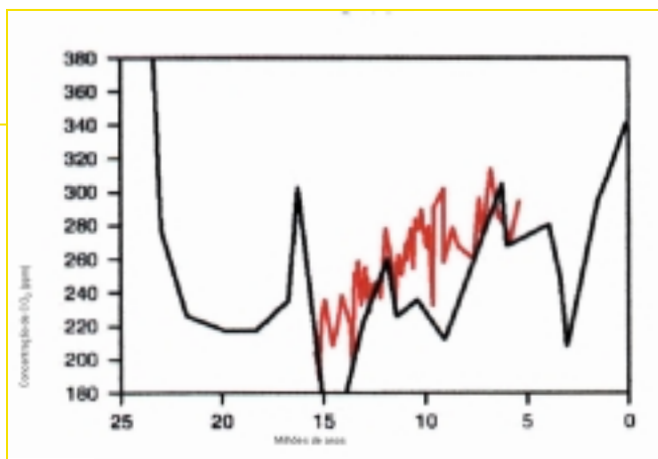


Figura 3 - Variação da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> nos últimos 25 milhões de anos. As diferentes cores referem-se a estudos de diferentes autores (Fonte: <http://www.ipcc.ch/>).

E se a estufa em que vivemos for inundada?

de CFC e, mais recentemente, do SF<sub>6</sub> (usado nos sistemas de transmissão e distribuição de electricidade) e dos compostos halogenados – HFC e PFC - que vieram substituir parcialmente os primeiros, responsáveis pela destruição da camada de ozono, e actualmente controlados de acordo com o Protocolo de Montreal (1987, cf. [www.ciesin.org/TG/PI/Policy/montpro.html](http://www.ciesin.org/TG/PI/Policy/montpro.html)).

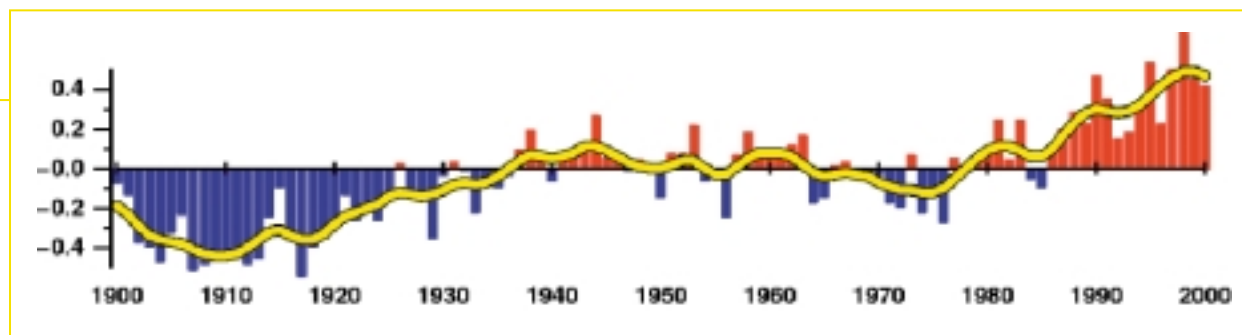
Quadro 1 – Potencial de aquecimento global (AG) de gases com efeito de estufa, relativamente ao CO<sub>2</sub> (Fonte: CPAC, 2001, Warrick et al., 1990, IPCC, 2001). Este potencial depende das propriedades de cada gás, da taxa de crescimento da sua concentração e do seu tempo de residência na atmosfera.

Gás	Potencial AG	Contribuição para o Ag (%)	Concentração (volumétrica) na atmosfera (ppm)		Aumento da concentração na atmosfera	
			Pré-Industrial (1750)	1998	Desde 1750 (%)	Crescimento anual 1980-1989
CO <sub>2</sub>	1	60	280	365	31	1.5 ppm
CH <sub>4</sub>	21	20	0.70	1.75	151	7 ppb
N <sub>2</sub> O	310	6	0.27	0.31	17	0.8 ppb
CFC	10000-15000	-	0	0.00027	-	-1.4 x 10 <sup>-3</sup> ppb
HFC	140-11700	14*	0	0.000014	-	0.55 x 10 <sup>-3</sup> ppb
PFC	6500-9200	14*	0	-	-	-
SF <sub>6</sub>	23900	14*	0	-	-	-

\*Valor conjunto para os compostos sintéticos.

O aumento da concentração dos gases com efeito de estufa na atmosfera deve provocar um aumento da temperatura e, conseqüentemente, perturbar o clima global. Ao incremento da concentração daqueles gases desde a época pré-industrial deveria ter correspondido uma elevação da temperatura média global de 0.5-1.2 °C que foi efectivamente observada nos registos meteorológicos (Fig. 4). Até há 10 anos atrás a comunidade científica debatia se era possível estabelecer relações seguras de causa-efeito entre a tendência de aquecimento observada e o aumento da concentração de gases de estufa. Hoje, existe consenso sobre esta matéria e a quase totalidade dos cientistas aponta a actividade antrópica como responsável primordial.

Durante o século XX a temperatura média superficial aumentou de 0.6±0.2 °C (Warrick et al., 1990), provavelmente a maior variação positiva ocorrida nos últimos 1000 anos. As projecções realizadas pelo IPCC para o período 2000-2001, com base em diferentes cenários de evolução económica, populacional



**Figura 4** - Desvios da temperatura média no Hemisfério Norte relativos ao período 1961-1990. A curva amarela corresponde a um alisamento da série original com médias móveis (Fonte: <http://www.cru.uea.ac.uk/>)

e tecnológica (IPCC, 2001), apontam para aumentos de 90 a 250% (relativamente a 1750) na concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> e para variações positivas ou negativas nos restantes gases com efeito de estufa. Com base nestas estimativas, o IPCC prevê que a temperatura média global do Planeta aumente de 1.4 a 5.8°C entre 1990 e 2100.

A verificar-se um dos cenários de aquecimento mais dramáticos podemos afirmar que nunca o nosso planeta experimentou uma elevação térmica tão intensa num intervalo de tempo tão curto, pelo que não existe registo geológico das repostas ambientais a este tipo de solicitação – estamos portanto a realizar uma experiência de dimensão planetária. As implicações desta mudança são variadas e far-se-ão sentir, entre outros, nos recursos hídricos, na biodiversidade, na saúde, na agricultura e pescas, na energia e nas zonas costeiras, enquanto interface entre os continentes e os oceanos. Aqui, uma das consequências mais importantes do aquecimento global é a elevação do nível médio do mar.

## Temperatura e nível médio do mar

À escala temporal a que se discute o aquecimento recente e futuro do nosso planeta, as bacias oceânicas não modificam a sua capacidade de acomodação, pelo que qualquer variação da volumetria presentemente retida sob a forma de água líquida nos oceanos conduzirá necessariamente a uma variação do nível médio do mar. Existem quatro contribuintes potenciais para esta variação (Fig. 5):

E se a estufa em que vivemos for inundada?

## A expansão térmica do oceano

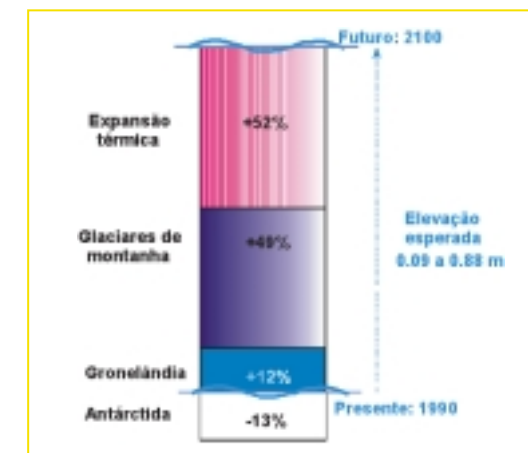
As massas de água oceânicas reagem ao aquecimento global expandindo o seu volume, pelo que é de esperar uma variação positiva do nível médio do mar, independentemente da ocorrência de adições suplementares de água. A taxa de variação volumétrica correspondente a uma dada variação de temperatura não é uniforme e depende do estado de aquecimento inicial das massas de água, pelo que as modificações do nível médio do mar não serão iguais em todos os locais do nosso planeta nem ao longo da coluna de água, e dependerão também de modificações da salinidade, do regime de ventos e da circulação oceânica. Porque a resposta das regiões mais profundas - e mais frias - dos oceanos é mais lenta, a expansão térmica, já iniciada, prolongar-se-á por vários séculos, mesmo que as concentrações atmosféricas dos gases com efeito de estufa e ou a temperatura superficial estabilizassem hoje (IPCC, 2001; [www.ipcc.ch/](http://www.ipcc.ch/)).

## Os glaciares de montanha

As centenas de glaciares de montanha que existem em latitudes médias e elevadas são sensíveis às variações climáticas e, embora retenham menos de 1% do total de neve e gelo mundiais, a sua fusão completa seria, por si só, responsável por uma elevação de 30-60cm do nível médio do mar. As observações de satélite demonstram uma resposta generalizada destas massas ao aquecimento registado no passado recente, traduzida pela recessão das frentes glaciárias, fusão do gelo e fornecimento de água líquida aos sistemas hidrográficos que rapidamente a conduzem ao oceano (IPCC, 2001; [www.ipcc.ch/](http://www.ipcc.ch/)).

## As calotes de gelo da Gronelândia e da Antárctida

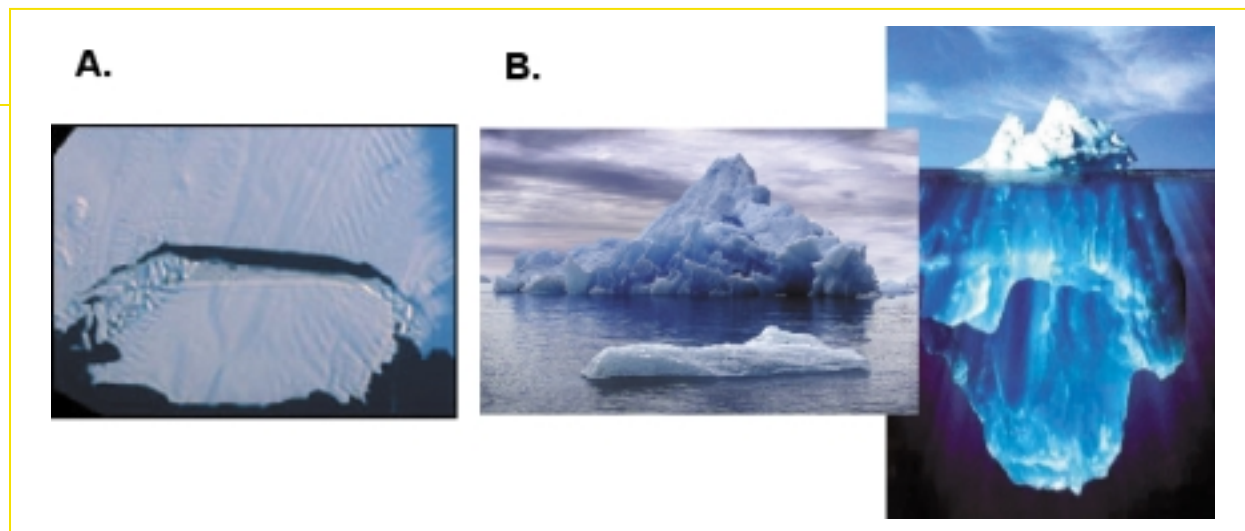
A maioria esmagadora das massas de gelo continentais situam-se na Gronelândia e na Antárctida. Na Gronelândia, a variação anual da temperatura permite a fusão sazonal das frentes glaciárias localizadas a altitudes baixas, perto do litoral. O aquecimento global aumentará a superfície das massas de gelo sujeitas a fusão



**Figura 5** - Contribuições relativas para a subida do nível médio do mar (Fonte: Warrick *et al.*, 1990)



e a taxa de fusão, pelo que se prevê uma diminuição inexorável, embora lenta, da massa total de gelo ali retida que será adicionada ao volume líquido dos oceanos. Na Antártida, onde reside mais de 90% do gelo continental, o clima é muito mais frio e a amplitude de variação térmica anual não favorece a fusão dos gelos e a sua descarga para o oceano. Em termos relativos, a contribuição da Antártida para o aumento da massa do oceano é pequena e ocorre através da fracturação e destaque de placas periféricas de gelo (*ice calving*), que originam os icebergs (Fig. 6); a taxa de produção de icebergs poderia aumentar devido ao aquecimento global, mas muito lentamente, e parece não ser um contribuinte importante nos próximos 100 anos. Uma excepção importante é a Península Antártica, a região mais quente deste continente, onde existem numerosos pequenos glaciares de tipo alpino que podem responder muito rapidamente por fusão ao aquecimento. Estes glaciares contêm aproximadamente a mesma quantidade de gelo que o resto dos glaciares de montanha em todo o mundo. A quantificação da sua importância nas modificações futuras do nível médio do mar é ainda incerta.



**Figura 6** - A. Formação de um iceberg a partir da fracturação de uma massa de gelo na Antártida. Imagem vertical obtida pela NASA. B. Iceberg no oceano (Fonte: <http://visibleearth.nasa.gov/>).

O frio intenso, típico do clima actual da Antártida, limita a precipitação sobre este continente e os modelos de previsão climática sugerem que do aquecimento global resultaria um aumento líquido da precipitação, essencialmente sob a forma de neve. Assim, este contribuinte teria uma resultante negativa no que

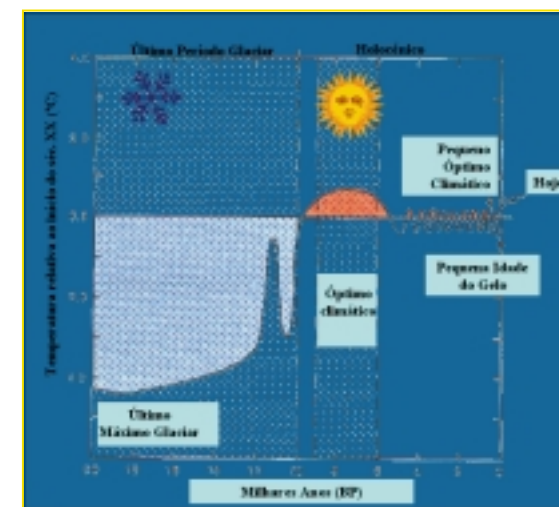
E se a estufa em que vivemos for inundada?

respeita à elevação do nível médio do mar que, não obstante, é insuficiente para equilibrar as variações positivas determinadas pelos restantes agentes responsáveis (IPCC, 2001; [www.ipcc.ch/](http://www.ipcc.ch/)).

## A subida do nível do mar: evolução e previsões

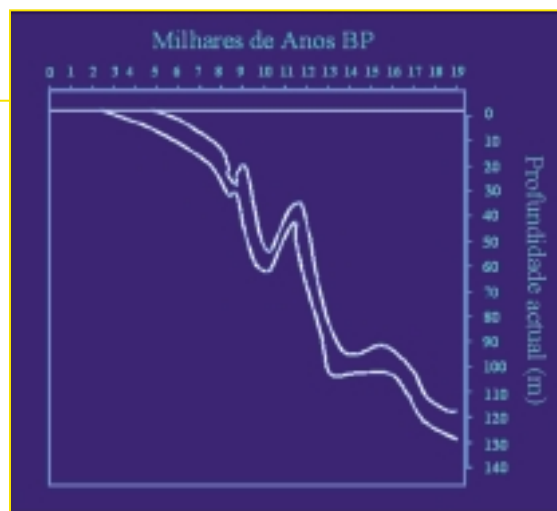
Um aquecimento global de alguns, poucos, graus Celsius pode parecer pouco importante, principalmente se comparado com a amplitude das variações térmicas sazonais a que todos estamos habituados. Porém, o significado de uma variação da temperatura média global é muito superior ao que a maioria das pessoas associa, empiricamente, à variabilidade climática, sazonal ou geográfica. A série representada na figura 4 foi construída com base em informação instrumental e cada ponto representa a média ponderada de mais de um milhão de observações distribuídas pelo Globo, tomadas em terra e no oceano. Uma forma de ilustrar o impacto de uma variação térmica de 1.4 a 5.8 °C, até finais do século XXI, é compará-la com o registo histórico ou geológico de um fragmento da história da Terra marcado por variações semelhantes.

Se nos centrarmos apenas na história mais recente da Terra, sabemos que há cerca de 18 000 anos atrás uma parte apreciável da água dos actuais oceanos esteve imobilizada sob a forma de gelo nas calotes polares e nos glaciares de montanha, que ocupavam então extensão muito superior à actual, (Fig. 7). Apenas 4°C separam as médias da temperatura mundial durante o último máximo glacial e o presente. Em consequência, o nível médio do oceano mundial encontrava-se cerca de 120 m abaixo do nível actual (Fig. 8). Tal significa que a generalidade dos fundos que hoje constituem a plataforma continental portuguesa se encontrava emersa, era atravessada por sistemas fluviais, continha manchas de vegetação e era



**Figura 7** - Representação simplificada da evolução da temperatura superficial nos últimos 20 000 anos em termos de desvios relativamente ao início do século XX (modificado de: Warrick *et al.*, 1990).





**Figura 8** - Representação da variação do nível do mar nos últimos 19 000 anos na plataforma continental norte portuguesa (modificado de: Dias, 1987).

habitada por fauna diversa, adaptada a um clima mais frio que o actual – estépico, à nossa latitude. Desde o último máximo glaciário até ao presente assistiu-se a uma tendência de aquecimento generalizado (Fig. 7), pontuada por oscilações menores e, em consequência, parte apreciável dos gelos fundiu e devolveu água aos oceanos, cujo nível médio tem vindo a subir (Fig. 8). Esta elevação foi frequentemente interrompida por curtos episódios de estabilização ou mesmo de descida, e os períodos de elevação caracterizaram-se por taxas de subida substancialmente diferentes, da ordem de mm a cm/ano (Fig. 8).

De modo geral, as curvas de variação do nível do mar no Quaternário recente mostram forte subida entre 15 000 e 8000 - 6000 BP\*, em dois impulsos principais, o segun-

do dos quais coincidente com o “Ótimo Climático” do início do Holocénico (cerca de 10 000 BP), caracterizado por temperaturas médias globais apenas 0.5-1°C superiores às actuais, numa época em que o actual deserto Sahariano era uma savana pujante, com flora e fauna variadas e abundantes.

Após 6 000 BP, o ritmo de subida do nível do mar diminuiu marcadamente de intensidade (Fig. 8), atingindo cota próxima da actual há cerca de 5 000 anos. A oscilação climática conhecida como “Pequena Idade do Gelo”, que assolou a Europa desde meados do século XV até ao século XIX, caracterizou-se por uma temperatura média global de apenas 0.5 a 1°C inferior à actual mas os seus impactos na agricultura e na economia europeias foram devastadores.

