

A ÁGUA NO AMBIENTE

JOSÉ PINTO PEIXOTO

SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS



A ÁGUA NO AMBIENTE

A presente edição é da responsabilidade
do Gabinete de Estudos e Planeamento
da Administração do Território (SEARN — MPAT)

Tiragem: 3000 exemplares

Abril de 1989

Execução gráfica:
Gráfica Europam, Lda.
Mem-Martins

Depósito legal n.º 28173/89

JOSÉ PINTO PEIXOTO

Director do Instituto Geofísico D. Luís
da Universidade de Lisboa

A ÁGUA NO AMBIENTE

Ministério do Planeamento e da Administração do Território

SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE
E DOS RECURSOS NATURAIS

*GABINETE DE ESTUDOS E PLANEAMENTO DA ADMINISTRAÇÃO
DO TERRITÓRIO*

Obras publicadas nesta colecção:

- CULTO DA NATUREZA (O)
— J. Vieira Trindade
- POLÍTICA DO AMBIENTE E A QUALIDADE DE VIDA (A)
— M. Gomes Guerreiro
- PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA DA TERRA (A)
— Luís F. Barreto
- CICLO DA ÁGUA EM ESCALA GLOBAL (O)
— José Pinto Peixoto
- AMBIENTE E A ECONOMIA (O)
— Luís F. Barreto
- ÁGUA (A). A ESCASSEZ NA ABUNDÂNCIA
— Zózimo Castro Rego
- ALGARVE NA PERSPECTIVA ECOLÓGICA (O)
— M. Gomes Guerreiro
- ECOLOGIA DOS RECURSOS DA TERRA (A)
— M. Gomes Guerreiro
- VIDA E O AMBIENTE (A)
— Germano da Fonseca Sacarrão
- ECOLOGIA DA LUZ E VIDA (A)
— Germano da Fonseca Sacarrão
- RADIAÇÃO SOLAR E O AMBIENTE (A)
— José Pinto Peixoto
- TEMPERATURA COMO FACTOR ECOLÓGICO (A)
— Germano da Fonseca Sacarrão
- BIO-ECOLOGIA DA ÁGUA (A)
— Germano da Fonseca Sacarrão
- SECAS (As)
— Luís Veiga da Cunha
- ECOSSISTEMA E O MEIO FÍSICO (O)
— Germano da Fonseca Sacarrão
- PROTECÇÃO INTEGRADA EM AGRICULTURA (A)
— Pedro Amaro
- MEIO BIOLÓGICO (O)
— Germano da Fonseca Sacarrão
- CONTRIBUTOS PARA UMA TEORIA DO DIREITO DO AMBIENTE
— J. Pereira Reis
- SISTEMA CLIMÁTICO E AS BASES FÍSICAS DO CLIMA (O)
— José Pinto Peixoto
- VARIAÇÕES DO CLIMA E O AMBIENTE (AS)
— José Pinto Peixoto
- INFLUÊNCIA DO HOMEM NO CLIMA E NO AMBIENTE
— José Pinto Peixoto

ÍNDICE

	Pág.
CAP. I — <i>A ÁGUA, O AR, A TERRA E O FOGO</i>	9
1. <i>A água, dom divino da Natureza</i>	11
2. <i>A água e a formação da atmosfera da Terra</i>	14
2.1. <i>A atmosfera da Terra e as dos outros planetas</i>	14
2.2. <i>A água na Terra: um espelho de três faces</i>	16
3. <i>A água no sistema climático</i>	19
3.1. <i>O sistema climático</i>	19
3.2. <i>Mais sobre os componentes do sistema climático</i>	22
4. <i>Distribuição da água no sistema climático</i>	25
4.1. <i>Os grandes reservatórios naturais</i>	25
4.2. <i>Recursos renováveis em água</i>	26
CAP. II — <i>A HIDROLOGIA, UMA CIÊNCIA JOVEM COM MAIS DE CINQUENTA SÉCULOS</i>	29
1. <i>Um pouco de história</i>	31
1.1. <i>A evolução da Hidrologia</i>	31
a) <i>A Hidrologia nas Civilizações Antigas</i>	32
b) <i>A Hidrologia nas Idades Média e Moderna</i>	34
c) <i>A Hidrologia nos séculos XVIII e XIX</i>	35
1.2. <i>A Hidrologia em Portugal</i>	37
2. <i>Posição actual da Hidrologia como ciência</i>	40
CAP. III — <i>O CICLO HIDROLÓGICO</i>	43
1. <i>O conceito do ciclo hidrológico</i>	45
1.1. <i>Aspectos gerais. Elementos e factores do ciclo hidrológico</i>	45
1.2. <i>As formas de energia que mantêm o ciclo hidrológico</i>	47

2. <i>Evaporação</i>	49
2.1. Conceito hidrológico e o fenómeno físico	49
2.2. A medição da evaporação	52
3. <i>A radiação solar e a evaporação</i>	55
3.1. O calor latente de evaporação	55
3.2. O balanço da energia do Globo	55
4. <i>A humidade na atmosfera e a precipitação</i>	58
4.1. A água na atmosfera	58
4.2. A formação das nuvens	61
4.3. A natureza das nuvens	64
4.4. Medição da precipitação	66
4.5. As formas de precipitação	67
5. <i>O ramo aéreo do ciclo hidrológico</i>	70
5.1. O papel da atmosfera e o ciclo hidrológico	70
5.2. A falácia da teoria da evaporação-precipitação <i>in situ</i> ..	70
CAP. IV — <i>PRECIPITAÇÃO E EVAPORAÇÃO</i>	75
1. <i>Distribuição planetária da precipitação</i>	77
2. <i>Distribuição planetária da evaporação</i>	79
3. <i>O balanço planetário da água à superfície do globo</i>	82
CAP. V — <i>A QUANTIFICAÇÃO DO CICLO HIDROLÓGICO</i>	87
1. <i>A necessidade de contabilizar os recursos hídricos</i>	89
2. <i>A equação clássica da Hidrologia</i>	90
3. <i>Balanço da água no solo</i>	92
4. <i>Balanço hídrico na atmosfera; equação generalizada do balanço</i>	95
5. <i>Relação entre os balanços hídrico e energético de uma região</i>	96
5.1. Factores e elementos do ciclo hidrológico	96
6. <i>Determinação da evaporação</i>	98
6.1. Método do balanço energético	98
6.2. Método do balanço hídrico	100
CAP. VI — <i>A ÁGUA, AGENTE MODELADOR DO CLIMA E DO AMBIENTE</i>	103
1. <i>O clima, componente essencial do ambiente</i>	105
2. <i>A água, a energética da terra e o clima</i>	106
3. <i>A água, factor da dinâmica do sistema climático</i>	109
4. <i>A precipitação e o clima</i>	113

4.1. Factores da precipitação	113
4.2. A precipitação e a caracterização dos climas	115
4.3. Distribuição planetária da precipitação e as zonas climáticas	116
CAP. VII — <i>A ÁGUA, FACTOR DE PROGRESSO E DE DESENVOLVIMENTO</i>	119
1. <i>O problema da água em escala mundial</i>	121
2. <i>A água, factor de desenvolvimento</i>	124
3. <i>Reservas hídricas e taxas de consumo</i>	127
4. <i>A água e a energia</i>	130
4.1. Alguns aspectos preliminares	130
4.2. As grandes etapas da energia e a água	131
4.3. A máquina a vapor e a Revolução Industrial	134
4.4. A água e a produção de electricidade	135
5. <i>A máquina a vapor e o aparecimento da termodinâmica como ciência</i>	138
CAP. VIII — <i>A ÁGUA E O AMBIENTE: O PREÇO DO PROGRESSO E DO DESENVOLVIMENTO</i>	141
1. <i>Os custos ambientais do desenvolvimento e do progresso</i>	143
2. <i>Interferência do homem no ambiente e nos recursos hídricos</i>	145
3. <i>A poluição da água</i>	147
3.1. Fontes de poluição	147
3.2. Efeitos da poluição da água	148
4. <i>A precipitação ácida</i>	150
4.1. Aspectos gerais	150
4.2. A limpeza da atmosfera	152
4.3. Os efeitos da precipitação ácida no ambiente	154
4.4. A situação em Portugal	155
5. <i>O impacte da utilização da água sobre o ambiente</i>	157
6. <i>Meteorologia, Hidrologia e contaminação das águas</i>	158
CAP. IX — <i>EPÍLOGO: A ÁGUA, A VIDA E AS CIVILIZAÇÕES</i>	161
1. <i>A energia: a água, o homem e o ecossistema</i>	163
2. <i>A água, a energia e a cultura</i>	165
3. <i>A água, as civilizações e a história</i>	166
3.1. O homem e a água	166
3.2. A água nas grandes civilizações	168

Agradecimentos

Para a realização deste trabalho contámos com a colaboração dos Srs. Dr. José M. Rocha Faria e do Dr. Carlos Marques do INMG, a quem agradecemos.

CAPÍTULO I

**A ÁGUA, O AR,
A TERRA E O FOGO**

*«Louvado sejas, meu Senhor, pela nossa irmã Água
Que é tão útil e humilde, tão preciosa e casta...»*

Louvado sejas, meu Senhor, pelo irmão vento, o ar e as nuvens...

*Louvado sejas, meu Senhor, pela nossa irmã e mãe Terra
Que nos alimenta e governa
E dá frutos variados, ervas e flores coloridas...»*

*“O Cântico do Sol»
S. Francisco de Assis*

1. A ÁGUA, DOM DIVINO DA NATUREZA

A água é o recurso natural mais importante da Terra. A água é essencial para a existência de qualquer forma de vida. A água é, como disse Leonardo da Vinci, um dom divino da Natureza.