A “Pequena Idade do Gelo” foi precedida de um período substancialmente mais ameno do ponto de vista climático, conhecido como “Pequeno Ótimo Climático” que possibilitou a navegação entre a Noruega, a Islândia e a Gronelândia e a colonização desta última pelos povos nórdicos até ao século XIII (cf. [www2.sunysuffolk.edu/mandias/lia/](http://www2.sunysuffolk.edu/mandias/lia/)); este período foi também caracterizado em toda a Europa por colheitas abundantes, regularidade sazonal, e temperaturas amenas. A transição para a “Pequena Idade do Gelo”, rápida à escala humana, acarretou uma das maiores fomes de que há memória acompanhada

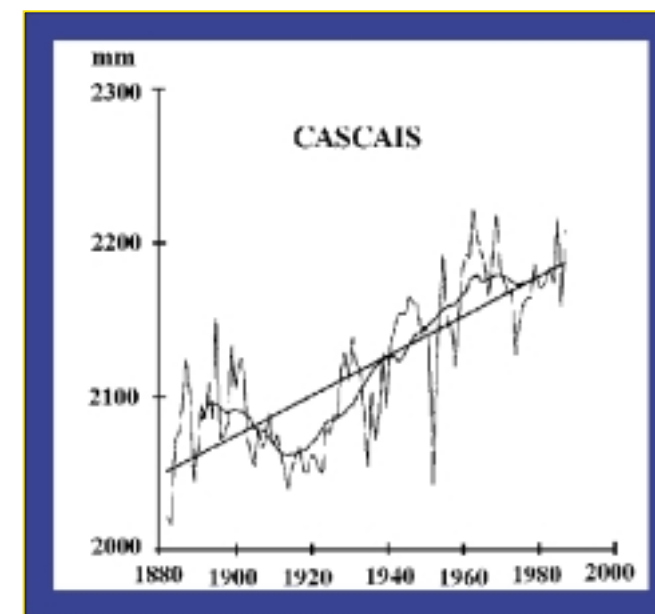
\*BP - “Before Present”, convencionalmente tomado como o ano 1950.

E se a estufa em que vivemos for inundada?

por devastador surto de peste negra, desencadeadas pela ruptura da economia e produtividade agrícolas. A mesma razão, aliada à impossibilidade de navegação entre a metrópole e as recém descobertas terras norte-americanas, devido à deterioração climática, conduziu à morte da totalidade dos colonos da Gronelândia, cuja memória até recentemente se considerava ser não mais que uma lenda.

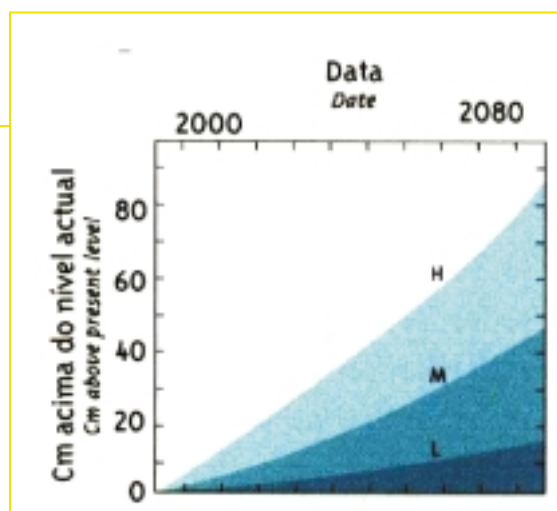
Estes exemplos ilustram impactos dramáticos resultantes de um reajuste relativamente pequeno da temperatura média mundial mas cabe aqui lembrar que os intervalos de tempo em que decorreram nada têm a ver com a rapidez da variação actual e futura dos mecanismos forçadores esperados, que não têm precedente no registo geológico da Terra.

A análise dos registos maregráficos de Cascais e Lagos, (Dias & Taborda, 1992), que se contam entre as mais longas séries de observação europeias, mostram que vivemos hoje em dia em regime transgressivo, caracterizado por uma tendência persistente de elevação do nível médio do mar que parece reflectir essencialmente expansão térmica. Os dados indicam que a taxa de variação média do nível do mar foi, no nosso país, de cerca de +1.5 mm/ano no último século (Fig. 9), um valor semelhante às médias obtidas noutros pontos do Globo no mesmo intervalo de tempo e marcadamente mais elevado do que sucedeu nos últimos dois ou três milhares de anos. As mais recentes previsões do IPCC apontam para um aumento acumulado do nível médio global dos oceanos de 0.09 a 0.88m em 2100, relativamente à sua posição em 1990 (Fig. 10). Os cenários de elevação propostos devem ser, caso a caso, confrontados com as especificidades locais em termos de movimentação vertical do bordo continental. Estes últimos podem ser aditivos, agravando a taxa de elevação relativa do nível do mar em contextos geológicos subsidentes (Veneza, delta do Mississipi ou Taiwan, por exemplo), induzidos por causas naturais ou artificiais (extracção de hidrocarbonetos ou de água subterrânea). Noutros locais, onde a epi-



**Figura 9** - Curva de evolução do nível médio do mar no marégrafo de Cascais desde finais do séc. XIX, alisamento com médias móveis e regressão linear (modificado de: Dias & Taborda, 1992).

rogenia levante a margem continental, o efeito da elevação absoluta do oceano pode ser compensado ou mesmo excedido, dando origem a um recuo da linha de costa (litoral escandinavo, por exemplo).



**Figura 10** - Cenários optimistas (L), pessimistas (H) e mais provável (M) da evolução do nível médio do mar no séc. XXI (modificado de: Andrade, 1998).

## Consequências da subida do nível médio do mar

Que consequências acarreta o fenómeno da elevação do nível médio do mar? Entre outras, podem-se citar a salinização dos aquíferos costeiros, o aumento da frequência e intensidade das inundações e dos danos provocados pelas tempestades, a evolução de zonas húmidas, o assoreamento de lagunas e de estuários e a erosão de praias. Em comum, todas estas consequências partilham o facto de afectarem a faixa litoral dos continentes, com especial relevância para as regiões mais baixas. Esta faixa, com cerca de 500 000km de comprimento e muito estreita, alberga mais de 80% da população mundial e, em consequência, a maioria absoluta dos

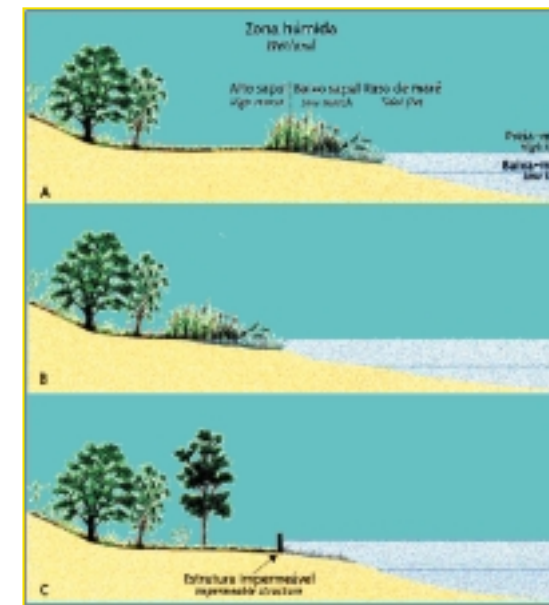
centros de decisão política e de produção industrial, de actividade económica e cultural e, em muitos países, de produção agrícola e florestal, que asseguram a sobrevivência de largos sectores da população. Entre nós, aproximadamente 75% da população vive na faixa costeira, onde também se localiza a maioria das grandes cidades e no interior da qual se gera mais de 85% do PIB. No presente século, o litoral adquiriu uma importância jamais igualada e a tendência migratória das populações que se deslocam para a periferia dos continentes em busca de melhores condições de vida não cessa de aumentar. Podemos afirmar que existe hoje - e está em crescimento - uma imensa infraestrutura de escala global na qual se alicerçam as fundações de carácter ambiental, social e económica das nações, e que essa infraestrutura está intrinsecamente ligada e dependente da posição actual do nível médio do mar. Em muitos países, esta faixa desenvolve-se maioritariamente abaixo dos 2m de altitude e em regime de subsidência, pelo que qualquer dos cenários anteriormente descritos implica consequências preocupantes em termos de extensão geográfica e de impactos sociais e económicos.

E se a estufa em que vivemos for inundada?

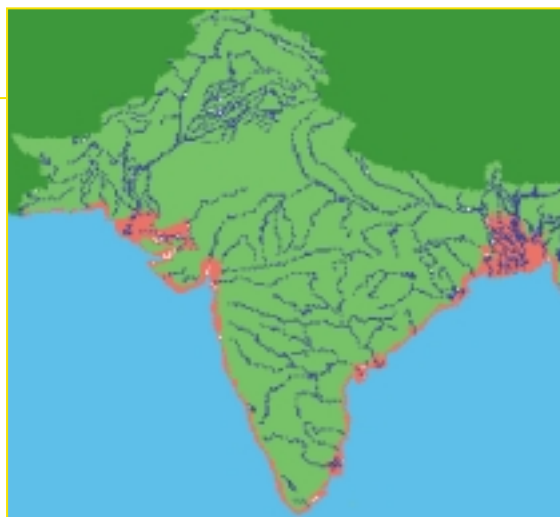
## A evolução de zonas húmidas

O impacto mais imediato da elevação persistente do nível médio do mar é a inundação de planícies ribeirinhas onde, em virtude do declive topográfico reduzido, uma pequena modificação da cota absoluta do nível do mar pode produzir a invasão de extensões apreciáveis de zonas baixas, húmidas ou de território emerso (Fig. 11). Grande parte do litoral português é ocupado por arribas ou por costa mais ou menos alcantilada pelo que este processo não adquire entre nós importância comparável à que tem na costa leste dos E.U.A. e do continente Sul-Americano ou em algumas planícies deltaicas da Ásia. A título de exemplo, estima-se que a elevação de apenas 1 m do nível médio do mar implicaria a submersão de cerca de 40 000 Km<sup>2</sup> da superfície dos E.U.A. (metade da área de Portugal continental). O mesmo cenário aplicado ao delta do Nilo (onde se concentra a maioria da população e produção agrícola do Egipto) e ao Bangladesh (onde os deltas do Ganges-Brahmaputra-Meghna representam 80% do território nacional cultivável e onde vivem da agricultura mais de 93 milhões de pessoas) acarretará consequências dramáticas (Fig. 12). No primeiro caso, mais de 16% da população (8 milhões de pessoas) e, no segundo, mais de 10% (9 milhões) seriam afectadas (e desalojadas) directamente pela inundação, estimando-se que os prejuízos económicos imediatos e directos excederiam, em 1985, 4 mil milhões de \$USD no caso do Egipto e 1200 milhões de \$USD no Bangladesh.

Apesar de o dispositivo geomorfológico do litoral continental português contribuir para mitigar os efeitos da inundação directa resultante de elevação do nível médio do mar, estudos recentes indicam que em cerca de 2/3 da sua extensão existe risco de perda de terreno, por erosão ou inundação. Convém não esquecer que as zonas húmidas portuguesas, associadas maioritariamente a espaços lagunares ou estuarinos, são locais de importância ecológica e económica notáveis, enquanto áreas de refúgio, de nidificação e internada de aves, e berçário de espécies aquáticas, parte das quais integram os efectivos



**Figura 11** - Elevação do nível do mar e recessão de zonas húmidas. A - secção ideal de uma zona húmida em regime transgressivo. B - Translação da zona húmida sem perda apreciável de superfície permitida por enquadramento ambiental favorável. C - Redução ou afogamento dos conteúdos sedimentar, morfológico e biótico de uma zona húmida em regime transgressivo e enquadramento ambiental desfavorável - barreira física (modificado de: Andrade, 1998).



**Figura 12** - Regiões com máxima densidade populacional do Paquistão, Índia e Bangladesh (cor vermelha) (Fonte: [www/fao.org/](http://www/fao.org/)).

de pesca. Estas regiões, preferencialmente ocupadas por rasos de maré e sapais, salgados ou salobros, têm uma produtividade biológica que iguala ou excede a de qualquer outro sistema natural ou agrícola. Funcionam também como "filtros" naturais e muito eficientes, removendo poluentes da água, nomeadamente metais pesados, elementos radiogénicos, azoto e fósforo, imobilizando-os no seio da coluna sedimentar em agração vertical. Não é fácil quantificar estes valores em termos monetários, mas algumas estimativas norte-americanas atribuíam em 1983 um retorno anual de \$USD 14 000 por hectare de sapal.

Em contexto geomorfológico favorável, a elevação lenta do nível médio do mar pode manter ou mesmo conduzir

à expansão da superfície ocupada pelas zonas húmidas, devido à sedimentação acelerada, captura de matéria orgânica e modificação da amplitude de marés – de facto, o registo geológico de muitas zonas húmidas formadas nos últimos 4000 anos, caracterizados por variações do nível médio substancialmente inferiores a 1mm/ano, sugere que grande parte destas manchas se limitou a sofrer translação para terra ou aumentou mesmo a sua superfície. Porém, são raras as situações actuais em que as taxas de sedimentação igualem a taxa esperada de elevação do nível médio do mar no futuro próximo. Daqui decorre que parte apreciável das zonas húmidas será inundada enquanto outras poderão eventualmente migrar para o interior das terras baixas adjacentes, na ausência de barreiras físicas impermeáveis, naturais ou artificiais. Do primeiro tipo são exemplos as arribas mortas ou as vertente fluviais que marginam boa parte do espaço intertidal dos estuários e das lagunas costeiras portuguesas. Do segundo tipo citam-se os diques, paredões ou outras estruturas de contenção e regularização da maré que proliferam nos nossos estuários e lagunas, construídos para proteger a faixa terrestre ou, mais vulgarmente, limitando salinas, pisciculturas ou talhões recuperados para fins agrícolas. Estas barreiras constituem factor de inibição da capacidade de translação que caracteriza as manchas de sapal quando solicitadas por um regime transgressivo (Fig. 11); entre nós, o tipo de uso tradicional da faixa intertidal e o dispositivo geomorfológico predominante favorecem o afogamento e eliminação física

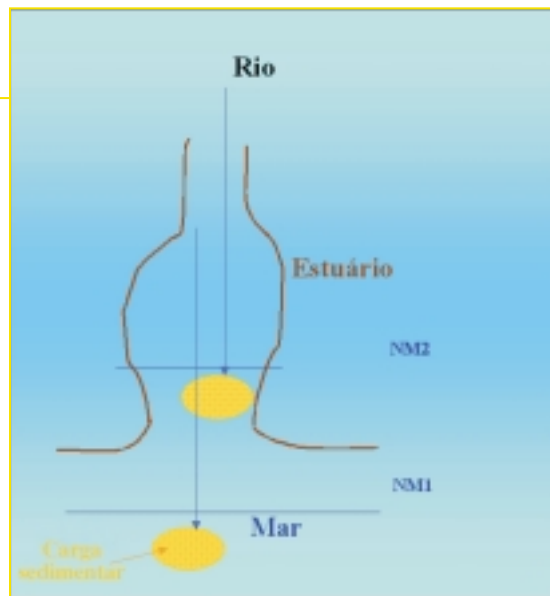
E se a estufa em que vivemos for inundada?

destas manchas, com todos os prejuízos de natureza ambiental e económica que este facto acarreta.

## O assoreamento de lagunas e estuários

A generalidade das lagunas portuguesas ocupa posição terminal nos sistemas hidrográficos afluentes ao litoral. É sabido que o pendor dos cursos de água é habitualmente maior nos trechos localizados a montante do que nos sectores a jusante. De facto, o perfil longitudinal de um rio configura a actividade localizada da erosão e da deposição fluviais de que resulta um traçado ideal (previsível com instrumentos matemáticos) que maximiza o rendimento dos processos de evacuação da água pluvial da margem terrestre. A capacidade de incisão de um vale fluvial ou de uma rede hidrográfica é função do seu nível de base (na generalidade dos casos coincidente com o nível médio do mar), abaixo do qual os rios perdem capacidade erosiva. Ora, em regime transgressivo, o nível de base é constantemente elevado e a porção terminal do vale fluvial é inundada, para formar um estuário. Porquê então invocar o assoreamento e não a simples inundaçã e aumento da profundidade como consequência fundamental daquele regime? A razão primordial reside no facto de os sistemas fluviais constituírem não apenas os melhores dispositivos hidráulicos de evacuação da água da superfície dos continentes mas serem também veículos de transporte sedimentar. Esses sedimentos, elaborados no continente, que originalmente eram descarregados no oceano, serão depositados assim que o perfil longitudinal encontrar o seu nível de base, que já invadiu o estuário (Figura 13). Deste modo, as regiões terminais dos cursos de água entulham-se com sedimentos e os locais de deposição preferencial migram para regiões cada vez mais interiores do estuário ou dos afluentes lagunares, à medida que o nível de base se eleva em sintonia com o nível do mar. Por esta razão a generalidade dos estuários portugueses dispõe de amplas planícies aluviais, lezírias e campos de sapal nas suas regiões terminais, sendo vulgarmente observável o assoreamento intenso de secções mais interiores dos vales. Estes, perderam já o seu perfil típico em "V" para produzir vales de fundo plano à custa do enchimento sedimentar induzido pela elevação holocénica do respectivo nível de base. O estuário do Tejo contém mesmo um verdadeiro delta formado pelos





**Figura 13** - Representação esquemática em planta de um estuário no qual o nível médio do mar (NM) se eleva da posição 1 para 2, originando a deslocação dos centros de deposição

mouchões da região montante do "mar da Palha", onde se deposita a esmagadora maioria da carga sólida veiculada pelo canal fluvial quando desemboca nesse imenso espelho de água. Devido ao regime transgressivo, está assim estabelecida a tendência geral para o assoreamento de estuários, lagunas e de outras bacias de maré costeiras, cuja intensidade previsivelmente aumentará no futuro próximo em consequência do aumento da taxa de subida do nível médio do mar despoletada pelas modificações climáticas. Na ausência de intervenções artificiais, todos os espaços lagunares, estuarinos e boa parte das bacias portuárias do litoral português estão assim inexoravelmente condenados ao assoreamento, pantanização e colmatagem total. Alguns (Armação de Pêra, Carvalhal, Pederneira), porque de dimensão mais modesta ou devido a factores particulares, com relevância para a actividade humana, colmataram já completamente, restando apenas

testemunho da sua presença em documentação histórica ou no registo geológico. Outros, como as Lagoas de Melides, de Santo André ou os estuários interiores do Tejo e do Sado têm esperanças de vida que não excedem alguns séculos, na hipótese mais optimista e se a Natureza for deixada livre para seguir o seu curso.

## A erosão das praias

Os processos de erosão, de mobilização e de transporte sedimentar que acompanham a rebentação das ondas são característicos do bordo interior da faixa litoral (Fig. 14). A variação do nível médio do mar é, sem dúvida, um dos factores capazes de forçar erosão costeira mas não é causa única e, em muitos casos, nem sequer a mais importante. As modificações do balanço sedimentar do litoral, naturais ou de natureza antropogénica são, na generalidade dos casos (incluindo Portugal), a causa predominante; o número de variáveis que interferem no processo erosivo é tão grande e a própria natureza do pro-

E se a estufa em que vivemos for inundada?