A água é tão indispensável à nossa sobrevivência como o ar que respiramos. O homem pode estar várias semanas sem se alimentar, mas sem água não pode sobreviver mais do que poucos dias. Todas as actividades humanas dependem, particularmente, em maior ou menor escala, da água, desde a agricultura à indústria; da produção de energia aos transportes; da saúde ao desporto; da qualidade de vida à cultura.

Os sentimentos do homem para com a água têm oscilado entre a exaltação, hossanas e o desespero. A água é amiga, dócil e mansa, quando é abundante, pura e cristalina e sobra para satisfazer as necessidades do homem. Mas constitui um inimigo hostil e mortífero com as tempestades e as cheias, que tudo destroem, ou com a escassez e a ausência prolongada das chuvas e os horrores das secas e o flagelo da sede.

A água é um factor essencial e central na história, na cultura e no desenvolvimento do homem. As civilizações floresceram e persistiram, enquanto a água foi abundante. Decaíram, ou desapareceram mesmo, quando se verificou a sua escassês.

A água, «útil e humilde», é considerada como símbolo universal da limpidez, da pureza e da simplicidade. Na realidade, por mais paradoxal que pareça, a água é uma substância muito complexa e tem um comportamento surpreendente. De facto, a água é uma substância estranha e singular pelas suas propriedades físicas e químicas.

A água foi considerada por Tales de Mileto como o «princípio de todas as coisas». Aristóteles considerava a água como um dos quatro elementos essenciais do Universo, com o ar, o fogo e a terra. E a água continuou, durante séculos, a ser encarada como uma substância inalterável e indestrutível. Só no século XVIII se começou a desvendar a sua natureza. Na Inglaterra, Cavendish (1781) mostrou que a água se formava por combinação de «ar inflamável» com «ar vital». Mas foi Lavoisier (1783) que mostrou definitivamente que a água é composta por dois elementos: o oxigénio («ar vital») e o hidrogénio («ar inflamável»). Pouco tempo depois, Lavoisier conseguiu realizar a experiência inversa, da decomposição da água em oxigénio e hidrogénio. Foi Lavoisier que introduziu as designações de oxigénio e hidrogénio (produtor ou gerador de água).

Sabemos que uma molécula de água resulta da combinação de um átomo de oxigénio com dois átomos de hidrogénio, parecendo à primeira vista uma molécula muito simples. Nada mais longe da verdade! Apresenta propriedades extraordinárias, que fazem da água, como dissemos, uma substância singular. Mas é graças a essas propriedades, que a água constitui uma substância fundamental para a existência da vida na Terra, para a existência de oceanos, do ciclo hidrológico e para os tipos de clima que se observam na Terra.

Apesar dos muitos lagos e rios, a terra em que vivemos é a porção seca do nosso planeta, com pouco mais de um quarto da superfície do Globo. Os continentes têm alguns reservatórios e rios de água doce, essenciais à sobrevivência do Homem. Mas, esta é água em trânsito, porque «todas as águas vão dar ao mar». De facto, os oceanos constituem o grande reservatório da substância água na Terra; mas a sua água é salgada e não é imediatamente utilizável. Para ser útil e abundante a água deve ser «dessalinizada» e destilada

por processos naturais e expeditos. Estes processos são a evaporação. Por outro lado, os reservatórios têm de ser constantemente re-municiados e abastecidos. É o que faz a Natureza, através da precipitação, que alimenta os rios e os lagos. Mas a maior parte, cerca de quatro quintos, da água da precipitação provém da água evaporada nos oceanos. É a grande roda da água em movimento perpétuo! É a circulação da água que, ora sólida, ora líquida, ora vapor, vai do globo para a atmosfera, para depois regressar ao globo como se tivesse saudades de o deixar. Mas terá de partir, para tornar a voltar, num círculo permanente e contínuo. É o ciclo hidrológico.

A fonte de energia que mantém o ciclo hidrológico e todo este processo natural de reabastecimento, através da precipitação, é fundamentalmente a energia da radiação solar. É esta que vai dar origem às várias formas de energia, responsáveis pelos mecanismos que mantêm o ciclo hidrológico. De facto, é a transformação de energia radiante, de origem solar, em energia térmica que, depois de absorvida pela superfície do globo, origina a evaporação da água para a atmosfera, onde se condensa, formando as nuvens. As gotas de água ou as partículas de gelo que as formam, ao atingirem dimensões críticas, caem por acção da gravidade, constituindo a precipitação que atinge a superfície do globo e depois se escoia, infiltra ou fica retida.

O homem levou séculos a descobrir que a Natureza tinha sido generosa ao contemplá-lo com um sistema de renovação e de reciclagem perpétua da água, o ciclo hidrológico, que é o conceito fundamental da ciência que trata da água na Terra, a Hidrologia. O ciclo hidrológico é a circulação, que nunca acaba, da substância água, nas suas três fases, sobre a Terra inteira.

Os quatro elementos de Aristóteles — a água, o ar, a terra e o fogo — juntam-se agora para produzir a maravilha da Natureza, o ciclo hidrológico, que faz da água um dom divino da Natureza.

O Sol, os oceanos, os continentes e a atmosfera constituem um sistema de destilação gigantesco, accionado por uma fonte de energia generosa, e que não apresenta a factura: a radiação solar. Este sistema conta com uma rede de alimentação e de distribuição efficientíssima, constituída pela circulação geral da atmosfera; pelas correntes marítimas; pelos rios, ribeiros e riachos das grandes bacias hidrográficas; e pelos glaciares, lentos, mas poderosos e persistentes. A água mantém-se em circulação permanente e perpétua dos ocea-

nos para a atmosfera, desta para os continentes e, finalmente, destes para os oceanos, ficando sempre preparada para iniciar nova jornada. Os oceanos constituem, por isso, o berço e a tumba de toda a água que circula na Terra: «*Os rios vão desaguar ao lugar donde saíram, para voltarem a correr.*» (*Ecclesiastes*, 11:7). E nós juntaremos: saíram levados pela atmosfera no ramo aéreo do ciclo hidrológico e voltaram pela mão do ramo terrestre do ciclo, tudo movido pelo fogo do Sol e pela gravidade da Terra.

2. A ÁGUA E A FORMAÇÃO DA ATMOSFERA DA TERRA

2.1. A atmosfera da Terra e as dos outros planetas

De todos os planetas do sistema solar, a Terra é tão diferente dos outros, que constitui um caso singular. De facto, Mercúrio e a Lua não têm qualquer atmosfera e constituem «mundos desolados». Por outro lado, Marte tem uma atmosfera, quase exclusivamente formada por dióxido de carbono (CO_2). A pressão é cerca de 7,5 mb. As regiões polares estão cobertas por camadas de gelo e de CO_2 sólido. A água está sempre congelada, mas o dióxido de carbono pode sublimar para formar a atmosfera, com ventos fortes originando, por vezes, tempestades de poeiras. Além disso, Marte apresenta variações extremas de temperatura, com nuvens formadas por poeiras, água e dióxido de carbono. As temperaturas frígidas e as pressões tão baixas fazem de Marte um mundo inóspito. Vénus, que durante largo tempo foi considerado o planeta irmão da Terra, tem temperaturas elevadíssimas e uma atmosfera massiva composta quase inteiramente por dióxido de carbono (CO_2) e com uma espessa camada de nuvens ácidas. A atmosfera de Vénus contém uma massa muito superior à da Terra e uma pressão 90 vezes maior que a tornam num mundo impossível para a vida. Os grandes planetas exteriores, como Júpiter e Saturno, são constituídos por uma massa fluida, constituída principalmente por hidrogénio e hélio, assemelhando-se mais a estrelas mortas do que aos planetas interiores. As suas «luas» geladas não deixarão de ser inóspitas. Por isso, a Terra dada a sua adaptabilidade à vida, como a concebemos, parece constituir um caso único no sistema solar.

É certo que existem muitas semelhanças de natureza geofísica e geoquímica, entre a Terra e os seus planetas vizinhos, Vénus e Marte. Mas têm dias e anos de duração muito diferentes dos da Terra*. Têm densidades próximas e as suas composições internas não devem ser muito diferentes com o manto e a crosta ricos em silicatos. As superfícies são rugosas e montanhosas e há evidência de vulcanismo em Marte e possivelmente em Vénus. Ambos têm atmosferas que, inicialmente, poderiam ter tido constituições próximas.

Mas o que torna a Terra diferente dos outros planetas vizinhos e que lhe dá um clima benigno, tão diferente do dos outros, é a existência de uma atmosfera diferente da dos outros planetas e da substância água poder existir nas suas três fases possíveis. A possibilidade da existência de água na fase líquida foi mesmo crucial para a formação e para a composição da atmosfera actual.

Na fase inicial da Terra esta não teria qualquer atmosfera. Os elementos leves, como o hidrogénio (H_2) e o hélio (He), que teriam sido predominantes na atmosfera da primeira geração, ter-se-iam escapado. A Terra não tinha oceanos e teria sido povoada por vulcões, fortemente activos.

Os vulcões teriam lançado quantidades consideráveis de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), vapor de água (H_2O), azoto (N_2), dióxido de enxofre (SO_2), etc., mas não muito oxigénio. Estes gases teriam constituído a atmosfera da segunda geração da Terra.

O azoto, N_2 , que dificilmente se combina quimicamente com outros elementos, foi-se acumulando. Os oceanos, os rios e os lagos formaram-se à medida que o vapor de água se foi condensando, devido às temperaturas que predominavam na Terra. O oxigénio ainda não teria aparecido. Entretanto, teriam surgido as primeiras formas de vida nos oceanos, como as algas azul esverdeadas, que por fotossíntese, ao absorverem o dióxido de carbono, teriam libertado oxigénio. E, assim, com predomínio do azoto acumulado e o excesso de oxigénio, proveniente da fotossíntese, surgiu a atmosfera da terceira geração, que é a atmosfera actual.

A camada da atmosfera da Terra que se estende até 80 km de altitude tem uma constituição homogénia em que os componentes

* Vénus e Marte têm anos cujas durações são em dias terrestres 225 e 687, respectivamente; os «dias» correspondentes têm 242 e 24,9 horas de duração.

têm concentrações praticamente constantes, em altitude. É constituída, fundamentalmente, por 78% de azoto (N_2), 21% de oxigénio (O_2) e 1% de árgon (Ar), a que se juntam constituintes variáveis como o vapor de água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2). Este é um constituinte menor da atmosfera com cerca de 375 partes por milhão (1/30 de 1%) e encontra-se uniformemente distribuído por toda a atmosfera. A quantidade de vapor de água varia consideravelmente, de dia para dia, e pode variar entre 4%, num dia quente e húmido, e menos de 1% em dias frios e secos, ou nas regiões polares.

O vapor de água é invisível, como qualquer outro gás da atmosfera, mas está sempre presente em maior ou menor quantidade.

O ozono, O_3 , é também variável e à superfície do Globo tem concentrações muitíssimo pequenas mas entre 25 km e 40 km tem concentrações significativas, ainda que em valor absoluto sejam muito pequenas, de 0,0001% a 0,0002%. Logo, o ozono constitui uma fracção mais que diminuta da atmosfera. Mas mesmo assim, devido à sua grande capacidade de absorver a radiação ultravioleta, protege-nos de queimaduras letais e poderemos dizer que raramente tão pouco significa tanto.

As concentrações do ozono aumentam ligeiramente nas grandes cidades, ondê os fumos e os gases dos automóveis reagem com O_2 , que em presença da luz solar conduzem à formação de O_3 .

À primeira vista os dados referidos sobre a composição da atmosfera seriam monótonos e «maçadores» se não soubessemos que sem O_2 morreríamos sufocados; sem O_3 morreríamos de queimaduras; sem H_2O morreríamos de sede e, que, finalmente, se não fossem o CO_2 e o N_2 morreríamos de fome.

2.2. A água na Terra: um espelho de três faces

A água é a única substância que se apresenta no ambiente natural terrestre nas três fases: sólida, líquida e gasosa e que podem mesmo, coexistir simultaneamente. Na fase líquida, constitui a hidrosfera, que engloba os oceanos, os lagos e os rios. Na fase sólida constitui a criosfera formada pelas calotas polares, pelos gelos e neves. Na fase gasosa constitui o vapor de água, componente essencial da atmosfera.

A água é responsável pelas temperaturas moderadas que se ob-

servam à superfície e provavelmente pela origem da vida. A água na fase vapor só poderia ter existido na Terra nas condições em que as atmosferas iniciais dos planetas se formavam. De facto, dadas as distâncias relativas dos planetas ao Sol, as temperaturas de equilíbrio radiativo em Vénus e em Marte, cujas atmosferas são constituídas por dióxido de carbono e por água, permitem que as fases estáveis sejam, respectivamente, a fase vapor e a fase sólida (gelo). Na Terra, as temperaturas dominantes permitem a coexistência da água nas três fases, com predomínio da fase líquida. Por outro lado, o dióxido de carbono, que é quimicamente instável em presença da água líquida, só existe sob a forma residual na atmosfera da Terra, tendo a maior parte sido armazenada nos carbonatos da crosta terrestre.

O vapor de água e o dióxido de carbono absorvem fortemente a radiação infravermelha emitida pela atmosfera e pelo globo, originando o aparecimento de um efeito de estufa. Este efeito é muito importante para o equilíbrio energético da Terra e é decisivo para o aumento e distribuição das temperaturas observadas à superfície do globo e em altitude. Devemos acentuar que o efeito de estufa se observa na Terra quase no limite das condições que permitem a sua existência. Bastaria uma aproximação de 6×10^6 milhas da Terra ao Sol para que já não fosse possível o efeito de estufa, originando-se uma situação semelhante à que ocorre em Vénus.

Aceita-se, hoje, que a água foi o meio em que a vida surgiu e evoluiu na fase inicial. Como se diz no *Corão*: «*e da água fiz todas as coisas com vida*». A vida foi, talvez, a causa fundamental para estabelecer a diferença entre a nossa atmosfera e a dos outros planetas interiores. Devido à acção contínua da fotossíntese pelas plantas, o oxigénio, elemento de grande actividade química, passou a poder existir no estado livre, em vez de aparecer, apenas, combinado com outros elementos como, por exemplo, nas rochas (silicatos, carbonatos), nos oceanos, etc. A existência do oxigénio livre na atmosfera da Terra origina vários processos evolutivos, fundamentais para a constituição e estrutura da atmosfera, como a ionização na alta atmosfera, a formação do ozono na estratosfera, responsável pela filtração da radiação ultravioleta solar.

O oxigénio livre permite ainda uma variedade considerável de processos químicos à superfície do globo, tais como a combustão, o metabolismo, etc.

A Terra é, de entre os planetas interiores, o que tem um satélite de maior massa — a Lua. A influência desta sobre a dinâmica da Terra contribui para a estabilidade relativa do clima à superfície do globo e para a caracterização das várias regiões climáticas. De facto, a obliquidade do eixo da terra não sofre grandes variações porque a presença da Lua limita o período de precessão dos equinócios e evita uma interacção de ressonância com a precessão do plano da órbita. Sem a existência da Lua, a obliquidade do eixo da Terra oscilaria mais do que a de Marte, conduzindo a uma instabilidade climática tão grande, que poderia mesmo comprometer a evolução biológica. Também se sabe que a Lua tem uma influência importante no comportamento do campo magnético da Terra, que, por isso, é muito mais intenso do que os campos magnéticos de Marte e de Vénus. Por outro lado, a intensidade do campo magnético condiciona a estrutura da magnetosfera (camadas de Van Allen) e é suficientemente elevada para reorientar e derivar as partículas do vento solar, impedindo que atinjam a Terra.

A formação dos oceanos foi decisiva para a evolução da atmosfera da Terra. A água condensada e o dióxido de carbono dissolvido forneceram um ambiente propício à formação da vida. Já em Vénus a impossibilidade da existência da água nas fases sólida e líquida não permitiu a formação dos oceanos. As temperaturas à superfície são tão elevadas que a água só pode existir na fase gasosa.

Além disso, como as temperaturas em Vénus são muito elevadas, os gases da atmosfera poderiam reagir com as rochas da superfície, estabelecendo-se um equilíbrio químico gás-sólido. E é assim que a quantidade de dióxido de carbono da atmosfera de Vénus, determinada pelo equilíbrio com as rochas carbonatadas da superfície, é agora muito diferente da que predominaria se tivesse oceanos.

Na Terra, o vapor de água foi o gás lançado na atmosfera em maior abundância, seguido do dióxido de carbono. Aceita-se hoje que a actual atmosfera da Terra foi sustida a uma temperatura moderada e tem uma pressão não muito elevada, devido à formação e à extensão dos oceanos.

O gelo só se forma na Terra em condições especiais e em regiões preferenciais do globo: calotas polares e topos das montanhas, ou em condições meteorológicas específicas, durante o Inverno.

No decurso da evolução da atmosfera deve ter-se passado por

um estado em que a pressão do vapor atingiu a tensão máxima, começando a partir daí a condensar-se, dando origem aos oceanos.

Nas condições actuais a adição de água à atmosfera por evaporação não vai provocar uma saturação generalizada, devido à remoção das moléculas pela circulação geral, da atmosfera, nem conduzir a um aumento substancial da pressão atmosférica. De facto, a circulação geral, transportando o vapor de água das regiões de origem para outras zonas do globo, não permite que se atinja o estado de equilíbrio de saturação. Além disso, a circulação geral, tem os mecanismos necessários para provocar a condensação e a precipitação do excesso do vapor de água existente.

3. A ÁGUA NO SISTEMA CLIMÁTICO

3.1. O sistema climático

A distribuição e a circulação da água no planeta Terra deve tomar em consideração a natureza do meio físico em que a água circula e os processos dinâmicos que originam o movimento.

Fundamentalmente, a circulação da água resulta da conservação da massa, em termos da substância água, e da existência de factores, que forcem o seu movimento e condicionam a sua dinâmica. Uns factores são extrínsecos, tais como a energia solar, a circulação geral planetária dos ventos, o campo da gravidade, a geometria do globo e a natureza das condições fronteiras. Outros são de natureza intrínseca, inerentes à substância água, como os possíveis estados de agregação: sólido, líquido e gasoso, em que pode ocorrer na Terra, e as transições de fase, com as suas implicações energéticas e hidrodinâmicas.

A análise do ciclo hidrológico deve caracterizar-se pela simplicidade e assentar em bases físicas consistentes. Ora, só se pode fazer uma análise coerente do ciclo hidrológico enquadrando-o na dinâmica dos sistemas em que se observa, tomados estes na acepção lata de sistema termo-hidrodinâmico.

Por conseguinte devemos precisar o conceito de sistema e apresentar algumas das suas características.

Definiremos sistema termodinâmico como uma porção limitada de matéria e de energia, definida por uma fronteira real ou conceptual, numa região qualquer do espaço. A fronteira designa-se, em geral, por parede do sistema.

A região exterior ao sistema constitui o seu universo complementar, ou o seu ambiente. O subdomínio do universo complementar, adjunto à parede do sistema e em que decorrem interacções deste com o universo complementar, constitui a vizinhança do sistema. O conteúdo em energia dum sistema pode variar, devido ao fluxo de energia através da fronteira, sob a forma de calor ou de trabalho, ou ainda, associado à transferência de massa.