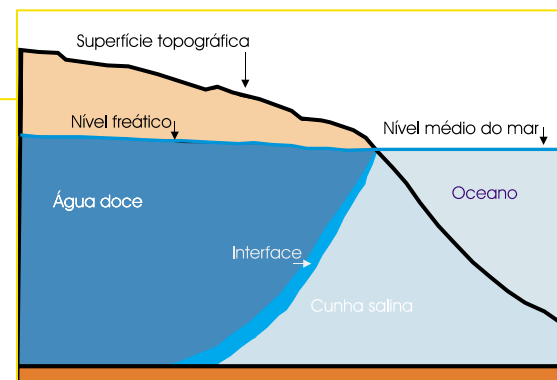
cesso tão complexa que se torna muito difícil separar e quantificar a fracção do processo erosivo imputável exclusivamente à elevação do nível médio do oceano. Em regime transgressivo a posição relativa da faixa costeira está em permanente mudança visto que é constantemente empurrada para o interior dos continentes à medida que o volume dos oceanos aumenta. Por outro

lado, se a elevação do nível do mar for relativamente rápida, o bordo terrestre reagirá, desencadeando ou incrementando um processo erosivo, capaz de fornecer aos fundos adjacentes o enchimento sedimentar necessário para restabelecer a forma e dimensões anteriores da cunha litoral. Se a tendência transgressiva persistir, nunca se recupera completamente a situação de equilíbrio procurada pela Natureza e a erosão torna-se crónica.

Este processo, absolutamente natural, coloca um problema à generalidade dos países cuja faixa costeira foi de modo pouco previdente ocupada por edifícios, estradas, indústrias e outras estruturas que se pretendem duráveis. A migração da costa é pois habitualmente encarada como um fenómeno inaceitável e tem obrigado à construção de obras de defesa rígidas e pesadas. Os estudos disponíveis do litoral português sugerem que a elevação recente do nível médio do mar pode ser responsável por 10 a 20% da erosão observada nos últimos 25 – 50 anos em troços litorais baixos e que oferecem resposta rápida à variação do nível de base: Espinho - Cabo Mondego e Algarve central - oriental. Trata-se de estimativas máximas e julga-se que a erosão que aflige a generalidade do nosso litoral se deve a outras causas, que não cabe aqui discutir. Porém, se o processo erosivo se encontra já definitivamente instalado, a resposta do litoral a uma elevação rápida do nível médio do mar será certamente no sentido do agravamento da sua intensidade. Noutros litorais do Mundo, como partes da costa leste norte-Americana a variação do nível de base é



**Figura 14** - Erosão de arribas talhadas em areias plio-pleistocénicas do Algarve. Mostra-se a posição do bordo superior da arriba linear em 1990 e em 1996.



**Figura 15** - Esquema da interface entre água doce e salgada num aquífero costeiro (modificado de: Custódio & Llamas, 1976).

efectivamente a causa primária da erosão costeira, bem como da translação de barreiras detriticas destacadas (ilhas de barreira) em direcção à margem continental. Nestes casos, os cenários futuros são substancialmente mais gravosos que o descrito para o litoral português, mesmo que os ritmos de elevação do nível médio se fiquem pelas estimativas mais optimistas.

## A intrusão salina

Nas zonas costeiras, a água subterrânea proveniente do continente e que integra um aquífero costeiro, descarrega no oceano, frequentemente nas vizinhanças da faixa intertidal, dando nestes casos origem a nascentes (os "olheiros" dos Olhos de Água, no Algarve, por exemplo). A permeabilidade que caracteriza o maciço rochoso costeiro permite também a penetração da água oceânica, pelo que se estabelece nestes aquíferos uma interface água doce/ água salgada cuja localização depende do potencial referido ao nível médio da água do mar. A água doce, menos densa, acumula-se sob a forma de uma lente, que flutua sobre a cunha de água salgada, mais densa (Fig. 15).

Em regime transgressivo, a elevação do nível de base empurra aquela interface para o interior do aquífero pelo que se reduz o caudal efluente no oceano e se favorece a penetração da cunha de água salgada, contaminando as captações costeiras. O teor em ião cloreto pode, por esta razão, aumentar de concentrações normais (cerca de 25mg/l) para valores próximos de 19 000mg/l (concentração típica na água do mar); note-se que o limite máximo recomendado na Europa para água de consumo é de 200mg/l. Em Portugal, os problemas actuais de salinização de aquíferos costeiros (principalmente no Algarve, Madeira e Porto Santo) devem-se essencialmente a sobreexploração de água subterrânea, que conduz ao mesmo efeito. A aceleração da taxa de elevação do nível médio do mar agravará necessariamente os problemas já existentes e muito provavelmente à expansão destes efeitos a aquíferos costeiros presentemente não contaminados. Uma vez instalada, a intrusão salina não é fácil de controlar e a sua correcção é morosa e sempre muito dispendiosa.

E se a estufa em que vivemos for inundada?

## Considerações finais

O conhecimento e discussão da evolução das condicionantes climáticas neste século e das suas consequências no que respeita à subida do nível médio do mar devem transcender os limites da comunidade científica e generalizar-se a todos os sectores da Sociedade. De facto, os índices de ocupação da zona costeira, quer mundial quer portuguesa, não cessam de crescer, avolumando as pressões sobre uma faixa estreita e extremamente vulnerável. Os valores intrínsecos ao litoral obrigam-nos a contribuir através de todos os meios ao nosso alcance para a sua gestão sustentada, de forma a podermos legar às gerações vindoras um património melhor compreendido e mais saudável.

## Bibliografia Citada

- Andrade, C. (1998) – Dinâmica, erosão e conservação de zonas de praia. Monografia, Expo' 98, 88 pp.
- CPAC (2001) – Programa Nacional para as Alterações Climáticas. Versão 2001 para discussão pública. Comissão para as Alterações Climáticas, 67 pp.
- Custodio, E. & Llamas, M. (1976) – Hidrologia subterranea, 2ªed., Tomo II, Omega SA, 1157 pp.
- Dias, J. (1987) – Dinâmica sedimentar e evolução recente da plataforma continental portuguesa setentrional. Dissertação de Doutoramento em Geologia, Faculdade de Ciências de Lisboa, 384pp.
- Dias, J. & Taborda, R. (1992) – Tidal gauge data in deducing secular trends of relative sea level and crustal movements in Portugal. *Journal of Coastal Research*, 8, 3, pp. 655-659.
- IPCC (2001) – Climate Change 2001. The Scientific basis. Cont. of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. UNEP, WMO, Cambridge University Press, 881 pp.
- Warrick, R., Barrow, E. & Wigley, T (1990) – The greenhouse effect and its implications for the European Community. CRU, Univ. East Anglia, UK, 30 pp.





Química



# A Água e as Muitas Águas

*Todos os rios vão dar ao mar e o mar não transborda;  
Vão desaguar donde saíram para tornarem a correr*

*Eclesiastes 1.7*

*Maria Filomena Camões*

## A Água

### Quantas Águas Há?

Há um composto químico, a água, de fórmula molecular  $H_2O$ . Como qualquer espécie química, a substância água tem características próprias. Há, por outro lado, inúmeras misturas, homogéneas e heterogéneas, de água com outras substâncias sólidas, líquidas e gasosas.

### Composição da Água

A água é uma substância composta pelos elementos, oxigénio, O e hidrogénio, H, na proporção 1:2. Uma maneira de provar esta afirmação é através da electrólise da água.

### Electrólise da Água

Numa célula de vidro com dois compartimentos comunicando entre si (e com um terceiro, intermédio, aberto), coloca-se água, ligeiramente acidulada com  $H_2SO_4$  para aumentar a condutividade eléctrica, onde mergulham dois eléctrodos inertes (ânodo,+ e cátodo,-) por exemplo de carbono, C, entre os quais se aplica uma diferença de potencial (pode-se usar uma bateria de automóvel) (Fig. 1). Verifica-se a produção de gases, com abaixamento do nível da água em ambos os vasos (tendo entretanto subido no tubo do meio), embora em volumes diferentes. No cátodo liberta-se o dobro do volume de gás em relação ao que se liberta no ânodo.

A identificação dos gases pode ser feita, respectivamente, pelas suas propriedades de combustível,  $H_2$ , e de comburente,  $O_2$ . À saída do vaso catódico aproxima-se um fósforo incandescente; o gás arde com uma combustão rápida e

**M<sup>a</sup> Filomena Camões** é licenciada em Ciências Físico-Químicas, em 1996, pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e Doutorada em Química-Física, em 1973, pela Universidade de Newcastle-upon-Tyne (UK). Fez agregação em Química Analítica em 1993. Actualmente é professora Associada com agregação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Tem ocupado vários cargos no âmbito da sua actividade profissional, entre eles: Presidente da Divisão de Química Analítica da Sociedade Portuguesa de Química; Representante da Sociedade Portuguesa de Química na Divisão de Química Analítica da Federação Europeia das Sociedades de Química; Presidente-eleita da EURACHEM; Membro Titular da Comissão de Química Electroanalítica e do Grupo de Trabalho sobre pH - V.5 da IUPAC; Membro do Conselho Consultivo da Revista de Educação da FCUL; Membro das Comissões Editoriais das Revistas SENSORS (CH) e ELECTRONIC JOURNAL OF MATHEMATICAL AND PHYSICAL SCIENCES (USA); Vogal do CNEES (Conselho Nacional para os Exames do Ensino Secundário), 1995-1998; Vogal do Conselho Directivo da FCUL 1977-78; Presidente da Assembleia de Representantes da FCUL, 1988-1989. Coordenadora do Grupo Química Electroanalítica e Ambiental do Centro de Electroquímica e Cinética e do Departamento de Química e Bioquímica da Universidade de Lisboa.

É autora de mais de 100 publicações de carácter científico, pedagógico e de divulgação.

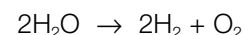
Consultor

**José C. Teixeira Dias** é licenciado em Ciências Físico-Químicas, em 1966, pela Universidade de Coimbra e doutorado em Química, em 1970, pela Universidade de Sussex, Inglaterra. No Departamento de Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, foi Professor Auxiliar entre 1971 e 1974, Professor Extraordinário até 1980 e Professor Catedrático até 1996. Actualmente é Professor Catedrático de Química da Universidade de Aveiro. Tem realizado investigação científica na área da Química-Física Molecular, sendo autor ou co-autor de 120 artigos científicos, três manuais universitários, três livros de Química para o ensino secundário, e editor de um livro de actas do curso avançado da OTAN sobre Líquidos Moleculares, em 1991.

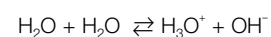


Fig. 1 - Electrólise da água.

explosiva, associada ao som de um silvo agudo, característico das misturas de hidrogénio com ar. À saída do vaso anódico aproxima-se um pavio incandescente, cuja combustão se torna mais viva, porque é alimentada pelo oxigénio. Obtiveram-se, portanto, as substâncias elementares  $H_2(g)$  e  $O_2(g)$  na proporção em que os respectivos átomos existem na molécula de água.



Auto-ionização da Água- A água pura não contém unicamente moléculas  $H_2O$ . Um litro de água, de massa molar  $18 \text{ g mol}^{-1}$ , pesa  $1 \text{ kg}$ , o que corresponde a  $55,5 \text{ mol dm}^{-3}$ . Algumas dessas moléculas, uma em cada dez milhões de moles de moléculas  $H_2O$ , ionizam-se. Uma molécula de água reage com outra, originando um ião  $H_3O^+$  e um  $OH^-$ , que existem, então, na concentração  $10^{-7} \text{ mol dm}^{-3}$ , cada;  $pH=7$ .



$$K_w = [H_3O^+][OH^-] = 10^{-14}$$



Fig. 2 - Hidratação do Sulfato de cobre.

### Identificação da Água

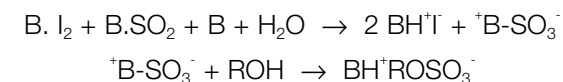
Para identificar uma substância recorre-se a algumas das propriedades que lhe são características.

No laboratório, quando se quer testar a presença da água, utiliza-se geralmente um processo qualitativo prático de identificação, que se baseia na observação de mudança de cor do sulfato de cobre. (Fig. 2). O sulfato de cobre anidro,  $CuSO_4$ , é branco. Pela adição de água forma-se o sulfato de cobre hidratado,  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ , que é azul

$$CuSO_4 + 5H_2O \rightarrow CuSO_4 \cdot 5H_2O$$


Por aquecimento do sulfato de cobre hidratado liberta-se água e obtém-se de novo o sulfato de cobre anidro.

Quantitativamente, a água, acompanhando, por exemplo, azeite e outros óleos, pode-se determinar por destilação com arrastamento de vapor (com xileno), recebendo o vapor condensado em proveta graduada, onde são visíveis as duas fases e os respectivos volumes mensuráveis. A água presente, mesmo a níveis vestigiários, em muitas substâncias sólidas ou líquidas, tais como, polímeros, alimentos, ou solventes orgânicos, é vulgarmente avaliada por uma titulação de Karl Fischer, baseada numa reacção redox, específica para a água, em que iodo,  $I_2$ , é reduzido a ião iodeto,  $I^-$ , na presença de uma base orgânica, B (piridina, imidazola, ou dietanolamina) e álcool, ROH:



### Estrutura da Água

Cada molécula é constituída por um átomo de oxigénio ligado a dois átomos de hidrogénio por ligações simples. (Fig. 3). Como resultado do momento dipolar,  $m$ , de cada ligação,  $m = q d$  (carga  $q$  à distância  $d$ ), a água apresenta polaridade, com carga negativa do lado do oxigénio, segundo a direcção do momento dipolar total da molécula. O momento dipolar da água é  $1,84 \text{ D}$ , não tão exageradamente alto que justifique as suas propriedades aparentemente anómalas. Apesar de ser constituída por moléculas leves ( $M=18 \text{ g mol}^{-1}$ ), a água,  $H_2O$ , tem pontos de fusão e de ebulição elevados. A energia necessária para evaporar  $1 \text{ g}$  de água  $\Delta H_{ebul}$ , no seu ponto de ebulição, é grande, se comparada, por exemplo, com amoníaco,  $NH_3$ , e fluoreto de hidrogénio,  $HF$ , hidretos dos elementos entre os quais o oxigénio se situa na Tabela Periódica:

	$NH_3$	$H_2O$	$HF$
$M$	17	18	20
$T_{fusão}/^{\circ}C$	-78	0	-83
$T_{ebul}/^{\circ}C$	-33	100	20
$\Delta H_{ebul}/J \text{ g}^{-1}$	1373	2268	1512
Permitividade relativa a $0^{\circ}C$	19,6	88,0	83,6

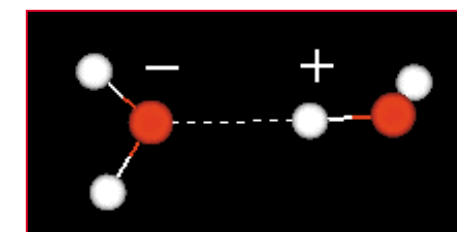


Fig. 3 - Ligação entre duas moléculas de água

As propriedades da água à escala macroscópica, quando se manipula elevado número de moléculas, resultam do que sucede à escala microscópica, em cada molécula e na interacção com moléculas vizinhas.

### Os Agregados Moleculares

No estado de vapor, a temperaturas elevadas e baixas pressões, as moléculas de água encontram-se com a menor organização possível, com movimentos desordenados. As moléculas estão afastadas, exercendo, umas em relação às outras, interacções mínimas. Nestas circunstâncias a água não tem manifestações anormais. À medida que se comprime e arrefece, as moléculas movem-se menos rapidamente e aproximam-se. As interacções tornam-se mais importantes. Atracções de van der Waals e entre dipolos contribuem para a tendência relativa da água para o estado líquido.

No estado sólido, a água forma cristais de gelo, onde cada molécula está rodeada por outras quatro numa estrutura em diamante. (Fig. 4).

A menor distância entre núcleos de oxigénio é 2,78 Å. A estrutura do gelo é consideravelmente aberta, o que é consistente com a sua baixa densidade. O volume específico do gelo é 1,09 cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>; no empacotamento de esferas de 2,76 Å, 1 g ocuparia 0,50 cm<sup>3</sup>, isto é, cerca de metade, havendo outro tanto espaço vazio.

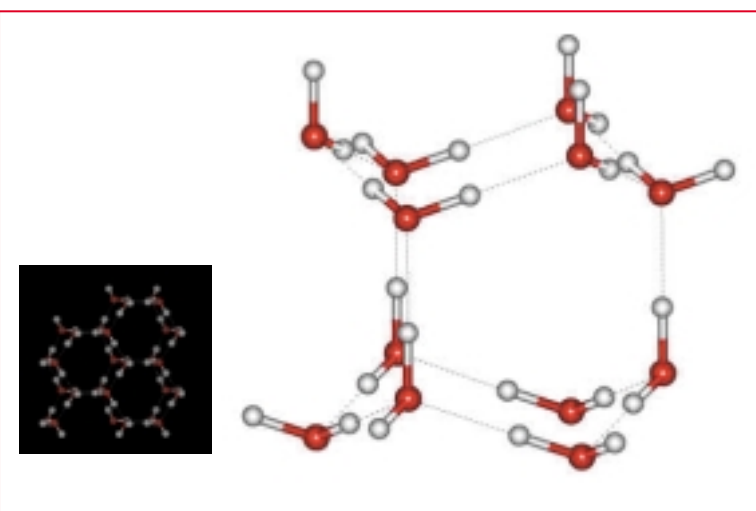


Fig. 4 - Estrutura do gelo.

As forças que unem as moléculas de água na estrutura do gelo são ligações por pontes de hidrogénio. As ligações de hidrogénio têm cerca de um décimo da força das ligações covalentes entre O e H na molécula. São, no entanto, muito superiores às forças de Van der Waals e às forças dipolo-dipolo. Todas as pontes O-H...-O, no gelo, são lineares. É isto que obriga a que as moléculas se afastem e que a estrutura do gelo seja aberta.

Ao aquecer gelo, as pontes de hidrogénio dobram e algumas quebram-se. A estrutura destrói-se e as moléculas de água aproximam-se. (Fig. 5).

As pontes de hidrogénio persistem na água líquida, o que se manifesta na elevada temperatura de ebulição.

Nos compostos onde existem, as pontes de hidrogénio manifestam-se. A maioria dos processos biológicos, desde a construção das proteínas numa célula até à atracção da sujidade à pele, envolve pontes de hidrogénio.

As ligações de hidrogénio mantêm as moléculas em grandes agregados com momentos dipolares muito superiores ao de uma molécula. Isto é particularmente verdade para a água, que contém redes tridimensionais de moléculas.

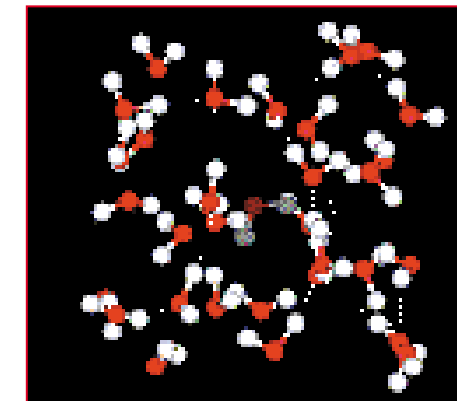


Fig. 5 - Moléculas de água líquida.