Um sistema diz-se isolado quando não há interacção de energia entre ele e o seu universo complementar. Logo a energia dum sistema isolado mantém-se constante e a parede que o limita diz-se, então, adiabática. Um sistema diz-se fechado quando não permuta com a sua vizinhança podendo, no entanto, permutar energia. A parede do sistema diz-se neste caso impermeável, mas por deixar passar energia diz-se diabática (não adiabática) ou diatérmica. Por isso, um sistema fechado tem uma massa constante. Um sistema diz-se aberto quando se verifica um fluxo de massa e de energia através da parede do sistema, que, neste caso, é permeável e diatérmica.

Os sistemas isolados são muito raros no mundo natural, ainda que possam realizar-se no laboratório. O planeta Terra pode considerar-se um exemplo dum sistema natural fechado, quando inclui o globo e a atmosfera.

Há numerosos exemplos de sistemas abertos no mundo real. São mesmo os predominantes. É o caso das nuvens com precipitação, das bacias hidrográficas, da biosfera, etc. Estes sistemas têm uma propriedade importante que é a de poderem atingir estados de equilíbrio estacionários.

Os sistemas naturais, abertos, são constituídos, por vezes, por uma série de subsistemas, também abertos, em que o sinal de saída de um subsistema é o sinal de entrada do seguinte. Estes subsistemas, ligados dinamicamente, de forma ordenada, através dos fluxos de massa e de energia constituem *sistemas em cascata*. Um exemplo dum sistema natural em cascata é o ciclo hidrológico. O «sinal de saída» da atmosfera, sob a forma da precipitação, constitui a «entrada» para o solo onde se infiltra ou se escoia. Estes constituem o «sinal de entrada» dos rios e das águas subterrâneas.

A cobertura vegetal constitui um exemplo de um mecanismo regulador externo, do ciclo hidrológico, enquanto que a temperatura do ar e a tensão do vapor, na atmosfera, constituem exemplos de mecanismos reguladores internos.

A camada superior do globo e a atmosfera formam um grande sistema em que decorrem as condições meteorológicas e os fenómenos do clima. Por isso, aquele sistema designa-se por sistema climático.

O sistema climático é caracterizado por um conjunto de propriedades e de processos que estabelecem o clima e são responsáveis pela sua variabilidade. O sistema climático (\mathcal{S}) constitui um sistema termo-hidrodinâmico composto, formado por cinco subsistemas que são: a atmosfera (\mathcal{A}) constituída pelo invólucro gasoso da Terra; a hidrosfera (\mathcal{H}) que compreende toda a água líquida distribuída na crosta terrestre incluindo os oceanos (\mathcal{O}), mares interiores, (m), lagos (ll), rios (rr), e águas subterrâneas (\mathcal{U}); a criosfera (\mathcal{C}) que compreende as grandes massas de gelos, depósitos de neves glaciares; a litosfera (\mathcal{L}), formada pelas grandes massas continentais da superfície do globo e as bases dos oceanos; e a biosfera (\mathcal{B}) que inclui a cobertura vegetal, a fauna da superfície do globo, a flora e a fauna dos oceanos. Assim, vemos que o sistema climático, \mathcal{S} , é um sistema composto fechado, mas não isolado, constituído por cinco subsistemas abertos disjuntos (ligados e justapostos entre si), que designaremos por componentes do sistema climático. Os subsistemas do sistema climático são: a *atmosfera* \mathcal{A} , a *hidrosfera*, \mathcal{H} , a *criosfera*, \mathcal{C} , a *litosfera*, \mathcal{L} , e a *biosfera*, \mathcal{B} .

O sistema climático, \mathcal{S} , é pois um sistema composto pela união de subsistemas disjuntos \mathcal{S}_i . Recorrendo à linguagem matemática simples, podemos representar o sistema climático \mathcal{S} pela expressão:

$$\mathcal{S} \equiv \mathcal{A} \cup \mathcal{H} \cup \mathcal{C} \cup \mathcal{L} \cup \mathcal{B} = \mathcal{U}_i \quad \mathcal{S} \quad (1)$$

em que o símbolo \cup designa o conhecido operador união. Por seu turno, a hidrosfera pode definir-se:

$$\mathcal{H} \equiv \mathcal{O} \cup \mathcal{U} \cup m \cup ll \cup rr$$

Os componentes mais importantes são os oceanos (\mathcal{O}) e as

águas subterâneas (\mathcal{U}). No balanço global da hidrosfera as contribuições dos mares interiores (m), dos lagos (ll) e dos rios (rr) não são significativas. No entanto, cada um deles, tomado isoladamente, é muito importante e corresponde a uma disciplina diferenciada das Ciências Geofísicas, como a Potomologia (rios), a Limnologia (lagos), etc.

Os subsistemas do sistema climático interactuam por serem sistemas abertos e não isolados, isto é, limitados por paredes não restritivas para a massa e para a energia. Além disso, os subsistemas são politérmicos, porque as suas partes estão a temperaturas diferentes. As participações dos vários subsistemas são definidas pelas suas intersecções (\cap) e representada genericamente por $\delta\mathcal{S}$. Por exemplo, a interface entre a atmosfera e os oceanos é representada por

$$\mathcal{A} \cap \mathcal{O} \quad (2)$$

e é uma parede diabática e permeável. Mas a parede do sistema climático global é restritiva para a massa e, por isso, é apenas diabática: não deixa perder a massa, mantendo, por isso, a atmosfera, mas deixa-se atravessar pela energia da radiação solar e terrestre.

3.2. Mais sobre os componentes do sistema climático

A água é a substância comum a todos os subsistemas e todos participam e condicionam a sua circulação no sistema climático.

Na atmosfera, que é o subsistema de maior variabilidade do sistema climático e que tem o menor tempo de resposta, a água existe predominantemente na fase vapor; mas existe, também, nas fases líquida e sólida, constituindo as gotículas e os cristais de gelo, que formam as nuvens. Podemos, assim, e com propriedade, referir-nos à existência duma «hidrosfera aérea.»

Os oceanos (\mathcal{O}) são a parte mais importante da hidrosfera, como dissemos, e têm uma influência decisiva nas variações climáticas. Com efeito, os oceanos cobrem uma área de 350×10^6 km², ou seja 71% da área total do globo (510×10^6 km²). No hemisfério Norte os continentes cobrem 61%, enquanto que no hemisfério Sul cobrem apenas 19% da área total do hemisfério.

Os oceanos absorvem a maior parte da radiação solar que atinge a superfície do globo e representam um reservatório enorme de energia, devido à sua grande massa e ao valor elevado do calor específico da água. Têm, por isso, uma grande inércia mecânica e térmica, cujas escalas temporais vão de algumas horas a meses e a anos. As correntes oceânicas constituem uma parte do ciclo hidrológico; transportam grandes quantidades de calor das regiões equatoriais, mais quente, para as regiões polares mais frias. Os oceanos são a principal fonte de humidade do ciclo hidrológico, através da evaporação. Além disso, os oceanos permutam dióxido de carbono, sais e outras substâncias com a atmosfera. Logo, os oceanos, além do papel importantíssimo que têm no ciclo hidrológico, estão também envolvidos no balanço químico do sistema climático.

Os lagos, os rios e as águas subterrâneas são, por sua vez, componentes essenciais do ciclo hidrológico e constituem factores que intervêm no clima, em toda a gama de escalas de tempo.

Na criosfera, a água apresenta-se na fase sólida. As camadas de gelo e as neves continentais apresentam variações sazonais, que estão intimamente ligadas à circulação geral da atmosfera. Os glaciares e os grandes depósitos de gelo, que representam os maiores depósitos de água doce na Terra, respondem numa forma muito mais lenta à circulação geral. Devido à sua grande massa, estes subsistemas desenvolvem uma dinâmica própria e apresentam variações significativas na massa e na extensão, em períodos que vão de centenas a milhares de anos. Tais variações estão intimamente ligadas ao balanço hídrico global da Terra e às variações do nível médio dos mares.

No interior da litosfera há grandes lençóis de água que constituem os depósitos de águas subterrâneas. A água existente nas camadas do solo junto à superfície (até 1 m de profundidade, aproximadamente) constitui a água ou a humidade do solo. A água do solo é de grande importância para a climatologia numa região e para a sua agricultura. Constitui um ingrediente vital do ambiente ecológico. É esta água que as plantas, depois de a extrair do solo através do sistema radicular, lançam, em grande parte, na atmosfera através dos estomas das folhas, constituindo a evapotranspiração.

Pode haver uma relação significativa entre a ocorrência dos períodos mais extensos de glaciação e os períodos em que as grandes massas continentais ocupavam regiões vizinhas dos pólos. Os pro-

cessos de ajustamento isostático e de acumulação de sedimentos no fundo dos oceanos representam variações significativas da litosfera, podendo ser tomadas como uma manifestação de interacção *litosfera-criosfera-oceanos*. A injeção de produtos de origem vulcânica na atmosfera e a sua dispersão realizada pela circulação geral, assim como as partículas arrancadas pelos ventos e lançadas na atmosfera, constituem o aerossol e são uma forma de interacção *litosfera-atmosfera*. Estas interacções têm uma influência importante nos mecanismos da formação das gotas das nuvens, na disposição da radiação solar devida à difusão e à absorção e na distribuição da temperatura. O aerossol é, por isso, fundamental para o estabelecimento e caracterização do clima e para compreender a sua variabilidade.

A biosfera contém a água biológica dos tecidos animais e vegetais de que forma a parte mais importante. Ainda que os elementos da biosfera tenham tempos de reacção muito variáveis, são muito sensíveis ao clima e, por outro lado, podem influenciar este, designadamente através do ciclo hidrológico (evapotranspiração, etc.), do ciclo do carbono e da fotossíntese. É através da biosfera que se obtêm os «registos» dos paleoclimas.

Têm-se verificado variações naturais da cobertura vegetal, com períodos que vão de dezenas a milhares de anos, em resposta às variações do clima, designadamente da temperatura do ar e da precipitação. Por outro lado, a cobertura vegetal altera a rugosidade do solo, o albedo da superfície e a evaporação, influenciando o clima e a hidrologia do ramo terrestre. A variação das populações animais também se reflecte, através da disponibilidade de alimentos e das condições de vida, na variabilidade do clima.

As variações antropogénicas devidas à agricultura e à pecuária (deflorestação, pastagem, etc.), à urbanização e à indústria, ainda que possam influenciar localmente o clima, têm uma relevância muito menor nas modificações do clima, em escala regional.

4. DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO SISTEMA CLIMÁTICO

4.1. Os grandes reservatórios naturais

A quantidade da substância água nas suas três fases existentes na Terra tem-se mantido constante, pelo menos desde o aparecimento do homem. Em termos gerais, distribui-se pelos três reservatórios principais que, pela ordem de importância são: os oceanos, os continentes (litosfera e criosfera) e a atmosfera. A litosfera contém, além das águas subterrâneas, uma quantidade apreciável de água de cristalização retida nas várias formações litológicas, não sendo fácil fazer uma estimativa fundamentada.

Vejamos como se distribui a água pelo sistema climático (Fig. 1).

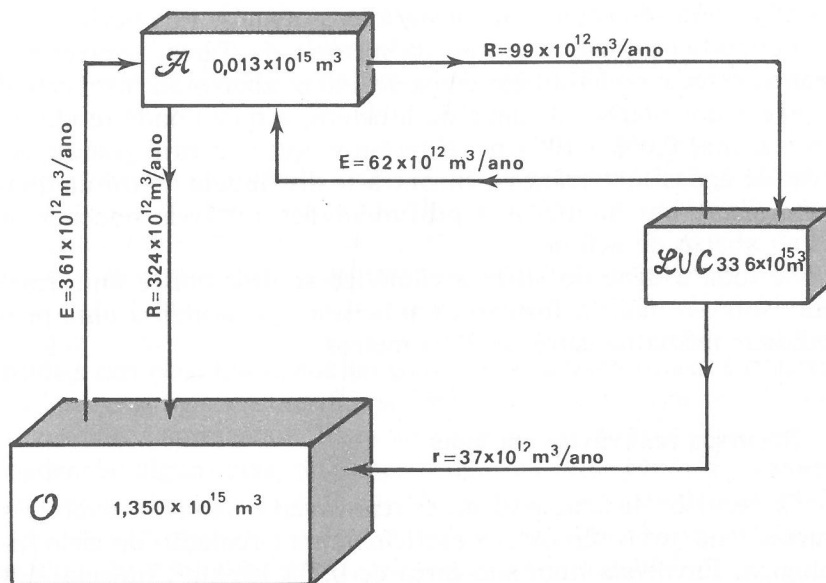


Fig. 1 — Distribuição e circulação da água no sistema climático.

Os oceanos constituem, de longe, o maior reservatório de água do sistema climático contendo cerca de 97% de toda a água existente na Terra. Dos outros 3%, 2,15% existem na criosfera (glaciares e

calotas geladas polares da região Ártica e Antártica) e o restante nos lagos, rios, mares interiores e na atmosfera.

Em termos de volume, a quantidade total da água existente na hidrosfera é $1440 \times 10^6 \text{ km}^3$, cabendo aos oceanos cerca de $1350 \times 10^6 \text{ km}^3$. A quantidade de água armazenada na atmosfera é, apenas, da ordem de $0,013 \times 10^6 \text{ km}^3$, ou seja 100 000 vezes inferior à quantidade de água dos oceanos. A água contida nos continentes distribui-se por vários reservatórios: $29 \times 10^6 \text{ km}^3$ pelos glaciares; $18,4 \times 10^6 \text{ km}^3$ pelas águas subterrâneas; $0,2 \times 10^6 \text{ km}^3$ pelos lagos e rios. À matéria viva da biosfera correspondem apenas $0,0006 \times 10^6 \text{ km}^3$.

A quantidade de água retida nos gelos polares é impressionante, totalizando cerca de $25 \times 10^6 \text{ km}^3$, ou seja, 1,8% da água total da hidrosfera. Se toda a água dos glaciares se fundisse, o nível actual dos oceanos subiria cerca de 60 m, alterando substancialmente a configuração dos contornos geográficos actuais. Por outro lado, nos períodos de forte glaciação da história da Terra, o nível dos oceanos desce e poderia ficar cerca de 140 m abaixo do nível actual das águas dos mares. Da água da litosfera, a quantidade retida no solo é apenas $0,066 \times 10^6 \text{ km}^3$. A restante, que constitui grandes reservas de águas subterrâneas, encontra-se distribuída de forma quase uniforme, por aquíferos a profundidades variáveis podendo ir mesmo abaixo de 800 m.

Se toda a água do sistema climático se distribuisse uniformemente sobre o planeta formaria um oceano que atingiria uma profundidade média de cerca de 3700 metros.

4.2. Recursos renováveis em água

Os recursos de água podem ser renováveis e não renováveis. Os recursos renováveis são os que participam na circulação do ciclo hidrológico. Envolvem num ano cerca de $0,5 \times 10^6 \text{ km}^3$, ou seja, um volume da ordem de 1/3000 da água do sistema climático.

Os oceanos constituem a fonte principal de água na Terra, como mostrámos. A energia solar provoca a evaporação e outras transformações, associadas às transições de fase, essenciais para a energética da Terra. A evaporação da superfície do globo envolve cerca de $0,4 \times 10^6 \text{ km}^3$ por ano, ou, mais precisamente,

423 000 km³ por ano. Voltaremos ao problema da evaporação com mais desenvolvimento nos capítulos seguintes.

Para manter o regime estacionário, que se observa, em condições médias, no ciclo hidrológico, tem de haver um escoamento de retorno superficial e subterrâneo de água nas fases líquida e sólida dirigido dos continentes para os oceanos, para compensar o escoamento aéreo proveniente dos oceanos.

Em sentido lato, podemos aceitar que os recursos em água participam num sistema grandioso de circulação no sistema climático. As escalas espaço-temporais de cada uma das partes participantes na circulação é que são muito diferentes. A diferença reside na velocidade com que se verifica o transporte da água, em cada um dos componentes no ciclo, e na rapidez com que ocorrem as transições de fase.

É com base neste critério que deve fazer-se a separação dos recursos em água. Os recursos renováveis são aqueles que têm um tempo de circulação relativamente curto, enquanto que os recursos não renováveis têm tempos de percurso da ordem de décadas, de séculos, ou de milénios. A exploração destes últimos corresponde, dentro da nossa vida média, a uma verdadeira extracção mineira.

O período de trânsito da água, no ciclo, caracteriza o tempo de residência. Este pode variar de alguns dias, como acontece com a água na atmosfera, até milénios, como se verifica nas águas profundas dos oceanos. Nos continentes o tempo de residência da água pode variar de semanas até milénios, de acordo com o tipo do meio em que se faz o seu transporte que alimenta os vários reservatórios: caudais dos rios, humidade do solo, lagos, pântanos, gelos polares e glaciares e as águas subterrâneas. Devemos acentuar que os aquíferos subterrâneos apresentam ainda uma grande diversidade de tempos de residência: alguns dias, ou semanas nos aquíferos cársticos; semanas a meses nos leitos de rios de aluvião; meses a anos em depósitos aluviais; anos a décadas noutros aquíferos não confinados; décadas a séculos, ou mesmo milénios, em aquíferos confinados.

Notaremos que as estimativas apresentadas correspondem a uma distribuição estacionária. Somos assim levados a concluir que passam através da atmosfera quantidades enormes de água, ainda que a massa de água precipitável retida pela atmosfera seja ínfima àquela escala. Um fluxo aéreo tão elevado só se explica com a grande mobilidade da atmosfera. Muita da água evaporada nos oceanos

é transportada para os continentes pelas massas de ar marítimas, que, assim, confirmam o princípio fundamental de que a água é um recurso em movimento e com uma dinâmica própria, associada às transições da fase, que caracterizam a sua termodinâmica própria.

Para fazer uma ideia dos valores relativos das quantidades de água dos vários reservatórios naturais e dos recursos renováveis, vamos considerar a seguinte imagem. Suponhamos que a água total da hidrosfera corresponde a um volume de trinta litros (um almude). Então, a água doce seria equivalente, aproximadamente, a cinco chávenas; se descontarmos a que corresponde à água dos glaciares ficaríamos apenas com cerca de dois terços de uma chávena. Se, agora, removêssemos a água equivalente à dos aquíferos subterrâneos, e descontada a água poluída, ficaríamos com cerca de sete a dez gotas de água disponível e utilizável, o que é muitíssimo pouco, comparado com os trinta litros iniciais.

CAPÍTULO II

**A HIDROLOGIA,
UMA CIÊNCIA JOVEM
COM MAIS
DE CINQUENTA SÉCULOS**

1. UM POUCO DE HISTÓRIA

1.1. A evolução da Hidrologia

A Hidrologia é a ciência que estuda a água no ambiente, o seu comportamento e a sua circulação. Levou séculos a estabelecer e a definir os contornos da hidrologia, como ciência, e a esclarecer e formular o conceito fundamental em que assenta: o ciclo hidrológico. É que, como alguém já afirmou, «a água é o espelho da ciência». Logo, falar da água é falar da evolução do conhecimento e do pensamento científico do homem e do seu desenvolvimento através da história.

A Hidrologia é, de facto, uma ciência jovem, ainda que paradoxalmente, iniciada há mais de cinquenta séculos. Como hoje a concebemos, é uma disciplina das Ciências Geofísicas que estuda a ocorrência da água na Terra, a sua distribuição, a sua circulação, as suas propriedades físicas e químicas e as suas relações com o meio ambiente, incluindo as relações com os seres vivos.