### Critérios de Pureza

A água, H<sub>2</sub>O, existe em três estados físicos de agregação, sólido (gelo), líquido (água) e gasoso (vapor de água).

Cada substância é caracterizada pelo seu ponto de fusão e pelo seu ponto de ebulição.

Por aquecimento (calor de fusão) a substância passa do estado sólido ao estado líquido. Quando líquida, a substância pode, por arrefecimento, passar ao estado sólido. A temperatura a que esta mudança de estado físico ocorre, com equilíbrio dinâmico entre as duas fases, chama-se temperatura ou ponto de solidificação e para cada substância pura, nas mesmas condições de pressão, é igual ao ponto de fusão,  $T_{fusão}$ ; sem aquecimento, ou arrefecimento, as moléculas movem-se entre a fase sólida e a líquida, num sentido e noutro, a igual velocidade.

Uma substância líquida passa totalmente, por aquecimento (calor de ebulição), ao estado gasoso. A substância gasosa passa, por arrefecimento, ao estado líquido, à temperatura ou ponto de liquefacção. Para cada substância pura, nas mesmas condições de pressão, o ponto de ebulição,  $T_{ebul}$ , e o ponto de liquefacção coincidem.

Para diferentes substâncias poderá existir um ponto no qual coexistam as três fases, sólida, líquida e gasosa; é o chamado Ponto Triplo. Para a água ele ocorre a 273,1600 K e 4,58 mm Hg. Isto significa que o gelo, à temperatura de 0 °C, tem uma pressão de vapor de água de 4,6 mmHg, o que possibilita a sua sublimação, isto é, a passagem de sólido a vapor, sem passagem pelo estado líquido. Esta é a base do processo de liofilização, de enorme importância na preservação de materiais biológicos, como sejam alimentos e sangue. (Fig. 6).

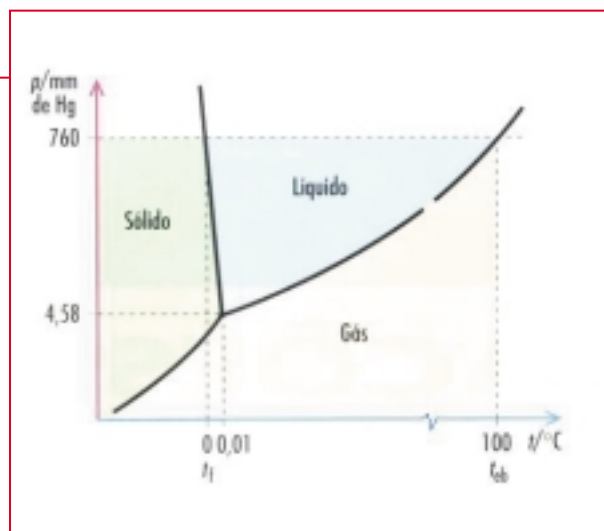


Fig. 6 - Diagrama de Fases da Água.

À pressão normal de 1 atmosfera (760 mmHg= =101325 Pascal) a temperatura a que ocorre a fusão do gelo (ponto de fusão do gelo, ou ponto de solidificação da água) é, por convenção, 0 °C (leia-se “Celsius”) e o ponto de ebulição da água (ponto de liquefacção do vapor de água) é 100 °C.

Não é só a 100 °C que existe vapor de água. Às temperaturas correntes há humidade atmosférica, isto é, vapor de água resultante da evaporação parcial de água dos mares, dos rios, etc. Quanto mais alta é a temperatura, maior a quantidade de vapor de água que se liberta para a atmosfera. O aquecimento provoca aumento da pressão de vapor de água. A cada temperatura há uma pressão máxima de vapor de água. A 100°C é de 1 atm = 760 mmHg, ou seja, o

mesmo que a pressão atmosférica normal; a água entra em ebulição e passa violentamente ao estado gasoso.

A 10 km de altitude, a que voam os aviões de longo curso, a temperatura atmosférica é de cerca de -50 °C. Apesar da temperatura muito negativa, a água está no estado gasoso, pois a pressão é extremamente baixa quando comparada com a pressão atmosférica ao nível médio do mar.

A capacidade calorífica específica da água, 4,184 J g<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, ou seja, a quantidade de calor capaz de elevar de 1°C (ou 1K) a temperatura da água, sem mudança de estado, é maior que para a maioria de outros líquidos. Por isso a água absorve ou cede grandes quantidades de calor com pequenas variações de temperatura, ajudando a manter as condições climáticas nas regiões influenciadas, o que é patente nos valores de amplitude térmica para as cidades de Lisboa e de Beja, menores para a primeira.

Tabela Comparativa de Valores de Amplitudes Térmicas

	Janeiro 1993	
	Lisboa	Beja
Média $T_{max}/^{\circ}C$	14,3	14,6
Média $T_{min}/^{\circ}C$	7,2	4,3
Amplitude média/ $^{\circ}C$	7,1	10,3
	Julho 1993	
	Lisboa	Beja
Média $T_{max}/^{\circ}C$	28,3	35,0
Média $T_{min}/^{\circ}C$	18,8	15,7
Amplitude média/ $^{\circ}C$	9,5	19,3

O calor fornecido ao sólido puro, calor ou entalpia de fusão,  $\Delta H_{fusão}$ , é utilizado na destruição do edifício estruturado e o sólido passa a líquido, a temperatura constante. Também as outras mudanças de estado, a solidificação, a ebulição e a liquefacção se fazem a temperatura constante, pondo em jogo o correspondente calor ou entalpia de solidificação, ebulição ou vaporização,  $\Delta H_{ebul}$ , ou liquefacção. (Fig. 7).

As temperaturas a que ocorrem as mudanças de estado servem para identificar as substâncias e ainda indicam se estão puras ou, pelo contrário, se se encontram misturadas com outras. Quando em vez de uma substância pura, se tem uma solução, de uma forma geral, não se observam valores constantes para pontos de solidificação ou de ebulição. Este facto funciona como teste de pureza. Assim veja-se o exemplo da água com sal. Ao arrefecer começa-se a formar gelo a uma temperatura inferior a 0 °C; há abaixamento crioscópico,  $\Delta T_c$ . A fase líquida é uma solução cada vez mais concentrada em sal e a congelação ocorre a temperaturas proporcionalmente mais baixas. Também na ebulição, a água com sal ferve a temperaturas superiores a 100 °C; é a elevação ebulioscópica,  $\Delta T_e$ . Há libertação de vapor de água, deixando atrás uma solução de concentração crescente e com o ponto de ebulição subindo na mesma proporção. Excepção são as misturas azeotrópicas, em que vapor e líquido têm a mesma composição; o líquido conver-

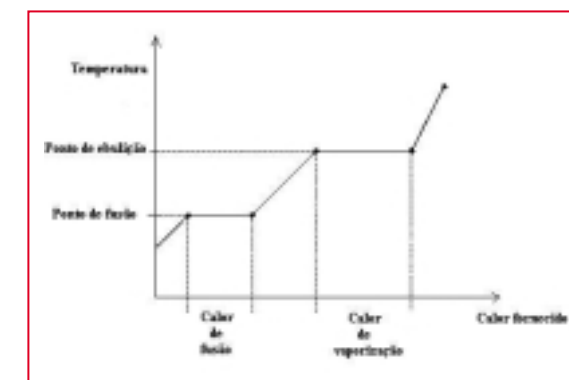


Fig. 7 - Aspecto Geral de uma Curva de Aquecimento



te-se em vapor a temperatura constante. Exemplo, é a mistura azeotrópica de álcool (etanol) e água, em que a temperatura de ebulição da mistura (0,91 mol etanol: 0,09 mol água), à pressão atmosférica normal, é 78,2 °C ( $T_{\text{ebul}}(\text{álcool}) = 78,5 \text{ °C}$ ;  $T_{\text{ebul}}(\text{água}) = 100,0 \text{ °C}$ ), o que impossibilita a obtenção de álcool puro, por destilação.

Preparem-se duas soluções de igual concentração (mol dm<sup>-3</sup>, aproximadamente igual a mol kg<sup>-1</sup>, para soluções aquosas diluídas), respectivamente em sal das cozinhas e em açúcar, arrefeça-se e meça-se a temperatura a que se inicia a congelação de cada solução. Verifica-se que a congelação se inicia primeiro, isto é a temperatura mais alta, ou seja, com menor abaixamento crioscópico,  $\Delta T_c = \Delta T_{\text{fusão}}$  para a solução de açúcar.

$$\Delta T_c = \Delta T_{\text{fusão}} = k_c \cdot c$$

( $k_c$  é a constante crioscópica do solvente, que, para a água é 1,86 K kg mol<sup>-1</sup>)

O abaixamento crioscópico na água salgada,  $\Delta T_{\text{fusão}} = T_{\text{fusão}}(\text{gelo}) - T_{\text{fusão}}(\text{água salgada})$  será cerca do dobro do da água açucarada,  $\Delta T_{\text{fusão}} = T_{\text{fusão}}(\text{gelo}) - T_{\text{fusão}}(\text{água açucarada})$ . Esta observação está associada ao facto de que o açúcar é uma substância molecular que se dissolve na água apenas com dispersão das moléculas, enquanto o sal é uma substância iónica, que, ao dissolver, se dissocia completamente na água, dando origem ao dobro de partículas, os iões sódio e cloreto. Este fenómeno está, aliás, na base de um processo de avaliação de graus de dissociação ou de associação.

Soluções Electrolíticas - A água, dada a sua relativamente elevada permissividade eléctrica, é (Lei de Coulomb) potenciadora da separação de partículas com carga, os iões, dos compostos iónicos nela dissolvidos, formando soluções electrolíticas. Os iões, interagindo com os dipolos da água, rodear-se-ão de maior ou menor número de moléculas de água, hidratando-se.

O abaixamento crioscópico, tal como a elevação ebulioscópica, são propriedades coligativas da matéria, isto é, propriedades que dependem sobretudo do número de partículas presentes e não tanto da sua natureza. (Utilização da Mistura Gelo-Sal: Um Aparente Paradoxo, Boletim SPQ, 26, 1986, 25-28).

Soluções aquosas são tanto mais densas quanto maior a sua concentração. A água do mar, salgada, é mais densa que a água doce. Em grandes massas de água, camadas de diferente densidade tendem a colocar-se por ordem

crescente com a profundidade. Ao longo da costa ocidental portuguesa, o vento afasta para o largo as camadas de água superficial, mais quentes e mais leves, tendo como consequência que camadas de água fria, mais densas, aflorem à superfície. É o fenómeno designado por “upwelling”, bem conhecido de quantos se banham no Atlântico, experimentando as suas frias águas. O Mar Morto está sujeito a evaporação sem compensação de entradas de cursos de água, pelo que a sua salinidade é bastante elevada, sendo sobejamente conhecida a facilidade com que os corpos boiam nas suas águas, a ponto de dificultar a deslocação de potenciais nadadores.

**PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES** - Os corpos, mergulhados em fluidos de densidade  $d$ , (líquidos, ex: água, ou gasosos, ex: ar) recebem deles impulsão,  $I$ , força vertical, de baixo para cima (de sentido oposto ao do efeito gravítico), igual ao peso do volume de fluido deslocado pelo corpo,  $V_{\text{desl}}$ .

$$I = V_{\text{desl}} \times d$$

Para um mesmo corpo, quanto mais leve o fluido (menor densidade), mais mergulha, parando quando o peso de fluido deslocado compensar o peso do corpo. Pela mesma razão, quanto mais denso um corpo, mais ele mergulha num dado fluido.

### Densidade da Água

Também a densidade (densidade absoluta = massa da unidade de volume/ g cm<sup>-3</sup> ou kg dm<sup>-3</sup>) é uma grandeza de grande importância na caracterização das substâncias e no condicionamento do seu comportamento. É corrente comparar-se a densidade de diferentes materiais com a da água (1 g cm<sup>-3</sup> à temperatura ambiente), pelo que esta densidade relativa é traduzida pelo mesmo valor numérico que a densidade absoluta).

#### Densidade de Algumas Substâncias, a 25°C

Ácido Acético, CH <sub>3</sub> COOH	1,1
Água, H <sub>2</sub> O	1,0
Álcool Etílico, CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	0,8
Chumbo, Pb	11,4
Cloreto de Sódio, NaCl	2,2
Cobre, Cu	9,0
Mercúrio, Hg	13,6
Ouro, Au	19,6

A densidade varia com a temperatura, pois que ela provoca variações de volume. Ao arrefecer, a água contrai e atinge um máximo de densidade a 4 °C. Para temperaturas inferiores, o volume aumenta e a densidade diminui; assim, o gelo, com temperatura igual ou inferior a 0 °C, é mais leve que a água. Quando aquecida até 4 °C a água contrai e acima de 4 °C volta a expandir-se.

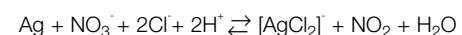
Exemplos de consequências são, as canalizações rebentarem, o gelo flutuar na água e os lagos congelarem à superfície.

Este facto explica ainda que, a grandes profundidades, longe do contacto com o oxigénio atmosférico e da luz promotora da fotossíntese, onde seria normal esperar águas anóxicas, se possam encontrar camadas de águas ricas em oxigénio, resultantes do afundamento de águas frias (a solubilidade dos gases em líquidos é maior a temperaturas mais baixas; desgaseifica-se água aquecendo-a) de zonas polares.

### As Muitas Águas

ÁGUA RÉGIA - Mistura de soluções aquosas concentradas de ácido nítrico e de ácido clorídrico, na proporção 1:3.

A água régia, AR, é o solvente que mais satisfatoriamente dissolve (quimicamente) os metais, particularmente os metais nobres, ouro, prata e platina. É ao facto de dissolver o ouro, rei dos metais, que ela deve o seu nome.



Esta é uma das inúmeras designações compostas, a partir do termo ÁGUA, que traduzem a importância da água e realçam a sua presença constante no meio que nos rodeia, nos processos que nele ocorrem e nas utilizações que dela são feitas. Ex.:

#### Água da chuva

" de bromo  
" de cal  
" de cloro  
" de colónia  
" de Javel  
" de rosas  
" desionizada  
" desmineralizada  
" destilada  
" doce

#### Água dura

"estuarina  
"eutrófica  
"forte  
"medicinal  
"mel  
" mineral  
" potável  
" residual  
" salgada  
" termal

Sendo a água um excelente solvente, não é possível encontrá-la na Natureza no estado puro. Durante o ciclo hidrológico a água interactiva continuamente

com as substâncias com que contacta, sólidas, líquidas, ou gasosas, compostos orgânicos ou inorgânicos, dispersando-as e formando soluções (partículas de dimensão inferior a 10<sup>-7</sup> cm), soluções ou suspensões coloidais (partículas de dimensão entre 10<sup>-5</sup> e 10<sup>-7</sup> cm) e suspensões (partículas de dimensão superior a 10<sup>-5</sup> cm), consoante a dimensão das partículas dispersas. Sendo um recurso abundante, 1400 x10<sup>6</sup> km<sup>3</sup>, não é tanto a quantidade, que permanece constante, mas a qualidade e a localização, que condicionam a sua utilização.

Cobrindo 70% da superfície do Globo Terrestre, confere-lhe a conhecida tonalidade azul, apesar da crescente poluição; 97,3% são de água salgada que se distribuem até uma profundidade média de 4 km. Dos restantes 2,7% que representam a água doce, 77,2% são de gelo das calotes polares e glaciares, 22,4% são de águas subterrâneas e humidade do solo, 0,35% lagoas e pântanos, 0,04% de vapor de água atmosférica e 0,01% constituem os cursos de água. Da água salgada cujo soluto maioritário é cloreto de sódio, 0,6 mol dm<sup>-3</sup> de NaCl, diz-se que tem um pouco de tudo. Alguns componentes minoritários não terão sido identificados, dado que as suas concentrações serão tão baixas que se situarão abaixo dos limites de detecção.

Em média a salinidade da água do mar ronda os 35 g L<sup>-1</sup> (s = 35‰). Amostras certificadas de água do mar, para estudos comparativos, podem ser adquiridas ao Laboratório Hidrográfico de Copenhaga-Dinamarca.

As espécies químicas que acompanham a água em maior ou menor quantidade conferem-lhe diferente qualidade e até denominação.

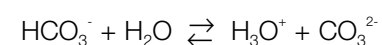
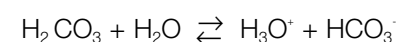
De toda a água existente, só cerca de 1% é utilizada pelo Homem, do qual 5% em usos domésticos e os restantes 95% em usos variados.

A qualidade da água varia muito e é função da constituição geológica dos terrenos com que contacta e das actividades agrícolas, industriais e urbanas. Tende também a variar com as estações do ano às quais estão associadas, entre outras, diferentes condições de temperatura e pluviosidade. São numerosos os parâmetros físico-químicos que caracterizam um determinado tipo de água, mas alguns são de facto particularmente importantes, com efeitos que condicionam a sua utilização nos diversos sectores e ditam a necessidade do seu tratamento para correcção de valores.

De forma geral as águas subterrâneas contêm mais substâncias inorgânicas que as águas superficiais. Estas, por sua vez, têm maior probabilidade de con-

ter microorganismos e matéria orgânica proveniente de seres vivos em decomposição, sendo maior a possibilidade de diversidade de contaminantes. A maior parte da água para consumo é captada de fontes subterrâneas ou à superfície. São cada vez em menor quantidade as águas naturais (que nunca foram usadas) aumentando a quantidade e variedade de águas residuais (já utilizadas). Uma e outras, estando em contacto com sedimentos, podem conter espécies iónicas e/ou moleculares dissolvidas, além de partículas em suspensão. Ao longo do seu ciclo, além do oxigénio e do azoto atmosféricos, a água dissolve outros gases, tais como óxidos de carbono, de azoto e de enxofre.

**Chuvas Ácidas** - A água da chuva é naturalmente ácida devido à dissolução do dióxido de carbono atmosférico, dando origem ao ácido carbónico, que se encontra parcialmente ionizado.



O efeito do ácido carbónico é suficiente para justificar o pH ligeiramente ácido da chuva, cerca de 5,6. Este é o valor abaixo do qual a chuva é considerada uma chuva ácida, sendo conhecidos casos de pH = 4 e mesmo 3, resultantes da acidificação da água das chuvas pelos gases  $\text{SO}_2$  libertado naturalmente pelos vulcões e  $\text{NO}_2$  produto da reacção de  $\text{N}_2$  e  $\text{O}_2$  atmosféricos, mas também cada vez mais associados às combustões quer de carvão quer de petróleo e seus derivados.



As chuvas ácidas contribuem para a destruição das espécies vegetais, como a que se verifica nas florestas do centro da Europa. A chuva ácida, ao cair nos solos, contribui para a sua lixiviação, dissolvendo compostos metálicos. Desta forma, iões metálicos estarão presentes nas águas de rios e lagos, intoxicando as espécies piscícolas que nelas têm o seu habitat. É, por exemplo, conhecida a toxicidade do zinco, do cobre e do alumínio.