A Hidrologia abarca toda a história da vida da água na Terra. Está relacionada com a meteorologia, através da água da atmosfera, da precipitação e da evaporação. Está ligada à oceanografia, à glaciologia, e à geologia através da evaporação das águas superficiais, das águas subterrâneas, etc. O conceito fundamental da hidrologia é o ciclo hidrológico, consequência do princípio da conservação da substância água, na Terra, nas suas três fases.

O ciclo hidrológico é uma sequência fechada de fenómenos naturais em que o globo (mares, águas interiores, geleiras, neve, vegetação, etc.) cede, por evaporação, água à atmosfera na fase vapor, que depois de condensar é posteriormente devolvida ao globo sob a forma de precipitação nas fases líquidas ou sólida; aqui é parcial-

mente retida na superfície, infiltrando-se no solo para originar as águas subterrâneas, ou escoando-se através dos rios para os oceanos e donde passa novamente por evaporação para a atmosfera no estado vapor, fechando-se assim o ciclo.

Um pouco de história talvez ajude a compreender as razões duma evolução tão lenta para o conhecimento dos mecanismos que originam e mantêm a circulação da água nas suas várias fases e para a clarificação do conceito do ciclo hidrológico.

a) *A Hidrologia nas Civilizações Antigas*

As civilizações mais antigas que se conhecem desenvolveram-se em regiões semiáridas, ou mesmo áridas. Por isso, o homem dessas civilizações deveria saber utilizar bem a água de que dispunha, por vezes tão escassa. Foi a água que permitiu ao homem a transição de um regime nomádico para um regime estável comunitário.

A irrigação ordenada, com águas superficiais e subterrâneas, praticava-se já nas civilizações antigas. Os sumerianos, que teriam vivido na Mesopotâmia entre 7000 anos a. C. e 3000 anos a. C., construíram um sistema de canais que permitia a irrigação e um melhor uso da terra.

No Egipto, a civilização que ali floresceu a partir do ano 3000 a. C. foi uma «dádiva do Nilo», e que só foi possível devido ao desenvolvimento de um sistema de rega para o aproveitamento das cheias periódicas no Nilo. Nos vários livros do *Antigo Testamento* são muito frequentes as referências à água, como a que é mencionada na Introdução. Pela mesma altura, na Pérsia e na Arménia, construíram-se redes de canais subterrâneos — os «Khanat» — que, ligando-se a um manto friático, permitiam captar as subterrâneas e transportá-las, por gravidade, para regiões à superfície a níveis mais baixos do que o dos aquíferos. Este sistema estendeu-se depois a outras regiões da África do Norte, da China, etc. E ainda hoje é utilizado no Irão.

No mundo da civilização helénica, a água constituía com a terra, o fogo e o ar, um dos quatro elementos fundamentais do Universo. Se considerarmos as propriedades dos depósitos calcáreos, tão abundantes na bacia do Mediterrâneo Oriental, como hoje as entendemos, não admira a importância que na civilização grega era atri-

buída aos depósitos subterrâneos de água. Estes constituiriam o reservatório que alimentava as nascentes, as correntes e os rios à superfície. A extrusão da água seria devida, entre outros, à acção da capilaridade e à «pressão das rochas». Tales de Mileto, no século VI a. C., aceitava que os grandes depósitos de águas subterrâneas eram limitados e ligados aos oceanos. Os rios seriam alimentados e mantidos por estes depósitos. Mais tarde, Aristóteles (384-322 a. C.) iniciava outra linha de pensamento que perduraria até ao século XVII: a água dos rios resultaria da transformação do «ar húmido» em água (condensação) em grandes cavernas arrefecidas e a precipitação contribuiria apenas com «uma fracção irrisória» para as águas dos rios.

Se é certo que Aristóteles na *Meteorologia* descreveu o fenómeno da evaporação, atribuindo-o, correctamente, à radiação solar, já a sua concepção sobre a condensação subterrânea do vapor de água constituiu uma barreira intelectual que durante 2000 anos impediu o desenvolvimento do conceito do ciclo hidrológico e a compreensão da sua dinâmica.

A civilização romana, mais pragmática e menos especulativa do que a grega desenvolveu uma actividade intensíssima na engenharia hidráulica, que levou à construção de pontes, de diques e de aquedutos, que ainda hoje perduram. E, assim, Lucrécio (século I a. C.), que desconhecia a concepção aristotélica, aceitava que eram os fenómenos da evaporação que conduziam à formação de nuvens que, por sua vez, originariam a precipitação. Marco Vitruvio (século I a. C.) abandonou o conceito da condensação subterrânea, afirmando que as montanhas, ao receberem chuva e neve, facilitariam as torrentes à superfície e que a percolação e a infiltração iriam provocar a acumulação de água, quer à superfície quer nos estratos dos vales. Seriam estes depósitos que depois originariam as fontes e alimentariam os rios.

Se exceptuarmos a origem das fontes, vemos que na concepção romana se dispunha de todos os elementos que poderiam conduzir à ideia de continuidade da circulação de água e, portanto, ao conceito de ciclo hidrológico.

b) A Hidrologia nas Idades Média e Moderna

Com a invasão dos bárbaros, no século V, a cultura romana no Ocidente foi profundamente afectada e quase desapareceu. Depois, durante a Idade Média, poucos ou nenhuns progressos se fizeram, porque passou novamente a dominar a concepção aristotélica da condensação subterrânea. Houve que esperar até à Renascença para banir as ideias de Aristóteles. Leonardo da Vinci (1452-1519), ainda que mais preocupado com a hidráulica do que com a hidrologia, ocupou-se extensivamente da «natureza da água». Adoptou a teoria da infiltração de Vitruvio e por entre ideias, às vezes, um tanto confusas começou a estabelecer pela primeira vez a ligação entre os vários fenómenos que resultam da presença da água na Terra e a admitir o conceito de continuidade da fenomenologia da água e quase estabeleceu o conceito de ciclo hidrológico. «No decurso de um ano a quantidade de água que sobe na atmosfera é tão grande como a que desce nos rios», dizia da Vinci.

Em França, Barnard Palissy (1509-1589) introduziu alguns aperfeiçoamentos e em 1580 publicou um livro em que afirma que as fontes são alimentadas exclusivamente pelas águas da precipitação. Apresentou uma interpretação correcta dos poços artesianos. Até esta data, todas as teorias eram baseadas na falsa hipótese de que a precipitação não era suficiente para alimentar os rios e de que o solo era consistente demais e impermeável à penetração da água e à sua armazenagem subterrânea.

No entanto, a grande viragem na Hidrologia verificou-se no século XVII com a invenção e a divulgação do barómetro, do higrómetro, do udómetro e do termómetro. Estes progressos da Meteorologia tiveram repercussões imediatas na Hidrologia. O grão-duque Fernando da Toscânia estabeleceu, por sugestão de Galileu, cerca de 1654, a primeira rede meteorológica e hidrológica do mundo. Surgiu, assim, o aparecimento da Hidrologia em base verdadeiramente científica, construída sobre os resultados das observações e determinações quantitativas.

Foi Pierre Perrault (1611-1680), que com a sua obra *De l'Origine des Fontaines*, publicada em 1674, rompeu definitivamente com as ideias tradicionais aristotélicas, ainda dominantes. Reconheceu que a variação do caudal do rio Sena, na Borgonha, provinha da água precipitada a montante e notou que a quantidade de água

caída na bacia inferior do Sena excedia, em muito, o seu caudal. Deitou definitivamente por terra a ideia secular, e firmemente aceite, de que a precipitação não podia explicar o escoamento dos rios, nem o aparecimento de nascentes e de fontes. Perrault notou o desaparecimento dos cursos de água em regiões cársticas e observou que a subida do manto friático de Paris estava associada ao aumento do nível das águas do Sena. Daqui inferiu que as águas do rio se infiltravam nas camadas sedimentares da planura de Paris. É, no entanto, verdade que Perrault não deu importância à evaporação, como fonte para a formação do vapor de água na atmosfera.

Foi Edmund Halley (1656-1742) que em Inglaterra estimou, pela primeira vez, a evaporação e que mostrou que a evaporação dos oceanos era a fonte do vapor de água que alimentava a precipitação nos continentes. Halley chegou a estimar a evaporação total do mar Mediterrâneo e concluiu que a evaporação diária era três vezes superior ao volume das águas lançado pelos rios que nele desaguardam. Fez mesmo determinações dos vários elementos hidrológicos, segundo um esquema que hoje designariamos por «balanço hídrico» do Tamisa. Edmé Mariotte (1620-1684) com a publicação em 1686 do *Traité du Mouvement des Eaux et d'Autres Corps Fluids* prosseguia em França com ideias semelhantes.

Perrault partia já do vapor de água existente na atmosfera, enquanto que Halley descobriu que a principal fonte do vapor de água na atmosfera resultava da evaporação da água dos oceanos. Ainda que ambos pusessem em evidência o conceito da circulação da água, só dispunham de medições rudimentares, insuficientes para estabelecer, definitivamente, o conceito de ciclo hidrológico. Teria que decorrer ainda mais de um século até à clarificação e ao estabelecimento deste conceito.

c) *A Hidrologia nos séculos XVIII e XIX*

Entretanto, Lavoisier (1743-1794) provava que a água era uma substância simples. Era uma substância composta proveniente da combinação do oxigénio com o hidrogénio, fazendo ruir o mito helénico da água, como um dos elementos fundamentais do Universo. Por outro lado, John Dalton mostrou que a água, depois da evaporação, continuava a manter a sua identidade química. Além disso,

acentuava que a evaporação das superfícies terrestres devia ser inferior à precipitação, porque se não «não poderia haver rios». Com estas ideias apresentou vários balanços de água para o País de Gales.