Quando uma água sofre variações de qualidade, seja por variação de temperatura ou por adição ou remoção de substâncias dissolvidas ou em suspensão, para além dos limites aceitáveis, diz-se que está poluída.

A lei da Qualidade da Água, DL N.º236/98, de 1 de Agosto, aliada à sua importância legal, constitui um interessante documento técnico sobre requisitos de classificação das águas e informações analíticas qualitativas e quantitativas que a elas respeitam. No mesmo, qualidade de uma água é definida como “o conjunto de valores de parâmetros físicos, químicos, biológicos e microbiológicos da água que permite avaliar a sua adequação para determinados usos directos ou potenciais”.

Embora a água potável, por um lado, não represente o máximo expoente de exigência, em termos de controlo de qualidade e de limites permitidos para os vários parâmetros físico-químicos e, por outro, ela se destina a ingestão numa pequena fracção relativamente a outras utilizações domésticas, (2L/150L), ela constitui o referencial para o abastecimento público.

Uma água potável, da qual tradicionalmente se espera que seja incolor, inodora e insípida, deve poder ser ingerida em quantidades razoáveis, sem perigo para a saúde, ou seja sem perigo de toxicidade. Para tal, devem ser respeitados os critérios de qualidade, no que respeita às várias características, das organolépticas às microbiológicas.

### Tratamento das Águas

*Ó mar salgado, quanto do teu sal  
São lágrimas de Portugal.*

“Mar Português”  
Fernando Pessoa

**Água Eutrófica** - Para um harmonioso desenvolvimento da vida no meio aquático, é essencial que exista oxigénio dissolvido na água, em quantidades suficientes. A respiração traduz-se por uma reacção química de oxidação. O oxigénio é também essencial para a autodepuração da água. É, pois, de primordial importância controlar e garantir este requisito, medindo o Oxigénio Dissolvido, OD. Os efluentes urbanos são caracterizados, particularmente, pela carga em matéria orgânica, que se pode avaliar pela quantidade de oxidante,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , requerido para a sua oxidação, a Carência Química de Oxigénio, CQO. Uma água de temperatura relativamente elevada, rica em nutrien-

tes, é propícia, numa primeira fase, a grande desenvolvimento dos seres vivos aquáticos, animais e vegetais. Ao atingir uma elevada carga orgânica, há consumo de oxigénio, não compensado pelo dissolvido da atmosfera, agravado pelo impedimento da penetração da luz e maior turvação promovida, por exemplo, pelos excrementos, impedindo a fotossíntese, que reporiria o oxigénio. A morte sobrevém e a água diz-se morta, ou eutrófica. A sua recuperação passa pela oxigenação (por agitação) após remoção da matéria em suspensão. Compare-se uma água estagnada com a água de uma cascata!

São várias as situações em que se dispõe de uma água impura e se pretende uma água mais pura, ou, pelo contrário, uma água que precisa de alguns aditivos: uma água de captação que se quer para abastecimento, uma água salgada que se quer dessalinizada, a água da torneira que se quer para utilização laboratorial, uma água que se quer para práticas clínicas, uma água de abastecimento ou de captação que se quer para utilização industrial, como matéria-prima ou para fins energéticos, uma água residual que se quer recuperar, etc., etc. Para a recuperar é, então, preciso tratá-la. As práticas para o conseguir dependem da quantidade e da qualidade da água inicial, da água que se pretende obter e, quando há opção, dos meios existentes.

Em casa ferve-se água para preparar leite dos bebés; pretende-se água bacteriologicamente pura. A elevação de temperatura pode destruir microorganismos, mas não retira à água os sais dissolvidos, que, aliás, por evaporação daquela tenderão a ficar em maior concentração.

Pela fervura expulsam-se os gases dissolvidos. Para remover as substâncias sólidas em suspensão, decanta-se ou filtra-se.

Um dos grandes melhoramentos para a qualidade de vida em geral, e para a saúde pública em particular, surgiu com o desenvolvimento e implementação de sistemas de tratamento de água, nomeadamente água de distribuição. O objectivo é tornar a água saudável, potável, limpa, transparente e sem odor, razoavelmente macia e não corrosiva.

Mesmo sem formação científica ou técnica nesta área, todos, uma vez ou outra, com os meios acessíveis, puseram em prática processos de purificação da água, por exemplo, a filtração para remover substâncias em suspensão, ou a fervura para destruir microorganismos. Já a obtenção de água destilada e/ou água desmineralizada, ou desionizada, de utilização bastante generalizada (ex: baterias de automóveis, ferros de engomar a vapor) exige montagens e material que não exis-

tem em todas as casas. Quer a destilação quer a desmineralização destinam-se à separação da água de substâncias nela dissolvidas. Pela destilação obtém-se vapor de água condensado, liberto de solutos não voláteis, sejam moleculares ou iónicos; pela desmineralização remove-se, por troca iónica, as substâncias ionizadas na água. Antes de ser considerada apta, a água deverá sofrer uma série de tratamentos físicos e químicos, segundo legislação nacional ou internacional, de acordo com processos normalizados (Normas Portuguesas/IPQ) que são periodicamente revistos para actualização, em função de novas descobertas no domínio da Saúde, da Química e da Técnica.

Uma Estação de Tratamento de Água (ETAR) associa os vários passos que constam de um sistema de tratamento de águas de abastecimento. O processo inicia-se pela filtração com uma grade, gradagem, para remoção de partículas sólidas de grande dimensão, como sejam plantas e animais mortos. A água repousa de seguida num primeiro reservatório, onde sólidos menos volumosos se podem depositar e onde a exposição à luz e ao oxigénio atmosférico contribui também para a oxidação, a  $\text{CO}_2$ , do carbono de algumas substâncias que afectem negativamente a cor e o sabor. Segue-se nova filtração, a tamisagem, para remoção de depósitos finos.

De dimensão intermédia entre as moléculas dissolvidas e os sólidos em suspensão, situam-se os colóides que não sedimentam por si só, necessitando da adição de um coagulante químico. Actualmente tende-se a utilizar polímeros orgânicos sintéticos. Alternativamente tem-se tirado partido da pequena dimensão de núcleos moleculares que promovem a adsorção de espécies iónicas, constituindo uma dupla camada eléctrica, formando assim micelas que se repelem por efeito electrostático. Promove-se a floculação, ou coagulação, contrariando este efeito repulsivo por agitação e pela adição de polielectrólitos (substâncias que se dissociam no meio aquoso com formação de partículas de elevada densidade de carga eléctrica, ex:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ).

Este fenómeno tende a ocorrer em condições naturais, na foz dos rios, quando a água doce, arrastando material coloidal, encontra um meio de elevada salinidade, a água do mar, levando a assoreamento. Para abertura à circulação fluvial, procede-se a dragagem, que, se não for devidamente conduzida e controlada, pode levar a catástrofes ecológicas pelo lançamento em suspensão na água de sedimentos com forte carga poluente.

A adição de compostos de alumínio, apesar da sua baixa solubilidade, tem revelado efeitos nocivos pelo acréscimo de alumínio na água, o que, se para consumidores saudáveis pode não representar problema de maior, para doentes renais, quer pela ingestão, quer pela via da hemodiálise, pode ser fatal (Évora, 1990). Há ainda indicações de que poderá estar na origem do síndrome de Alzheimer (ou senilidade precoce).

A floculação não é suficientemente eficaz e, apesar da sedimentação, é necessário proceder a filtração de partículas inferiores a  $100\mu\text{m}$ . Estes filtros são de areia e gravilha, análogos aos que se usam em poços de zonas rurais onde também se recorre a adsorventes de gases, como seja o carvão.

Águas naturais raramente têm revelado composição química imprópria para consumo. Por isso o tratamento mais relevante foi, durante anos, a desinfecção por cloragem, ou cloração, para impedir o desenvolvimento bacteriano. A cloragem consiste na adição de cloro gasoso,  $\text{Cl}_2$ , ou de compostos (ex.: hipocloritos) que dão origem a cloro, o qual acaba por se libertar para a atmosfera. Actualmente tem ganho expressão o tratamento alternativo por ozonização, ou seja, a adição de ozono,  $\text{O}_3$ , de forte poder oxidante da matéria orgânica e dos microorganismos. Associados aos benefícios da ozonização surgiram, porém, novos problemas, como sejam a oxidação de cloretos a cloratos e de brometos a bromatos de elevada toxicidade, requerendo apurado controlo analítico nomeadamente pela moderna técnica de Cromatografia Iónica. que assenta na detecção das espécies iónicas, após separação cromatográfica, por condutividade eléctrica, uma das propriedades de mais baixo limite de detecção.

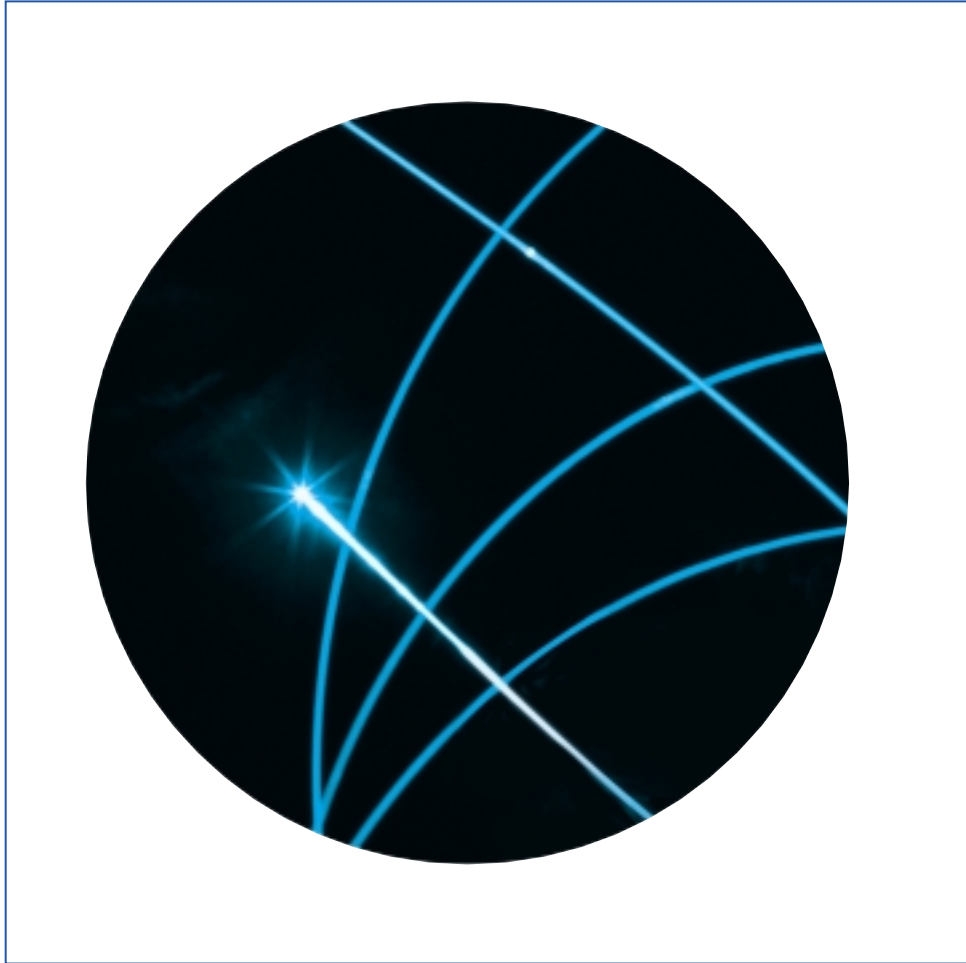
*Era um comerciante de pílulas aperfeiçoadas para acalmar a sede. Engolindo uma por semana, não há necessidade de beber ... Poupa-se cinquenta e três minutos por semana ...*

*Eu, disse o príncipezinho para consigo, se tivesse cinquenta e três minutos para gastar, o que fazia era dirigir-me devagarinho para uma fonte ...*

“O Príncipezinho”

Antoine de Saint Exupéry





Física



# Este líquido é a água

*Paulo Ivo C. Teixeira, José M. Tavares e Margarida M. Telo da Gama*

Não será talvez fácil convencer quem acaba de sair de um Inverno longo e chuvoso que a água é um líquido extraordinário e único. E, no entanto, ela é-o. Parte da dificuldade em aceitar isto prende-se com a familiaridade que temos, ou pensamos ter, com a água: de facto, vemo-la frequentemente à nossa volta, sobretudo no estado líquido. E a estranheza começa já aqui: se pensarmos um instante, não há assim tantos líquidos, quer naturais quer artificiais, e muitos deles – de que são exemplos o leite, o sangue, a cerveja, o vinho, certas tintas – não passam de água “suja”, isto é, contendo (relativamente) pequenas quantidades de outros materiais (“impurezas”). Excepções a esta regra são o álcool, derivados do petróleo como a acetona, ou certas gorduras vegetais, que nada têm de aquoso. Há aqui duas coisas espantosas: em primeiro lugar, que a água seja um tão bom dissolvente que a maior parte dos líquidos nossos conhecidos a tenham por base; e, em segundo lugar, que a água se mantenha líquida no (enorme!) intervalo de temperaturas que vai de 0 °C a 100 °C, e que é precisamente aquele em que os seres humanos (bem como a maior parte da vida animal e vegetal da Terra) podem viver confortavelmente.

A água é, igualmente, notável por ser menos densa no estado sólido - isto é, enquanto gelo - do que quando líquida. Se assim não fosse, não haveria icebergs a flutuar no oceano, e talvez o Titanic tivesse conservado a sua reputação de inafundável. Por outro lado, certas espécies da fauna e flora aquáticas não poderiam, como o fazem, sobreviver debaixo da camada de gelo que por vezes cobre a superfície de muitos lagos e mares.

Prosseguindo com o rol de constatações (quase) triviais, todos sabemos que a água “custa” a aquecer - que é necessário fornecer-lhe uma grande quantidade de calor para que a sua temperatura se eleve. Na linguagem da física, diz-se que a sua capacidade calorífica é muito grande. Por esta razão, a água é um

**Fernando Parente** Professor Associado com Agregação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Doutoramento em Física (especialidade de Física Atómica) pela Universidade de Oregon (USA), em 1979. Actualmente tem a seu cargo disciplinas de Física Geral das licenciaturas da área da Física e da Química no Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Efectua investigação em Física Atómica teórica, nomeadamente no âmbito das estruturas relativistas atómicas. É Pró-Reitor da Universidade de Lisboa.

**Margarida M. Telo da Gama** Obteve o BSC em Física e o Ph D em Física Teórica pela Universidade de Bristol (UK). Foi Visiting Assistant Professor da Universidade de Cornell (EUS) de 1982 a 1985. Em 1985 integrou o corpo docente da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa onde é actualmente Professora Catedrática de Física da Matemática Condensada. Dirige um grupo teórico que estuda os diagramas de fase, a estrutura e as propriedades interfaciais de fluidos complexos e colabora com vários grupos experimentais em redes da EU.

**Paulo Ivo Teixeira** Licenciou-se em Física pela universidade de Lisboa, onde também concluiu o Mestrado em Física da Matéria Condensada. É doutorado em Física Teórica pela Universidade de Southampton (UK). Foi investigador pós-doutorado no FOM Institute for Atomic and Molecular Physics em Amsterdam (Holanda), nas Universidades de Cambridge e Leeds (UK), e no Instituto Superior Técnico. Presentemente é Professor Auxiliar, responsável pela área de Ciência de Materiais, na Faculdade de Engenharia da Universidade Católica Portuguesa.

**José M. Tavares** Obteve a licenciatura (1992), o mestrado (1995) e o doutoramento (1999) em Física na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Foi bolseiro da JNICT/FCT de 1991 a 1998. É professor auxiliar na Universidade Aberta e desenvolve o seu trabalho de investigação na área da Física da Matéria Condensada, interessando-se especialmente pela estrutura e diagramas de fases de fluidos complexos.

Consultor

**Augusto M. C. A. Barroso** é licenciado em Física, em 1969, pela Universidade de Lisboa e doutorado em Física, em 1974, pela Universidade de Sussex, Inglaterra. É Professor Catedrático no Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, desde 1991. Tem realizado investigação científica nas áreas da Física Atómica, Física Nuclear e Física das Partículas, sendo autor ou co-autor de cerca de 60 artigos científicos. Foi professor visitante em várias Universidades da Europa e dos Estados Unidos. Sócio da Academia das Ciências de Lisboa desde 1989. Prémio Gulbenkian de Ciência em 1994. É actualmente o Secretário Geral da Sociedade Portuguesa de Física.

bom refrigerante, utilizado, por exemplo, no arrefecimento das centrais nucleares. A outra face desta moeda é que a água tem também de perder muito calor para que a sua temperatura desça, o que significa que, uma vez aquecida, permanece quente durante um longo período de tempo: é por isso que podemos desfrutar de chá, café, ou de um banho quente durante mais do que alguns segundos. O que é ainda mais importante, a Europa deve o seu clima temperado ao facto de a Corrente do Golfo (Gulf Stream) transportar por dia, da América do Sul, através do Oceano Atlântico, duas vezes mais calor do que poderia ser gerado queimando todo o carvão extraído anualmente em todo o planeta Terra.

Como todos os líquidos, a água caracteriza-se por ter uma compressibilidade muito baixa – só mediante a aplicação de pressões muito elevadas é possível alterar-lhe a densidade. Esta propriedade tem permitido a sua utilização como veículo e “multiplicador” de forças, desde a primeira prensa hidráulica (inventada no final do séc. XVIII) até aos actuais travões e dispositivos de elevação ditos “hidráulicos” (nos quais se empregam óleos sintéticos quimicamente inertes e não água, para evitar a corrosão).

Do ponto de vista do chamado “aquecimento global”, é relevante que a água tenha um coeficiente de dilatação térmica - o aumento percentual de volume por cada grau de elevação da temperatura - pequeno, mas não nulo: é a isto que se deveria a subida do nível médio dos oceanos com um aumento global da temperatura (e não, como muitas vezes se ouve dizer, à fusão das calotas polares - da mesma forma que o nível de uma bebida fresca não sobe ao fundir-se o gelo que pusemos no copo).

Finalmente, a água é indispensável aos processos físicos e químicos dos quais depende a vida: não é por acaso que a greve da fome é utilizada como arma política, mas não a greve da sede, a qual conduziria muito mais rapidamente (alguns dias) a um desfecho fatal (porventura menos mediático).

À vista desarmada e sem dispor de equipamentos sofisticados, a água é a única substância capaz de ser tanto solidificada como vaporizada, e portanto de “gerar” sólidos, líquidos e gases. Foi provavelmente esta constatação, bem como a consciência da importância da água para os processos geológicos e biológicos, que levou o primeiro dos filósofos gregos Jónicos, Tales de Mileto (séc. VII-VI a.C.), a propôr a água como substância primordial do universo, isto é, aquela de que tudo o mais seria feito. Esta teoria, tão estranha ao pensa-

mento moderno, só faz sentido se nos lembrarmos que Tales e os seus sucessores imediatos não distinguiam entre mudanças de estado e reacções químicas: para eles, o gelo e o vapor seriam essencialmente diferentes da água líquida, uma vez que possuíam os atributos de um sólido e de um gás, respectivamente. Por outras palavras, a água deixaria de ser água para se tornar um certo tipo de sólido, ao congelar; e um certo tipo de gás, ou ‘ar’, ao vaporizar-se. Logo, porque não haveria de poder transformar-se em tudo o mais? Tinha de ser a substância primordial.

Para compreendermos as estranhas propriedades da água, é preciso primeiro aprendermos mais acerca dos estados - ou fases - da matéria, e das mudanças de estado - ou transições de fase, como são modernamente conhecidas. É bem sabido que a maior parte das substâncias pode ser encontrada (pelo menos na Terra!) numa de três fases distintas: sólida, líquida ou gasosa (embora, como veremos adiante, nem isto seja óbvio - mas prossigamos). Em que circunstâncias se obtém cada uma destas fases? É possível estabelecer as condições de equilíbrio e de estabilidade de um sistema macroscópico de forma perfeitamente geral, isto é, sem fazer qualquer suposição quanto à natureza microscópica do mesmo, através do formalismo da Termodinâmica. Se, por exemplo, tivermos um sistema a volume  $V$  e temperatura  $T$  constantes, o seu estado de equilíbrio será aquele que minimiza a energia livre (ou função de Helmholtz), dada por

$$F = E - TS. \quad (1)$$

A baixas temperaturas ( $T \rightarrow 0$ ), o termo  $TS$  é desprezável e o mínimo de  $F$  é realizado pelo estado que minimiza a energia,  $E$ . Por outro lado, a altas temperaturas ( $T \rightarrow \infty$ ) o termo  $TS$  domina, e o estado de equilíbrio é aquele que maximiza a entropia,  $S$ . Este princípio de mínimo mais não é do que uma das possíveis reformulações da famosa Segunda Lei da Termodinâmica - a tal que diz que a entropia de um sistema isolado é máxima no equilíbrio - a casos em que mantemos constantes diferentes variáveis de estado.

Introduzamos agora a hipótese corpuscular: a matéria é constituída por partículas (átomos ou moléculas) que interagem entre si de tal forma que a longas distâncias existe uma atracção mútua, de origem electrostática, e a curtas distâncias uma repulsão que impede que dois átomos se sobreponham. Esta última deve-se ao Princípio de Exclusão de Pauli, segundo o qual não pode

haver mais do que um electrão por estado quântico. Usando a equação (1), podemos concluir facilmente que o sólido é a fase estável a baixas temperaturas e densidades elevadas: o potencial de interacção tem um mínimo para uma dada separação, bem definida, entre duas partículas, logo a energia potencial total será mínima se estas estiverem dispostas num arranjo espacial periódico, perfeitamente regular - o sólido ideal. De uma forma análoga, conclui-se que o gás é estável a altas temperaturas e baixas densidades, às quais a energia de interacção é desprezável e a entropia é maximizada pela desordem molecular (isto é, tem-se  $E \ll TS$  na equação (1)).

Este argumento é bastante geral e pode ser utilizado para explicar a origem das transições de fase. As duas fases, neste caso o sólido e o gás, têm simetrias diferentes: no limite termodinâmico (isto é, quando as dimensões do sistema tendem para infinito), o gás tem simetria de translação contínua (todos os seus pontos são equivalentes do ponto de vista das suas propriedades físicas) enquanto que o sólido tem simetria de translação discreta (os pontos equivalentes são apenas aqueles que estão relacionados por transições da rede cristalina, ou de Bravais). Como o sólido é estável a baixas temperaturas e o gás é estável a altas temperaturas, tem de existir (pelo menos) uma transição de fase entre os dois, ao baixar-se a temperatura. Esta transição é acompanhada por uma variação descontínua da densidade, que aumenta cerca de 1000 vezes. A estrutura do material sofre uma alteração radical - de difusa e completamente desordenada, para compacta e altamente ordenada, expelindo a sua desordem sob a forma de calor - dito calor latente de sublimação.

Até agora não dissemos nada sobre a fase líquida. Por estranho que pareça, não é de todo óbvio que ela sequer exista! Efectivamente, sistemas há, como por exemplo algumas dispersões coloidais (suspensões de partículas com diâmetros da ordem do micron num solvente apropriado) que só apresentam uma fase fluida e outra sólida. O estado líquido é misterioso e subtil: flui como um gás, mas ocupa um volume bem definido. É denso, mas desordenado. Só muito recentemente se descobriu quais as condições necessárias para que uma dada substância tenha uma fase líquida: o potencial de interacção entre partículas tem de ter um alcance suficientemente grande. Na natureza, a única atracção entre átomos ou moléculas neutros e apolares é a de Van der Waals (que resulta da interacção média entre um dipolo instantâneo, causado por uma flutuação quântica da densidade de carga de um átomo ou molécula, e o dipolo-

lo induzido noutro átomo ou molécula vizinho), que tem a forma  $V(r) \propto 1/r^6$ ; cálculos indicam que, fôra este expoente 8 ou 9, não haveria fase líquida estável. Um líquido é, portanto, um fenómeno algo marginal, em muitos casos (de que os gases nobres - néon, árgon, etc - são exemplo paradigmático) verificando-se apenas a baixas temperaturas. E isto surpreende-nos, habituados que estamos à água, que é por isso totalmente atípica. Existem, naturalmente, muitas outras substâncias de baixa massa molecular com pontos de fusão e de ebulição elevados, mas trata-se invariavelmente de cristais iónicos ou metálicos, cuja coesão se deve a forças de Coulomb ou a ligações metálicas. Mas nem sequer o forte momento dipolar da molécula da água chega para explicar esta anomalia. Além disso, o facto pouco habitual de a água sólida (gelo) ser menos densa do que a líquida indica que as moléculas preferem estar mais longe umas das outras no cristal do que na fase fluida.

A chave do mistério está na combinação da geometria peculiar da molécula da água com o carácter fortemente electronegativo do oxigénio. A molécula da água tem forma de V, com os dois átomos de hidrogénio nas extremidades dos braços, e o átomo de oxigénio no vértice do ângulo, que é de  $104.5^\circ$ . Na verdade, trata-se de um tetraedro, com o átomo de oxigénio localizado no seu centro, mas em que apenas dois dos vértices estão ocupados por átomos de hidrogénio: cada um dos dois restantes contém um par de electrões, dito não-ligante, pertencente ao átomo de oxigénio. Os dois pares não-ligantes repelem-se mais do que os átomos de hidrogénio, daí que o ângulo H-O-H seja ligeiramente menor do que o ângulo tetraédrico ( $109.5^\circ$ ): O átomo de oxigénio tende a concentrar os electrões junto a si, adquirindo por conseguinte uma carga negativa e deixando os dois átomos de hidrogénio positivamente carregados. Estas cargas dão origem a forças electrostáticas altamente direccionais: os átomos de hidrogénio de uma molécula são atraídos pelos átomos de oxigénio das moléculas vizinhas. Tal interacção, cerca de 10 vezes mais intensa do que as forças de Van der Waals que asseguram a coesão dos líquidos "normais", mas 10 vezes mais fraca do que a ligação covalente entre os átomos de oxigénio e hidrogénio dentro de cada molécula, é conhecida por ligação de hidrogénio. Não é exclusiva da água: encontra-se em compostos que con-

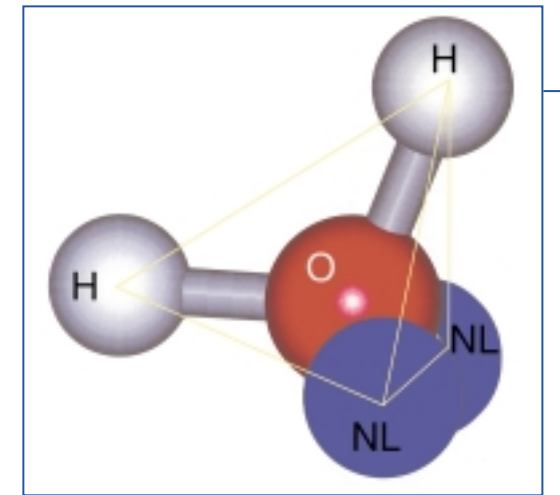


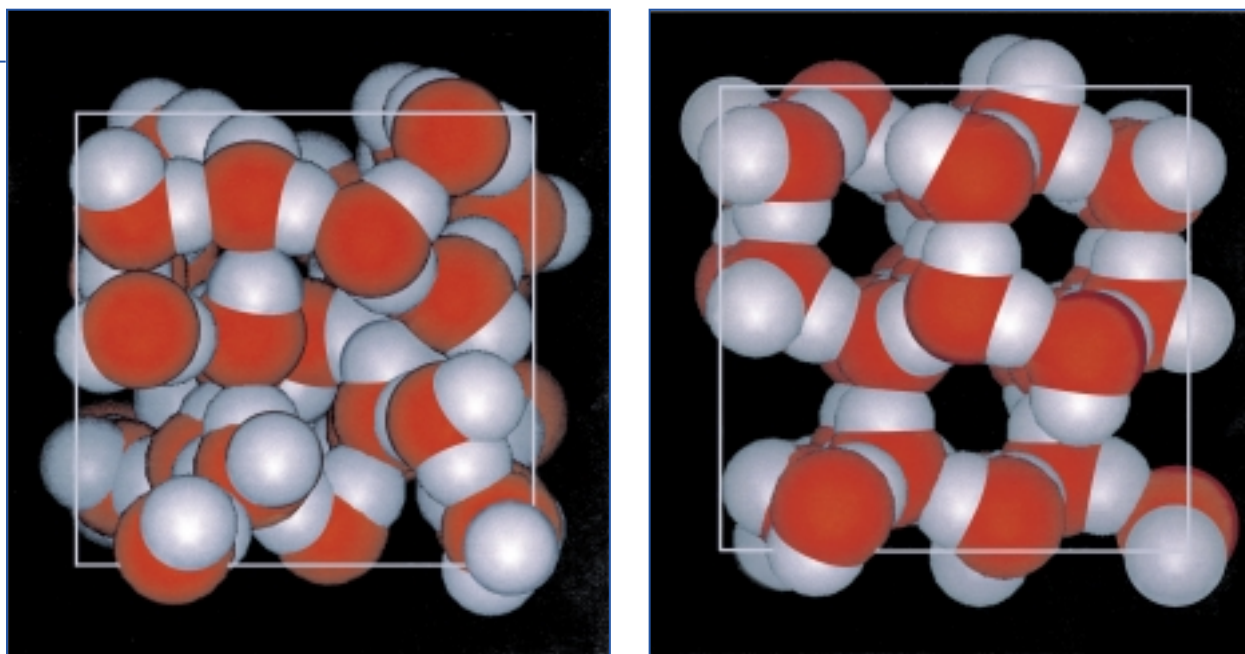
Figura 1: Representação esquemática da molécula de água. O átomo de oxigénio é representado a vermelho e os de hidrogénio a cinzento. A azul estão representados os dois pares de electrões não ligantes (NL). A fim de tornar evidente a simetria geométrica da molécula, foram desenhadas (a amarelo) 5 das 6 arestas do tetraedro que a contém.



tenham simultaneamente átomos de hidrogénio e átomos fortemente electronegativos com pares de electrões não-ligantes, como por exemplo o amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) e o fluoreto de hidrogénio ( $\text{HF}$ ), cujas fases líquidas são também “anormalmente” estáveis. Além disso, a ligação de hidrogénio desempenha um papel crucial em muitas biomoléculas: em particular, é ela que prende os dentes do “fecho *éclair*” da hélice dupla do DNA.

No gelo, cada molécula de água estabelece ligações de hidrogénio com quatro outras, formando uma estrutura tetraédrica, rígida, mas muito “aberta” - isto é, com muito espaço livre (com número de coordenação, isto é, de primeiros vizinhos, igual a 4, em vez de 12 como numa situação de empacotamento denso). Compreende-se assim a baixa densidade do gelo: dada a geometria da molécula, é esta a configuração a que corresponde o mínimo da energia das ligações de hidrogénio entre primeiros vizinhos. Deste modo, a água surge uma vez mais como excepção às regras da física dos líquidos: a estrutura das suas fases densas é determinada não pelas forças repulsivas de curto alcance (isto é, pela entropia de empacotamento), mas sim pelas forças atractivas - as ligações de hidrogénio. É importante notar, porém, que estas só assumem a importância que têm graças à coordenação tetraédrica das moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ , a qual permite a formação de uma rede tridimensional. Isto já não se passa, por exemplo, no  $\text{HF}$ , que só pode associar-se linearmente.

Figura 2: Comparação entre as estruturas moleculares da água líquida (esquerda) e do gelo 1 (direita). Tal como na figura 1, a vermelho estão representados os átomos de oxigénio e a cinzento os átomos de hidrogénio. Esta representação torna evidente a expansão verificada quando a água solidifica. Pode-se igualmente constatar (imaginando a camada que tem de existir acima do plano da página) que no gelo todas as moléculas estabelecem quatro ligações de hidrogénio, ao passo que na água líquida o número de ligações de hidrogénio por molécula é variável (em média 3-4). Note-se ainda que, se na parte direita da figura se representassem os pares não ligantes em vez dos átomos de hidrogénio, (quase) nada mudaria!



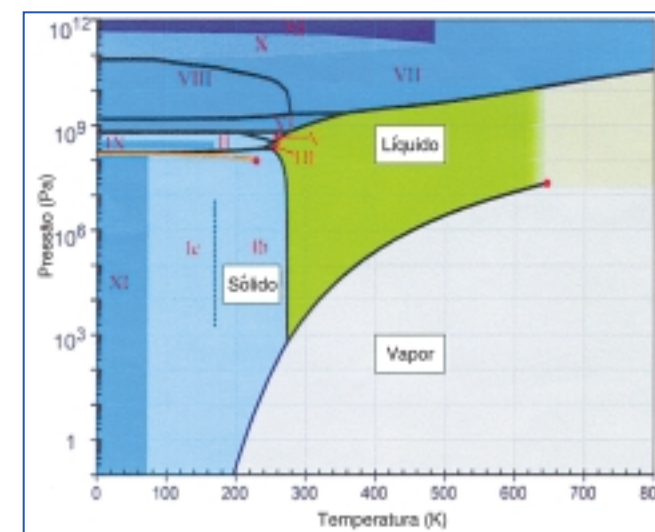
Ao dar-se a fusão, a rede tetraédrica regular de ligações de hidrogénio começa a desfazer-se devido à agitação térmica: o número de primeiros vizinhos de cada molécula sobe de 4 para 5, mas o número de ligações de hidrogénio por molécula desce de 4 para 3.5. O empacotamento torna-se mais compacto, e a densidade sobe. Quando a temperatura atinge 4 °C, praticamente já nada resta da rede tetraédrica de ligações de hidrogénio, e a partir daí a água passa a comportar-se como um líquido “normal”, isto é, cuja densidade decresce com o aumento de temperatura.

A estrutura aberta e pouco densa do gelo faz dele um sólido altamente invulgar. Enquanto que na maior parte dos sólidos já está tanto espaço ocupado que só são possíveis, quando muito, um ou dois rearranjos estruturais, no caso do gelo foram identificadas nada menos de 12 estruturas cristalinas distintas. Estas correspondem a diferentes deformações possíveis da rede tetraédrica. De entre elas, as fases VI, VII e VIII, que apenas existem a pressões extremamente elevadas (da ordem da dezena de milhar de atmosferas) têm densidades quase duas vezes superiores à da Fase I, o gelo “normal”; em particular, o gelo VII só funde a uma temperatura superior a 100 °C! Aqui trata-se já não apenas de uma deformação da rede original, mas da sua fragmentação em sub-redes, as quais, interpenetrando-se, preenchem espaço de forma muito mais eficiente. É de salientar ainda a presença de duas fases metaestáveis, os gelos IV e XII, que uma vez formados se transformam gradualmente em gelo V.

Com que se parece então o diagrama de fases da água? Se nos ficarmos pelas baixas pressões, a única diferença relativamente à maior parte das outras substâncias está em que a curva de coexistência sólido-líquido tem declive negativo.

Mostramos agora como este “pormenor inofensivo” está relacionado com o facto de o gelo ser menos denso que a água líquida. A condição de coexistência de duas fases é que, a uma dada temperatura, os seus potenciais químicos  $\mu$  sejam iguais: significa isto que uma partícula tem igual “vontade” de, por exemplo, transitar da fase líquida para a fase sólida, ou em sentido inverso, logo os números médios de partículas em

Figura 3: Diagrama de fases (pressão, temperatura) da água. Na zona a cinzento existe vapor de água, e na zona a verde água líquida. Na zona colorida com uma mistura destas duas cores (no cimo, à direita) o líquido e o gás são indistinguíveis (fluido supercrítico). Em diferentes tons de azul estão representadas as fases sólidas estáveis da água, os gelos, designados pelos respectivos números romanos. As linhas a preto representam as coexistências conhecidas (já determinadas experimentalmente) entre duas fases. Os cruzamentos de duas destas linhas são pontos triplos, pressões e temperaturas para as quais coexistem três fases. A vermelho estão representados os pontos críticos da água. A linha a laranja (e respectivo ponto crítico), que corresponde a uma transição de fase para o gelo I, não foi ainda medida experimentalmente, mas a sua existência é aceite. A linha a tracejado limita a zona do diagrama onde é possível observar uma fase metaestável do gelo I, o gelo Ic (cúbico). A fase estável do gelo I é hexagonal (gelo Ih).





cada fase mantêm-se constantes (que é a definição de equilíbrio dinâmico). Consideremos então dois estados  $A$  e  $A'$ , situados sobre a curva de coexistência sólido-líquido à temperatura  $T$  (o mesmo raciocínio é válido para qualquer outra curva de coexistência), mas onde  $A$  corresponde à fase sólida, e  $A'$  à líquida. Consideremos ainda dois outros estados,  $B$  e  $B'$ , em tudo idênticos a  $A$  e  $A'$ , mas a uma temperatura infinitesimalmente mais elevada,  $T + dT$ . Segue-se então que:

$$\mu_A = \mu_{A'} \quad \text{e} \quad \mu_B = \mu_{B'}, \quad (2)$$

e, portanto,

$$\mu_A - \mu_B = \mu_{A'} - \mu_{B'}, \quad (3)$$

O primeiro e segundo membros da equação (3) são, respectivamente, as variações infinitesimais dos potenciais químicos das fases sólida e líquida ao aumentar-se a temperatura de  $T$  para  $T + dT$ . Mas a Termodinâmica (relação de Gibbs-Duhem) diz-nos que esta variação é igual a:

$$d\mu = -s dT + v dP. \quad (4)$$

onde  $s$  é a entropia molar, e  $v$  o volume molar. Aplicando a equação (4) a cada um dos membros da equação (3) (fases sólida e líquida, com e sem  $'$ , respectivamente), obtém-se:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{s' - s}{v' - v} = \frac{l}{T\Delta v} \quad (5)$$

onde  $l = T\Delta s = T(s' - s)$  é o calor latente de fusão. Como  $l$  é positivo, o sinal de  $dP/dT$  (ou seja, o declive da curva de fusão) é determinado pelo de  $\Delta v = v' - v$ : um líquido normal expande-se ao fundir, logo  $v' > v$ ; ao passo que, para a água,  $v' < v$  e a curva de fusão está portanto “ao contrário”. A equação (5) é conhecida por equação de Clapeyron.