No que se refere às águas subterrâneas, o desenvolvimento da Hidrologia só foi possível depois da transformação da Geologia numa verdadeira disciplina científica. Foi o que se começou a verificar no século XIX na Europa e que, mais tarde, se estendeu rapidamente aos Estados Unidos. William Smith (1769-1839) em Inglaterra estabelecia os fundamentos da Geologia Estratigráfica e Estrutural. Reconheceu, imediatamente, que a estrutura geológica duma região constituía como que uma espécie de «canalização subterrânea material», essencial para compreender o comportamento do movimento global da água.

Os trabalhos de Smith, designadamente a publicação da sua carta geológica (1799) e os seus trabalhos topográficos, representaram uma inovação decisiva para o estudo das águas subterrâneas e confirmaram as suas teorias sobre a origem das nascentes e das fontes.

Em França, o Abade Parmelle (1790-1875) estudou a hidrogeologia das formações rochosas e dos calcários, com grande sucesso, para a exploração de águas subterrâneas. O seu livro *Art de Découvrir les sources*, publicado em 1856, constituiu um marco decisivo para o estudo da hidrologia das águas subterrâneas.

Devemos ainda referir os trabalhos do húngaro Pal Vasarhelyi (1795-1846) que levaram ao estudo hidrológico do rio Danúbio e à possibilidade da regularização do rio Tisza.

Parece quase inacreditável que a natureza do ciclo evaporação-condensação-precipitação-percolação-escoamento-deposição-evaporação não viesse a ser estabelecida senão já em pleno século XIX. Devemos, no entanto, aceitar que o século XVIII trouxe numerosos avanços para a teoria da Hidráulica e para a instrumentação. Entre alguns exemplos mencionaremos o priézómetro de Bernoulli, o tubo de Pitot, o teorema de Bernoulli, a fórmula de Chézi.

Durante o século XIX a hidrologia experimental continuou a crescer. Fizeram-se avanços significativos na hidrologia subterrânea e na medição das águas superficiais. Devemos referir os trabalhos de Poiseuille sobre a capilaridade, a equação de Darcy para o escoamento em meios porosos e o estabelecimento da fórmula de Dupuit-Thiem referente ao «efeito de poço».

1.2. A Hidrologia em Portugal

E em Portugal, qual foi a evolução da Hidrologia?

Pode dizer-se que, além de alguns registos de conventos, de crónicas e algumas obras de protecção dos rios, a Hidrologia em Portugal começou a desenvolver-se nos fins do século XVIII e começos do século XIX, graças à acção da Academia das Ciências de Lisboa. Posteriormente, com a fundação do Observatório Meteorológico Infante D. Luís (1853), que estabeleceu uma rede nacional de observações meteorológicas e hidrológicas, e com a fundação do Ministério das Obras Públicas (1852) a Hidrologia fez grandes progressos.

Ficaram célebres as descrições das inundações da Baixa de Lisboa feitas por Fernão Lopes e descritas na *Crónica de El-Rei D. João I de Boa Memória*. Assim, ao referir-se às cheias de 24-25 de Outubro de 1384 escreve: «Onde sabeis que estas foram as mores águas que os homens nunca viram nem ouviram falar; e duraram até cerca da manhã, indo-se pouco a pouco como começaram. Ca sua bstança foi tanta que, não cabendo pelos canos de serventia da cidade per hu tem costume de se livrar quando chove [...] e todo o Rossio era um grande mar, anagando muitas casas derredor dele; e nadavam os toneis de vinho na Rua das Esteiras e pela Rua Nova. E nadou uma galé na taracena, e outras muitas cousas que pareciam impossíveis de crer.»

Pero Roiz Soares no seu *Memorial* dá-nos a descrição de cheias excepcionalmente intensas que ocorreram em Lisboa, em Maio de 1573 e em Outubro de 1595 «casos verdadeiros [...] porque todos foram vistos pelos olhos de quem os escreveu», «[...] foy tam espantossa chea (10 de Março 1573) que chegou o mar a cobrir toda a Rua da Misericordia que podia nadar por elle grandes barcas e chegou ao auer do pezo onde também podiam nadar barcas e por todo o Reino foi o mesmo durando este tempestuoso tempo até 12 de Mayo de 1573».

Frei Luiz de Sousa, na *História de S. Domingos*, faz referência a quatro inundações da Baixa Lisboeta. Focamos a transcrição de uma das descrições: «...nos primeiros annos antes de haver edificios à roda, todas as agoas corriam o monte, e campo de Santa Anna, e do grande valle, que ainda hoje se chama de Mouraria». «[...] Assi devia ser em huma famosa chea, de que faz menção o livro de Candelas da Sé, que deu muita perda na cidade, e foi em 4 de Janeiro

de 1343. No de 1384 em 24 de Outubro forão as agoas tão crescidas, tão arrebatadas, e impetuosas. Em semelhante aperto se acharão muitos annos adiante no de 1488, huma Terça-feira 16 de Setembro. E foi maior o perigo, porque veio o diluvio repentinamente, e em tempo que ainda se não temia, nem esperavão agoas». «De todos os Reis, em cujo tempo succederão estas cheas, o primeiro que se doeu dos que padecião os tormentos e medos d'ellas foi el Rei dom Manoel...».

A defesa contra as cheias dos grandes rios portuguezes foi uma preocupação dominante desde os primórdios do Reino. Merecem referência especial as defesas constituídas ao longo do vale do Tejo e do vale do Baixo Mondego.

Em Portugal, verificaram-se também secas prolongadas, que ficaram na tradição e de que se fez eco Bernardim Ribeiro que, na *Écloga de Jano e Franco*, diz:

*«Quando as formas grandes foram
que Alentejo foi perdido*

.....

*Levam pouco de gado
que lhe ficou doutro muito
que lhe morreu de cansado
que Alentejo era enxuito
de água, e mui seco de prado*

.....

ver Alentejo, era dó.»

O problema das secas deve enquadrar-se em anomalias da circulação geral da atmosfera, a que correspondem flutuações do clima numa escala local, ou regional.

As secas de Nordeste do Brasil constituíram, logo depois da descoberta do Brasil, uma das grandes preocupações do governo do Reino. Ficaram célebres as providências determinantes por El-Rei D. João V e depois por D. José para combater os efeitos das secas no Nordeste Brasileiro. Também devemos referir as provisões toma-

das pelo marquês de Pombal para mitigar a fome nas ilhas de Cabo Verde, periodicamente flageladas pelas secas.

Em Portugal foi notável o papel desempenhado pela Academia das Ciências, em todos os domínios das Ciências Geofísicas incentivando e publicando os resultados das observações de Hidrologia.

*
* *

A Hidrologia, a partir do século XVIII, passou a ser encarada como uma disciplina científica. Em Portugal, ficaram célebres os trabalhos de Carlos Ribeiro (1859) sobre a «*Hidrologia das vizinhanças de Lisboa*», e o «*Estudo da chuva em Lisboa*» (1859) pelo Dr. Joaquim António da Silva, apresentados à Academia das Ciências (*Memórias, Nova Série*, Tomo II, Parte 1.^a, 1857).

Devemos referir além dos trabalhos preventivos das cheias do Tejo os estudos realizados no século XIX, o estudo hidrográfico do rio Mondego, efectuado pelo capitão do Estado Maior J. Cecílio da Costa. Apresenta pela primeira vez em Portugal curvas de vazão, curvas cronológicas do caudal médio diário e valores do módulo anual e plurianual numa secção (Coimbra). Fazem-se ainda considerações sobre o ano hidrológico e sobre o coeficiente de escoamento. Pelo seu merecimento, junta-se uma lista das obras de hidrologia e de hidráulica do Padre Estêvão Dias Cabral, publicadas pela Academia das Ciências de Lisboa e que nos foi fornecida pelo Prof. António Carvalho Quintela do Instituto Superior Técnico (Lisboa).

- *Tractado de Agrimensura, na qual se propõe o preciso para um medidor de campos*. Publicada de ordem da Academia Real das Ciências, Lisboa, na Typ. da mesma Academia, 1795, 8.º.
- Publicação nas *Memórias Económicas da Academia Real das Sciencias de Lisboa* (1789-1815, 4.º, 5 vol.):
 - a) *Memoria sobre o paul de Ota, suas causas e seu remedio*; t. II (1790), pp. 144-154.
 - b) *Memoria sobre os damnos causados pelo Tejo nas suas ribanceiras*; *ibid*; pp. 155-197.

- c) *Memoria sobre os danos de Mondego de Coimbra*; t. III (1791), pp. 205-242.
- d) *Memoria sobre o tanque e torre, no sitio chamado con Lisboa Amoreiras, pertencente às Águas-livres*; ibid., pp. 291-297.
- e) *Memoria sobre o modo de obter e de conservar agua da chuva de optima qualidade*; t. IV (1812), pp. 67-76.

2. POSIÇÃO ACTUAL DA HIDROLOGIA COMO CIÊNCIA

Só em meados do século XIX é que a Hidrologia ultrapassou as fases descritiva e de sistematização e passou à fase quantitativa, com o enunciado de algumas das leis que regem os fenómenos hidrológicos. Este progresso está associado à instalação generalizada de observatórios meteorológicos, ao estabelecimento de redes de observações, à normalização dos métodos de observação e à unificação dos processos de trabalho e de apuramento, que se consolidaram com a criação de serviços de Estado e com o estabelecimento de redes de estações meteorológicas, climatológicas e hidrológicas. Começou a substituir-se o empiricismo pela análise racional.

A partir de 1930 começou a surgir a «primeira idade de ouro» da hidrologia, devido principalmente ao impulso da escola americana, em que sobressairam os trabalhos de L. K. Sherman com o hidrógrafo unitário, de R. E. Horton com a teoria da infiltração e de Theis. Iniciou-se a formulação de uma doutrina coerente da Hidrologia, que a individualizou com ciência e como técnica, emancipando-a de outras disciplinas de que era apenas subsidiária. Na fase actual pode aceitar-se a existência dum corpo de doutrina coerente que permite interpretar os fenómenos hidrológicos e prever a sua ocorrência. Hoje, a Hidrologia é uma das grandes disciplinas das Ciências Geofísicas.