A equação de Clapeyron poderia ser escrita de forma totalmente análoga para a transição de vaporização. Nesse caso, tem-se  $dP/dT > 0$  (tal como para os outros líquidos), uma vez que tanto a entropia como o volume molares do vapor são maiores que os do líquido. É isto que permite a utilização da vaporização para realizar trabalho. As máquinas a vapor são máquinas térmicas: transfor-

mam calor em trabalho mecânico. Aquecendo a água líquida até ferver, esta vaporiza-se, expandindo-se e fornecendo trabalho a um pistão.

Pode dizer-se que a água, mesmo quando líquida, retém um grau apreciável de estrutura. É, por isso, muito pouco favorável às moléculas de água “sair dos seus lugares” para acomodar moléculas de um soluto não-polar: por um lado, estas perturbam a rede de ligações de hidrogénio, cuja energia deixa de ser mínima; e por outro, impõem à água uma estrutura localmente mais ordenada. Esta incompatibilidade é conhecida por efeito hidrofóbico. A elevada tensão superficial da água, cerca de  $72 \text{ mJ/m}^2$  (mais do dobro da dos líquidos de Van der Waals) é outra manifestação deste efeito predominantemente entrópico, uma vez que o ar funciona como um meio inerte, incapaz de estabelecer ligações de hidrogénio (é como se fosse uma partícula de soluto de gigantescas dimensões). O efeito hidrofóbico conduz à interacção hidrofóbica: duas moléculas hidrófobas colocadas em meio aquoso experimentam uma forte atracção mútua, uma vez que, estando juntas, perturbam menos a estrutura da água pura do que estando separadas. Esta interacção desempenha um papel central em muitos processos de agregação molecular, como sejam a formação de micelas, membranas biológicas, e estruturas terciárias das proteínas.

Esperamos ter convencido os leitores de que o líquido mais comum (e precioso) à face da Terra é tudo menos simples - é fascinante, e extremamente difícil de estudar, ao ponto de ter sido chamado “a nasty liquid”. E não podemos viver sem ele...



# A medida em Física

*F. Parente\**

## Objectivos

1. Aprender a dar estimativas de grandezas físicas;
2. Familiarizar-se com alguns aparelhos de medida e sua precisão;
3. Aprender métodos de lidar com incertezas experimentais e algarismos significativos;
4. Praticar alguns cálculos matemáticos simples *sem* calculadora.

## Estimativas

Num laboratório de Física devemos ser capazes de fornecer estimativas tanto quanto possível correctas das grandezas físicas dos objectos com que trabalhamos (o comprimento de um pêndulo, a massa de um corpo, etc.). Esta capacidade, que à primeira vista poderá parecer desnecessária, permite, no entanto, detectar um erro grosseiro efectuado numa medida.

**RM 1** – Antes de registar qualquer resultado de uma medida, faça sempre a seguinte pergunta a si próprio: “Este valor faz algum sentido?”

Deverá ser sempre aplicada a 1.<sup>a</sup> Regra de Medida (**RM 1**):

Quando estimamos uma grandeza, estamos apenas interessados numa ordem de grandeza do valor. Se o valor que estimamos estiver errado em 25%, por exemplo, não tem qualquer importância. Felizmente, na maioria dos trabalhos experimentais das aulas práticas conseguiremos medir grandezas com muito maior precisão do que isto.

É frequente, em estudantes que iniciam trabalhos práticos de Física, a existência de preconceitos que, se não forem atacados de início, constituirão um obstáculo à aprendizagem.

\* Departamento de Física  
da Faculdade de Ciências  
da Universidade de Lisboa Campo  
Grande, Edifício C8  
1700 Lisboa  
parente@alf1.cii.fc.ul.pt

## Preconceito n.º 1:

**O objectivo de uma experiência realizada numa aula prática é a obtenção da resposta exacta.**

Em geral não existe resposta “exacta”, visto que qualquer resultado experimental depende das condições em que a experiência é efectuada. Um bom exemplo é o dos consumos de combustível anunciados para os automóveis. Esses consumos são determinados experimentalmente em laboratório. Mas muitos de nós também já medimos experimentalmente os consumos dos nossos carros em “litros de gasolina por cada 100 km”.

Temos tendência a pensar que, como nos laboratórios existe certamente equipamento sofisticado, os números anunciados devem estar “certos”. No entanto, é frequente ouvir-se: “o meu carro é anunciado como consumindo 5 litros aos 100 km, mas eu nunca consegui melhor do que 7 litros aos 100”. A diferença resulta das condições experimentais diferentes. No laboratório as determinações são efectuadas utilizando um dinamómetro (neste caso uma espécie de tapete rolante), enquanto as nossas são efectuadas na estrada. O processo experimental no laboratório não leva em linha de conta adequadamente a resistência do ar e também o facto de os carros, mesmo que da mesma marca e modelo, serem diferentes uns dos outros; não é, de certeza, uma boa aproximação das condições reais, ou seja, da condução em estrada.

## Preconceito n.º 2:

**É possível medir qualquer coisa exactamente.**

Mesmo que as condições experimentais sejam as melhores possíveis, há sempre um limite para a precisão com que uma grandeza pode ser medida. Ao determinar o consumo de um carro, temos consciência que muito raramente se enche o depósito de gasolina até cima; e, mesmo quando isso acontece, é muito possível que algum combustível se derrame pela pintura do carro e acabe no chão. Mesmo se nós próprios enchermos cuidadosamente o depósito, ficam sempre bolhas de ar e espaços vazios no depósito. Poderemos saber quantos litros de gasolina estão no depósito com uma precisão superior a 0,5 L?

E a bomba de gasolina? Estará bem graduada? Mesmo que o esteja, devido às inspecções oficiais periódicas, qual é a precisão das leituras? Podemos perguntar o mesmo em relação ao conta-quilómetros do carro. Ambos têm uma precisão limitada, é difícil estimar para além dos décimos de litro ou quilómetro.

Como resultado destas considerações, se calcularmos que o carro consumiu 18 L de gasolina num percurso de 300 km, ele pode efectivamente ter consumido 18,5 L ou apenas 17 L - *há sempre uma incerteza na nossa medida*.

Instintivamente podemos concluir outras coisas sobre esta medida. Primeiro, se repetirmos a medição muitas vezes, o número total de litros de gasolina utilizada, dividido pelo número total de quilómetros percorridos, dará uma estimativa melhor do consumo do carro. Isto faz sentido, porque as incertezas no enchimento do depósito diminuirão, se enchermos em estações de serviço diferentes. Contudo, se o conta-quilómetros do carro estiver errado consistentemente, o resultado final estará também sempre errado. Em segundo lugar, ficamos com a certeza de que o resultado que obtemos não é tão baixo como o anunciado pelo fabricante - eu sei que as incertezas na minha experiência não ultrapassam os 0,5 L aos 100 km! Consequentemente, os dois resultados não estão de acordo e alguma coisa está evidentemente errada.

Qualquer medida que efectuamos - e não apenas as que efectuamos nos trabalhos práticos - tem alguma imprecisão a ela associada. Devido a este facto, um resultado é absolutamente inútil se não soubermos qual o seu grau de incerteza. É razoável pretendermos saber o grau de incerteza. Se compramos na praça um peixe que “pesa cerca de um quilograma”, gostaremos de saber se “cerca de um quilograma” significa para o vendedor 0,9 kg ou 0,5 kg.

## Preconceito n.º 3:

**A análise das experiências requer horas de aritmética aborrecida e matemática obscura.**

Dada a importância do conhecimento das incertezas nos resultados, teremos de controlar as incertezas nas determinações experimentais. Este processo envolve alguns cálculos. Vamos aprender alguns processos de o fazermos rapidamente. Se procurarmos apreender correctamente estas ideias, pouparemos tempo a longo prazo. Assim, poderemos prestar mais atenção aos aspectos físicos da experiência, que são os mais interessantes.

## Incertezas experimentais

Como vimos atrás, mesmo que o modelo experimental seja muito bom, a medida experimental tem sempre um grau de incerteza associado. Naturalmente, tentaremos que as incertezas sejam tão pequenas quanto possível, mas, em qualquer caso, é necessário saber o valor dessas incertezas.

Se considerarmos a graduação de uma régua graduada em milímetros, podemos obter muita informação sobre fontes de incerteza em medidas. Ao tentar medir comprimentos com esta régua, seremos confrontados com a pergunta: O que acontecerá se o objecto não corresponde exactamente a uma divisão da escala? No caso de o objecto ter contornos bem definidos, como ao medir o comprimento desta folha de papel, a pergunta será: até onde poderei fazer uma estimativa? Como a menor divisão da régua é 1 mm, será suficiente dizer que o comprimento da página é, por exemplo, 29,6 cm? Na realidade não é, porque nós somos capazes de estimar divisões até 2 ou mesmo 1 décimo de milímetro. O comprimento do papel pode ser 29,63 cm. Seria incorrecto dar o valor de 29,6 cm se sabemos que podemos ler a escala estimando mais um algarismo significativo, mesmo que a nossa estimativa seja incerta. Isto corresponde à segunda regra de medida:

**RM 2 - Leia sempre o instrumento de medida com a maior precisão possível. Isto significa estimar até uma fracção da menor divisão da escala do instrumento.**

Sabemos, no entanto, que a nossa capacidade de fazer uma estimativa é limitada. Quando estimamos 0,3 da menor divisão, poderia facilmente ser 0,5 ou mesmo 0,1. Indicaríamos

este facto escrevendo  $29,63 \pm 0,02$  cm. O termo  $\pm 0,02$  especifica a gama de incerteza. Significa que, *de acordo com a nossa determinação, o comprimento da folha é muito provavelmente 29,63 cm, mas, devido à nossa capacidade limitada de o estimar, ele pode ter qualquer valor entre 29,61 cm e 29,65 cm*. Note-se que o valor 29,63 cm tem a mesma probabilidade de ser demasiado grande ou demasiado pequeno. Isto é característico das *incertezas aleatórias* nas medidas. Se medirmos a página várias vezes, muito provavelmente obteremos valores dentro da mesma gama, que andarão em torno de 29,63 cm.

Nesta medição estamos com sorte - podemos colocar a escala e o papel em cima um do outro e assim minimizar a incerteza. Quando isto não acontece,

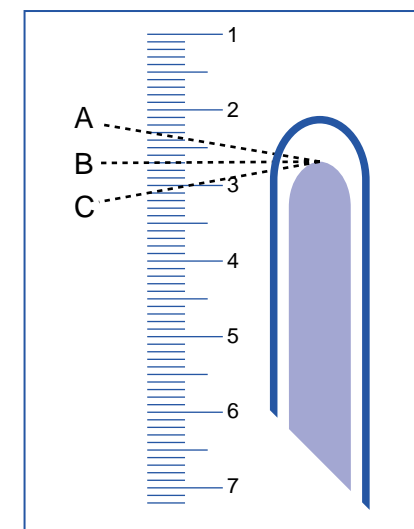
surge uma incerteza adicional devida à *paralaxe*. A paralaxe está ilustrada na figura ao lado.

Como a escala e o objecto estão separados, a nossa leitura pode variar de 10 divisões, dependendo de a nossa vista estar colocada em A, B ou C. Evidentemente que deveremos colocar a escala tão perto quanto possível do objecto a medir, mas por muito esforço que façamos, restará sempre alguma incerteza.

É preciso ter em mente o aspecto importante de que não existe valor correcto para o comprimento, porque a medida não pode ser perfeita. Se ficarmos influenciados pela primeira medida, continuaremos a obter sempre o mesmo valor. Mas assim estaríamos a supor que existe um valor correcto e a ignorar a incerteza e dispersão que ocorrem sempre numa operação de medida.

Há muitas causas para as incertezas aleatórias e não faz sentido indicarmos aqui todas (alguns exemplos foram referidos quando do exemplo do consumo do automóvel).

Contudo, falta referir um ponto importante. Suponhamos que a calibração da escala está errada: como pode isso acontecer? Na pior das hipóteses, alguém poderá ter cortado os primeiros 3 cm da escala. Muito provavelmente este facto detectar-se-ia facilmente! Se não, todos os valores das nossas medidas terão um desvio, para mais, de 3 cm. Mais frequentemente, o topo da régua estará gasto de 1 mm. De novo todas as medidas estarão erradas, agora de 1mm. Ou a calibração pode ter sido efectuada sem cuidado. Ou, se a calibração foi efectuada a uma temperatura inferior à do laboratório, a régua pode ter-se dilatado. Então, todos os resultados estarão demasiado baixos. Terá certamente notado a diferença entre estes exemplos e as incertezas aleatórias. Nos exemplos acima, todos os resultados estão desviados na mesma quantidade e na mesma direcção. Estes são na realidade *erros nas medidas*, provocados por alguma falta de cuidado. Denominam-se *erros sistemáticos* e são muito diferentes dos erros ou incertezas aleatórios. Os erros sistemáticos podem, em geral, ser corrigidos (utilizando uma régua melhor, por exemplo) ou os valores obtidos podem ser corrigidos pela aplicação do mesmo factor de correcção a todos.



**RM 3 - Em medições repetidas devemos sempre tentar ser imparciais. Não existe valor correcto porque haverá sempre alguma dispersão (ainda que em alguns casos possa ser muito pequena).**

**RM 4 - Detecte e corrija todos os erros sistemáticos.**

Em geral, esta regra significa observar cuidadosamente o aparelho de medida. Tem 3 cm cortados? O voltímetro já mostra um valor não nulo, mesmo sem estar ligado a um circuito? O micrómetro indica 0,015 mm quando as duas pontas estão encostadas? Em qualquer dos casos, substitua o instrumento ou corrija o erro de zero: some ou subtraia o erro de zero a todos os resultados da medida.

**Algarismos significativos.**

**RM 5a - Algarismos significativos é um dos conceitos mais simples em aulas práticas de introdução à Física Experimental.**

**RM 5b - Algarismos significativos é um dos conceitos menos compreendidos em aulas práticas de introdução à Física Experimental.**

Parece contraditório? A experiência mostra que muitos estudantes têm dificuldade no que respeita aos algarismos significativos. Na realidade é um conceito muito fácil se ler o que se segue com muito cuidado. Resulta tudo da **RM 2**. Como estimamos sempre o último algarismo numa medida experimental, haverá sempre alguma incerteza associada a esse algarismo. Algarismos significativos são os que têm significado. Se medirmos o comprimento desta folha com uma régua graduada em milímetros, e indicarmos o resultado como sendo 29,633 cm, estaremos incorrectos. A menor divisão é 1 mm ou 0,1 cm e podemos estimar até 0,01 cm. Mas não temos absolutamente nenhuma informação sobre milésimos de cm, ou seja, nesta medição, a centésima de mm tem alguma incerteza mas a milésima é completamente incerta - não tem significado experimental.

O valor obtido poderia, assim, ser 29,63 cm, mas não 29,633 cm ou 29,6 cm. Esta é a regra básica dos algarismos significativos. Tudo seria simples se não existisse a calculadora. Se os seus cálculos fossem efectuados com uma regra de cálculo (calculadora manual antiquada conhecida apenas de pessoas nascidas antes de 1950), estaria limitado a 3 algarismos. Mas, devido ao facto de, ao carregar numa

tecla, ter nove dígitos à frente dos seus olhos, vai ter dificuldade em utilizar esta regra simples. A calculadora torna as coisas difíceis, porque terá de decidir quais destes nove algarismos não têm significado e eliminar todos eles, deixando apenas *um* com alguma incerteza. Felizmente existem regras simples para aplicar, que resultam da **RM 6**.

Consideremos alguns exemplos. Para termos controle sobre os algarismos em relação aos quais não temos certeza absoluta, vamos sublinhá-los. No dia-a-dia não é necessário fazer assim - é apenas para ilustrar o nosso raciocínio. Suponhamos o objecto da figura, constituído por três sólidos de latão - uma esfera, um cilindro e um paralelepípedo.

Medimos as massas utilizando uma balança analítica de precisão para a esfera e para o cilindro e uma balança-dinamómetro para o paralelepípedo. As massas são 0,282 g, 79,545 g e 422,23 g.

A massa total será:

$$\begin{array}{r} 0,282 \\ 79,545 \\ 422,23 \\ \hline 502,057 \text{ g} \end{array}$$

O resultado está escrito de forma **incorrecta**. Viola a **RM 6**, porque tem agora **dois** algarismos com incerteza. Para nos pormos de acordo com a **RM 6**, o resultado deve ser arredondado para cima (podemos seguir a regra de arredondar para cima se o último dígito é 5 ou superior a 5, e para baixo se é 4 ou inferior a 4), sendo dado correctamente por 502,06 g. Quando escrevemos um resultado experimental, está implícito, pela **RM 6**, que apenas o último algarismo do resultado está afectado de alguma incerteza (esta afirmação não tem nada de especial, estamos só a dizer neste exemplo que, se apenas podemos medir a massa de uma parte do objecto até à centésima grama, não podemos obviamente conhecer a massa do objecto composto até à milésima do grama). A regra geral para a adição (ou subtracção) é a seguinte:

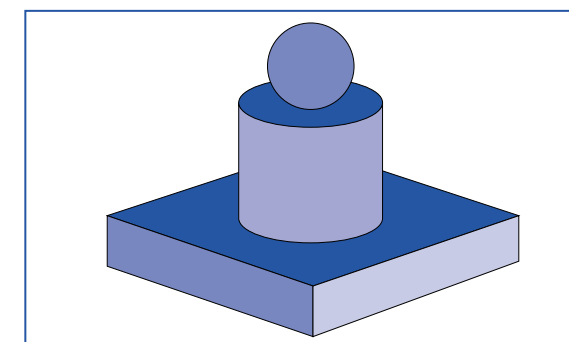
Consideremos alguns exemplos. Para termos controle sobre os algarismos em relação aos quais não temos certeza absoluta, vamos sublinhá-los. No dia-a-dia não é necessário fazer assim - é apenas para ilustrar o nosso raciocínio. Suponhamos o objecto da figura, constituído por três sólidos de latão - uma esfera, um cilindro e um paralelepípedo.

Medimos as massas utilizando uma balança analítica de precisão para a esfera e para o cilindro e uma balança-dinamómetro para o paralelepípedo. As massas são 0,282 g, 79,545 g e 422,23 g.

A massa total será:

$$\begin{array}{r} 0,282 \\ 79,545 \\ 422,23 \\ \hline 502,057 \text{ g} \end{array}$$

O resultado está escrito de forma **incorrecta**. Viola a **RM 6**, porque tem agora **dois** algarismos com incerteza. Para nos pormos de acordo com a **RM 6**, o resultado deve ser arredondado para cima (podemos seguir a regra de arredondar para cima se o último dígito é 5 ou superior a 5, e para baixo se é 4 ou inferior a 4), sendo dado correctamente por 502,06 g. Quando escrevemos um resultado experimental, está implícito, pela **RM 6**, que apenas o último algarismo do resultado está afectado de alguma incerteza (esta afirmação não tem nada de especial, estamos só a dizer neste exemplo que, se apenas podemos medir a massa de uma parte do objecto até à centésima grama, não podemos obviamente conhecer a massa do objecto composto até à milésima do grama). A regra geral para a adição (ou subtracção) é a seguinte:





**RM 6a.-** Quando se calcula um resultado experimental, adicionando ou subtraindo dados experimentais, arredonda-se de modo que apenas fique no resultado final um algarismo afectado de incerteza.

Suponhamos agora que pretendemos obter a área de um rectângulo. O comprimento, medido com uma régua, é 11,23 cm, e para a largura

obtem-se, com uma craveira, o valor 0,332 cm. A área é dada por:

$$A = 11,23 \times 0,332 \text{ cm}^2.$$

Vamos efectuar a multiplicação por extenso e sublinhar os algarismos com incerteza. Um algarismo está afectado de incerteza se resulta do produto de dois algarismos com incerteza ou do produto de um conhecido com segurança por outro afectado de incerteza.

$$\begin{array}{r} 11,23 \text{ cm} \\ \times 0,332 \text{ cm} \\ \hline 2246 \\ 3369 \\ 3369 \\ \hline 3,72836 \text{ cm}^2 \end{array}$$

De acordo com a RM 6, o resultado correcto é 3,73 cm<sup>2</sup>. Apesar de o calculador dar 3,72836 cm<sup>2</sup>, esta resposta é incorrecta. Os algarismos à direita do 2 não têm significado, de modo que devem ser arredondados. Repare que o resultado tem três algarismos significativos (o mesmo número de algarismos significativos que a largura). Este resultado ilustra uma regra que estabelece que o número de algarismos significativos no resultado de uma multiplicação

é igual ao do factor com menor número de algarismos significativos. Chamamos a esta regra - que também funciona para a divisão -

**RM 6b.**

**Nota importante** - Veremos mais adiante que a **RM 6b** é apenas uma

orientação, deixando de ser obedecida quando conduza a resultados que violem a **RM 6**, que, esta sim, deve ser sempre obedecida.

**Nota:** Como, segundo a **RM 6**, o último dígito apresentado é o único afectado de incerteza, como fazer no caso seguinte? O comprimento 35,9 m pode também ser escrito na forma 3590 cm. Contudo, estes dois resultados têm significados muito diferentes. O primeiro indica que o 9 é incerto, enquanto que o segundo implica que apenas o 0 está afectado de incerteza. Se é o 9 que é incerto, como deveremos escrever o resultado correctamente em centímetros? A resposta é 3,59 x 10<sup>3</sup> cm, escrito de uma forma denominada notação científica. Só surgem três algarismos significativos e a potência de 10 dá o valor correcto.

## Determinação de incertezas

Todas as vezes que efectuar uma medida no laboratório deverá registar também uma incerteza associada a essa medida. Há várias maneiras de proceder:

1. Em alguns casos efectuará apenas uma medida e deverá estimar a incerteza máxima razoável na leitura do instrumento de medida. Ao fazer isso terá de responder à pergunta: A que distância deste valor poderá estar o valor real, devido às minhas limitações em alinhar e ler a escala do aparelho? Em geral é possível estimar-se uma fracção da menor divisão da escala, de modo que a incerteza da medida poderá ser ± 0,1, ± 0,3 ou, por exemplo, ± 0,5 da menor divisão. Tenha em atenção que, em qualquer caso, deverá estabelecer a gama máxima de incerteza para a medida (uma regra empírica será utilizar como incerteza ou erro de leitura metade do menor valor que conseguiremos ler na escala, directamente ou por estimativa) .

Deverá ainda adicionar quaisquer incertezas na calibração (especificadas pelo fabricante do aparelho de medida) para estimar a incerteza máxima de leitura e, evidentemente, deverá procurar todos os erros sistemáticos e efectuar as correcções que forem necessárias .

*Este método de medida é, evidentemente, um método muito simplificado.*

2. No exemplo que vimos do consumo de um automóvel, parece evidente que a média de um grande número de determinações dará uma melhor estimativa do valor real do que apenas uma medida. Pode ser demonstrado estatisticamente que esta afirmação é verdadeira. Consequentemente, o segundo método de medida consiste em efectuar-se uma série de medidas - normalmente pelo menos 5 - e utilizar a média como o resultado experimental.

Se os resultados se representam por  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$  e efectuamos um total de  $N$  medidas, então o valor médio  $\bar{x}$  define-se do seguinte modo:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N)$$

Como poderemos determinar a incerteza? A maioria dos resultados será diferente da média. Podemos definir *desvio* de um resultado em relação à média como:

$$d_i = x_i - \bar{x}$$

Após termos calculado a média, podemos fazer uma tabela de todos os desvios em relação a esse valor. Destes, escolhemos o maior desvio em relação à média,  $d_{\max}$ . Aplicando as leis da estatística, verificar-se-ia que a melhor estimativa da incerteza num valor experimental calculado como a média de número de medidas é uma quantidade denominada *desvio padrão* da média. Para já, no entanto, vamos tomar  $|d_{\max}|$  como estimativa *muito conservadora* da incerteza. O resultado experimental deverá, assim, ser apresentado na forma:

$$\bar{x} \pm |d_{\max}|$$

O valor absoluto assegura que o valor da incerteza é sempre um número positivo. O  $\pm$  indica que a média tem igual probabilidade de se encontrar abaixo ou acima do valor real. Evidentemente, se o erro de leitura (obtido como se indica em 1.), for superior a  $|d_{\max}|$ , esse erro é que deverá ser utilizado para indicar a incerteza experimental.



### Exemplo:

Os dados seguintes foram obtidos medindo a tensão de uma tomada de parede, utilizando um voltímetro, com uma escala de 250 V, com uma precisão indicada pelo fabricante de 0,5% do total da escala.

220,5	- 0,2
221,6	+0,9
220,1	-0,6
220,4	-0,3
221,6	+0,9
220,2	-0,5
219,9	-0,8
221,1	+0,4
221,4	+0,7
220,0	-0,7
$\Sigma v_i =$	2206,8
$V =$	220,68
	$d_{\max} = 0,9$

$$V = 220,7 \pm 0,9 \text{ V}$$

A incerteza na calibração é de  $\pm 0,5\%$  de 250 V, ou seja,  $\pm 1,3$  V. Consequentemente a incerteza total é de  $\pm 2,1$  V e o resultado, de acordo com a **RM 6**, é  $220,7 \pm 2,1$  V, supondo que não existem erros sistemáticos.

### Incertezas numéricas e relativas. Precisão relativa

Até agora falámos apenas de valores numéricos ou absolutos das incertezas. Quando estas são expressas como percentagem de um resultado experimental, denominam-se incertezas relativas. Suponhamos que obtemos para resultado da medida do comprimento de um bocado de arame com uma régua o valor  $1,00 \pm 0,02$  m, enquanto que para o diâmetro, medido com uma craveira (que é um instrumento de medida mais preciso, em geral), se obtém o valor  $0,20 \pm 0,01$  cm. Qual destes valores é o mais preciso? A incerteza numérica no comprimento é  $\pm 2$  cm, enquanto que no diâmetro é  $\pm 0,01$  cm. Mas a primeira representa apenas  $\pm 2\%$  do comprimento, enquanto que a última é  $\pm 5\%$  do diâmetro. *O comprimento foi medido com maior precisão (relativa).* Ao falar de

precisão é importante examinar as incertezas em comparação com o valor medido, e é isso que a incerteza percentual indica.

Estas considerações chamam também a atenção para a importância da escolha do instrumento apropriado para uma medida. Supondo que podemos ler a escala de uma régua até  $\pm 0,5$  mm, obtemos uma precisão relativa de  $\pm 0,05\%$  quando medimos um comprimento da ordem de 1 m (1000 mm). Mas se a utilizarmos para medir o diâmetro acima,  $\pm 0,5$  mm, comparados com um valor de 2 mm, faz descer a precisão relativa para  $\pm 25\%$ ! Enquanto que a craveira permitiu uma precisão de  $\pm 5\%$ , um *palmer* (outro instrumento apropriado para medir espessuras) permitiria provavelmente atingir uma precisão absoluta de  $\pm 0,003$  mm, ou seja, uma precisão relativa de  $\pm 0,15\%$ .

## Aritmética simplificada

Estamos na idade do computador. Muitos estudantes estão convencidos de que basta pôr os números num computador ou numa calculadora e está tudo resolvido. A calculadora tem o seu papel nas aulas práticas, mas muitas vezes necessitamos de fazer cálculos apenas com *um algarismo significativo*. Nestes casos, a cabeça funciona melhor (aliás será o único recurso quando as pilhas falham).

Devemos adquirir a capacidade de converter rapidamente incertezas absolutas em relativas. Com alguma prática, não será difícil manipular estes números, com a precisão de um algarismo, de cabeça ou com uma ou duas contas no papel. Mesmo se insistir em utilizar a calculadora, pratique estes exemplos de cabeça para o ajudarem a arredondar com um pequeno número de algarismos significativos. É sempre, aliás, uma boa ideia estimar de cabeça o resultado antes de efectuar os cálculos, mesmo se utilizar a calculadora.

### Exemplos :

- 1.  $6,33 \pm 0,03$ .** Queremos exprimir 0,03 como percentagem de 6,33. É fácil de ver que  $0,03/6,33$  é o mesmo que  $3/633$ , muito próximo de  $3/600$ . Mas  $6/600$  é 0,01 ou 1%, portanto  $3/600$  deve ser cerca de 0,5%. Resultado:  $6,33 \pm 0,5\%$  (a calculadora dará o resultado 0,47393365% - mas este resultado terá de ser arredondado para 0,5% de qualquer modo!).



- 2.  $9054 \pm 4$ .**  $4/100$  é 4%, e portanto  $4/1000$  é 0,4%,  $4/10000$  é 0,04% que deve estar muito perto de  $4/9054$  (a calculadora dará 0,04417937%). Resultado:  $9054 \pm 0,04\%$ .

- 3.  $127 \pm 3\%$ .** 1% de 127 é 1,27 três vezes este valor é 3 mais alguma coisa acima de 0,5, portanto arredondamos para 4. O resultado é  $127 \pm 4$ .

*Como se vê é fácil. Poupa as pilhas da tua calculadora!!!*

## Propagação de incertezas

Eis um exemplo do tipo de problemas que enfrentaremos na maior parte das experiências. Mediu-se o comprimento e o diâmetro de um cilindro, obtendo-se o valor  $L = 10,31 \pm 0,03$  cm e  $D = 2,53 \pm 0,01$  cm, respectivamente. Pretendemos obter o volume do cilindro e a incerteza a ele associada, utilizando a fórmula

$$V = \frac{\pi D^2 L}{4},$$

utilizando  $\pi = 3,1416$ . O resultado obtido é  $V = 51,83$  cm<sup>3</sup>. E quanto à incerteza associada a  $V$ ? Podemos calcular os valores extremos. De acordo com as incertezas,  $L$  pode ter um valor máximo de 10,34 cm e  $D$  pode ter um valor máximo de 2,54 cm, obtendo-se  $V = 52,39$  cm<sup>3</sup>. No outro extremo, o valor mínimo de  $L$  é 10,28 cm e de  $D$  é 2,52 cm, o que dá  $V = 51,27$  cm<sup>3</sup>. Vemos assim que os resultados se encontram na gama de valores  $V = 51,83 \pm 0,56$  cm<sup>3</sup> e, de acordo com a RM 6, o resultado será:

$$V = 51,8 \pm 0,6 \text{ cm}^3.$$

Se estes cálculos fossem sempre necessários, a análise das experiências nas aulas práticas tornar-se-ia exasperante. Na prática, existem métodos mais simples de lidar com este problema, que aqui não se explicitam.

Este exemplo é ainda apropriado para notar o seguinte. Aqui utilizou-se um número de algarismos significativos de  $\pi$  apropriado, de acordo com o número de algarismos significativos dos valores utilizados das outras grandezas ( $\pi$  pode ser utilizado com o número de algarismos significativos que se desejar, man-

dando o bom senso que utilizemos o número necessário para que o resultado não tenha menos algarismos significativos que o que resultaria dos valores das restantes grandezas). Analogamente, a constante 4 que surge na expressão é equivalente a 4,000000 ... e, por isso, não tem influência no número de algarismos significativos do resultado.

## Dedução simplificada das regras da propagação de incertezas

Suponhamos que o cálculo do resultado  $R$  envolve várias grandezas independentes medidas experimentalmente  $x \pm \Delta x$ ,  $y \pm \Delta y$ ,  $z \pm \Delta z$ , etc. O resultado é uma função destas variáveis  $R = f(x, y, z, K)$ .

Obtemos a incerteza associada a  $R$  calculando os valores do resultado correspondentes aos extremos das gamas de valores dos resultados,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , etc..

Vamos aplicar este método a casos específicos.

## A medida indirecta depende da soma ou subtracção dos resultados de duas medidas indirectas

Suponhamos  $R = x + y$

Então

$$\begin{aligned} R + \Delta R &= (x + \Delta x) + (y + \Delta y) \\ &= (x + y) + (\Delta x + \Delta y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R - \Delta R &= (x - \Delta x) + (y - \Delta y) \\ &= (x + y) - (\Delta x + \Delta y) \end{aligned}$$

e  $\Delta R = \Delta x + \Delta y$

Seja agora  $R = x - y$

Então

$$\begin{aligned} R + \Delta R &= (x + \Delta x) - (y - \Delta y) \\ &= (x - y) + (\Delta x + \Delta y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R - \Delta R &= (x - \Delta x) - (y + \Delta y) \\ &= (x - y) - (\Delta x + \Delta y) \end{aligned}$$

e  $\Delta R = \Delta x + \Delta y$ , como acima,

e obtemos o resultado:

Se  $R = x \pm y$ , então  $\Delta R = \Delta x + \Delta y$

**RM 7** - Numa adição ou subtracção, a incerteza absoluta do resultado é igual à soma das incertezas absolutas das parcelas.

## A medida indirecta depende do produto dos resultados de duas medidas directas

Suponhamos agora  $R = xy$

Então

$$\begin{aligned} R + \Delta R &= (x + \Delta x)(y + \Delta y) \\ &= xy + x\Delta y + y\Delta x + \Delta x\Delta y \\ &\cong xy + x\Delta y + y\Delta x, \end{aligned}$$

em que desprezamos a parcela  $\Delta x\Delta y$  que, sendo o produto de duas parcelas pequenas, é muito menor que qualquer das outras.

$$\begin{aligned} R - \Delta R &= (x - \Delta x)(y - \Delta y) \\ &= xy - x\Delta y - y\Delta x + \Delta x\Delta y \\ &\cong xy - x\Delta y - y\Delta x, \end{aligned}$$

e obtemos o resultado:

Se  $R = xy$ , então  $\Delta R = |y| \Delta x + |x| \Delta y$ ,

em que utilizamos os módulos de  $x$  e  $y$  porque nos queremos colocar na situação mais conservadora possível.

Dividindo este resultado por  $|R| = |xy|$ , vem

$$\frac{\Delta R}{|R|} = \frac{\Delta x}{|x|} + \frac{\Delta y}{|y|}$$

Multiplicando por 100%,

$$(\% \Delta R) = (\% \Delta x) + (\% \Delta y)$$

Seja, agora,  $R = \frac{x}{y}$

$$\begin{aligned} R + \Delta R &= \frac{x + \Delta x}{y - \Delta y} \\ &= \frac{(x + \Delta x)(y + \Delta y)}{(y - \Delta y)(y + \Delta y)} \\ &= \frac{xy + x\Delta y + y\Delta x + \Delta x\Delta y}{y^2 - (\Delta y)^2} \\ &= \frac{xy + x\Delta y + y\Delta x}{y^2} \\ &= \frac{x}{y} + \frac{x}{y^2} \Delta y + \frac{1}{y} \Delta x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{e } R - \Delta R &= \frac{x - \Delta x}{y + \Delta y} \\
 &= \frac{(x - \Delta x)(y - \Delta y)}{(y + \Delta y)(y - \Delta y)} \\
 &= \frac{xy - x\Delta y - y\Delta x + \Delta x\Delta y}{y^2 - (\Delta y)^2} \\
 &= \frac{xy - x\Delta y - y\Delta x}{y^2} \\
 &= \frac{x}{y} - \frac{x}{y^2} \Delta y - \frac{1}{y} \Delta x
 \end{aligned}$$

**RM 8** - Num produto ou divisão, a incerteza relativa do resultado é igual à soma das incertezas relativas.

Obtemos, portanto,

$$\Delta R = \frac{\Delta x}{|y|} + \frac{|x|}{y^2} \Delta y$$

Dividindo agora por,  $|R| = \left| \frac{x}{y} \right|$  chegamos ao resultado,

$$\frac{\Delta R}{|R|} = \frac{\Delta x}{|x|} + \frac{\Delta y}{|y|} \text{ como no caso da multiplicação.}$$

### Exemplos

1. Suponhamos que queremos calcular a área de um rectângulo com lados  $5,95 \pm 0,06 \text{ cm}$  ( $\pm 1\%$ ) e  $1,09 \pm 0,03 \text{ cm}$  ( $\pm 3\%$ ). O produto é  $6,49 \text{ cm}^2 \pm 4\%$ , ou  $6,49 \pm 0,26 \text{ cm}^2$ . Ainda que a **RM 6b** afirme que devemos conservar três algarismos significativos (porque cada um dos factores tem três algarismos significativos), pela **RM 6** devemos arredondar para  $6,5 \pm 0,3 \text{ cm}^2$ . **Esta última é a correcta.**

2. O seno de um ângulo é dado por  $\sin \theta = a/h$ , em que  $a = 2,043 \pm 0,001 \text{ cm}$  ( $\pm 0,05\%$ ) e  $h = 1,8134 \pm 0,0002 \text{ cm}$  ( $\pm 0,01\%$ ). Obtemos o quociente  $a/h = 1,1266 \pm 0,06\%$  ou  $1,1266 \pm 0,0007$ . Ainda que a **RM 6b** afirme que devemos arredondar até quatro algarismos significativos (1,127), pela **RM 6** o resultado correcto é  $1,1266 \pm 0,0007$ .

**Estes exemplos conduzem à última regra (muito importante):**

**RM 10** - Nunca esquecer que a **RM 6b** é uma orientação que apenas deve ser utilizada quando a incerteza no resultado não é conhecida. Se calculamos a incerteza do resultado, então deve ser utilizada a **RM 6** e o resultado deve ser arredondado de modo a conservar apenas um dígito com alguma incerteza .

## Referências bibliográficas

John R. Taylor, *Error Analysis*, (2nd Edition), University Science Books, Sausalito California, 1997.

Clifford N. Wall, Raphael B. Levine e Fritjof E. Christensen, *Physics Laboratory Manual* (3rd Edition), Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1972.