Ainda que a Hidrologia tenha um carácter eminentemente interdisciplinar, torna-se indispensável formular um núcleo de doutrina que sirva de base à análise da problemática da água nos seus múltiplos aspectos. É sobre esta base científica que devem assentar

todas as formas da técnica utilizadas nos estudos da água e nas aplicações tecnológicas.

O desenvolvimento científico da Hidrologia foi muito incentivado pelo programa do «Decénio Hidrológico Internacional» (DHI) iniciado em 1965, patrocinado pela UNESCO. O Decénio Hidrológico Internacional (1965-1974) constitui um grande programa de cooperação internacional, com a participação de todos os países do mundo e foi decisivo para o progresso da Hidrologia como ciência. Espera-se que venha mesmo a originar uma «segunda idade de ouro da Hidrologia» e que os novos conhecimentos possam contribuir para a solução racional dos problemas dos recursos em água.

Ficou definitivamente provada a conexão quantitativa dos ramos aéreo e terrestre do ciclo hidrológico. Estudos sobre o transporte de vapor de água na atmosfera e a determinação da sua divergência vieram abrir novas vias à Hidrologia, como Ciência.

A aplicação dos métodos estatísticos tem permitido um progresso substancial no tratamento de dados hidrológicos, assegurando um maior nível de confiança nas aplicações.

A Hidrologia, como ciência, assenta nos princípios e nas leis da Física. Entre estas destacamos:

- a) o princípio da conservação da massa, que se traduz pela equação da continuidade; esta conduz à equação clássica e à equação generalizada da Hidrologia;
- b) o princípio da conservação da energia, que se manifesta pela invariância da soma das várias formas da energia que surge na fenomenologia do ciclo hidrológico;
- c) as leis da termodinâmica que envolvem as transições de fase da água, designadamente no par evaporação-condensação, nos mecanismos de nucleação, no desenvolvimento da precipitação;
- d) as leis da hidrodinâmica que regem o movimento da substância água nas suas fases, designadamente o escoamento e a infiltração da água líquida; o movimento dos glaciares e, sobretudo, o fluxo do vapor de água na atmosfera.

Estes princípios e estas leis ajudam a compreender e a explicar os mecanismos e os processos físicos que estão consubstanciados no conceito unificador da Hidrologia, que é o ciclo hidrológico. É um

conceito global integrador das disponibilidades e da circulação da água no ambiente.

Na década de 70, Manabe e colaboradores da Universidade de Princeton conseguiram incluir nos modelos da circulação geral da atmosfera o ciclo hidrológico. Obtiveram resultados espectaculares. A partir daí a simulação matemática tem sido largamente utilizada em Hidrologia, recorrendo a modelos aplicáveis a áreas limitadas, ou a modelos regionais, ou mesmo a modelos à escala planetária. Ultimamente começaram a aparecer estudos da simulação da dinâmica da criosfera.

Devemos ainda referir as reconstituições do clima, em épocas glaciares, feitas por simulação matemática. Estas reconstituições dão-nos uma ideia da distribuição dos gelos nos continentes, da altura das águas dos oceanos, e da geografia costeira com a possível hidrografia dos continentes.

Podemos dizer que a ciência da Hidrologia tem, hoje, à sua mão, homens, talento, leis, modelos, instrumentação e maquinaria que a põem ao nível das ciências irmãs da grande família das Ciências Geofísicas.

CAPÍTULO III

O CICLO HIDROLÓGICO

1. O CONCEITO DE CICLO HIDROLÓGICO

1.1. Aspectos gerais. Elementos e factores do ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é uma sequência fechada de fenómenos naturais em que o globo cede à atmosfera água no estado de vapor, que posteriormente é devolvida no estado líquido ou sólido ao globo, onde é parcialmente retida na superfície, infiltrando-se no solo e escoando-se, e donde passa novamente para a atmosfera no estado de vapor, fechando-se assim o ciclo. O ciclo hidrológico é formado por dois ramos distintos o *ramo atmosférico* no qual predomina o fluxo de água no estado de vapor e o *ramo terrestre* em que o fluxo é principalmente na fase líquida e também na fase sólida (glaciares, etc.).

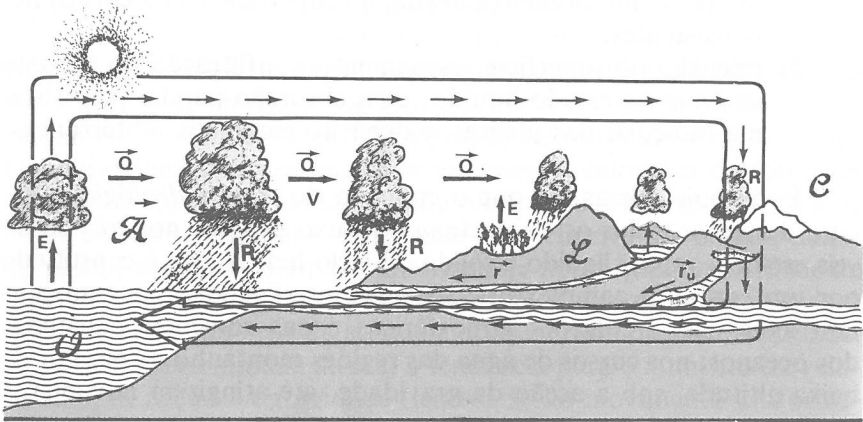


Fig. 2 — O ciclo hidrológico com os ramos atmosférico e terrestre.

No entanto, o estudo da circulação da água não deve ser separado em dois ramos, já que o ciclo hidrológico deve ser considerado na sua totalidade, pois a água que se evapora num dado local não é necessariamente a que precipita no mesmo local. Na realidade, o vapor de água necessário para alimentar a precipitação, num certo ponto, pode ter sido transportado pelas circulações atmosféricas, de regiões distantes onde se formou, por evaporação.

Os fenómenos físicos que constituem o ciclo hidrológico são os seguintes:

- 1) transferência de água na fase vapor do globo para a atmosfera, por evaporação da água que existe no estado líquido ou sólido, nos mares, lagos, rios, geleiras, campos de neve, e por evaporação da água nos solos ou através da transpiração das plantas;
- 2) condensação parcial do vapor de água da atmosfera em partículas líquidas e sólidas que ficam em suspensão no ar, em estado coloidal, formando aerossóis, que constituem as nuvens e o nevoeiro;
- 3) transporte de água nas fases vapor, sólida ou líquida (nuvens), pelas circulações locais ou regionais dos ventos e pela circulação geral da atmosfera;
- 4) transferência de água nas fases líquida e sólida da atmosfera para o globo por precipitação e por deposição de hidrometeoros, como orvalho e geada, na superfície e nos corpos nela existentes;
- 5) retenção na superfície, escoamento e infiltração no subsolo da água no estado líquido, com absorção parcial pelo sistema radicular das plantas, e depósito em águas subterrâneas.

Pode pois afirmar-se que o conceito do *ciclo hidrológico* procura descrever todos os «trajectos» do fluxo de água nos três possíveis estados: vapor, líquido e sólido. O ciclo hidrológico é constituído por um conjunto complexo de sistemas interligados, que transportam água nas circulações atmosféricas e nas correntes marítimas dos oceanos; nos cursos de água das regiões montanhosas para os de baixa altitude, sob a acção da gravidade, até atingirem novamente os oceanos.

Chamaremos *elementos hidrológicos* às grandezas físicas que

descrevem o ciclo hidrológico. Entre estes teremos: a evaporação, a precipitação, o escoamento, o fluxo aéreo, a água precipitável, etc.

As causas que geram, mantêm e modelam o ciclo hidrológico chamamos *factores hidrológicos*. Entre estes mencionaremos a radiação e todas as formas de energia que actuam no ciclo hidrológico: a estrutura e a dinâmica da atmosfera, a circulação geral, a natureza dos solos, a forma do relevo e a cobertura vegetal.

1.2. As formas de energia que mantêm o ciclo hidrológico

A água resultante da precipitação (chuva, neve), que cai nos continentes e nos oceanos, possui energia potencial, que é proporcional à altitude da célula geradora da precipitação na nuvem. A energia necessária para elevar o vapor de água, que é menos denso que o ar, do nível do mar, onde é gerado, para níveis mais elevados, requer uma fonte que vem fundamentalmente da radiação solar.

Devemos ainda considerar: a energia termodinâmica associada às transições de fase da água, começando pelo calor latente de evaporação, e as circulações atmosféricas que transportam o vapor de água dos oceanos para os continentes. Eventualmente, o vapor de água condensa-se, libertando-se o calor latente de evaporação que é cedido à atmosfera, quando se verifica a condensação para formar as nuvens. A quantidade de calor assim libertado na atmosfera é igual àquela que foi consumida na superfície do globo para a evaporação. Por sua vez, esta provém da radiação solar absorvida pelos continentes e pelos oceanos. A queda de água, devido à precipitação sob a forma de chuva, neve, granizo, etc. transforma a energia potencial em energia cinética. Uma grande parte desta energia cinética é «degradada» transformando-se em energia calorífica devido à resistência do ar. Eventualmente uma parte é dissipada sob a forma de radiação (infravermelha) de «grande comprimento de onda», abandonando, assim, o sistema. É interessante notar que a velocidade da queda das gotas é, praticamente, constante, porque a resistência à queda depende da área de ataque e do quadrado da sua velocidade. A partir de determinada altura, a tendência para o aumento da velocidade por acção da gravidade (lembra-se do movimento uniformemente acelerado em queda livre?) é rebatida pelo aumento rápido da resistência do ar.

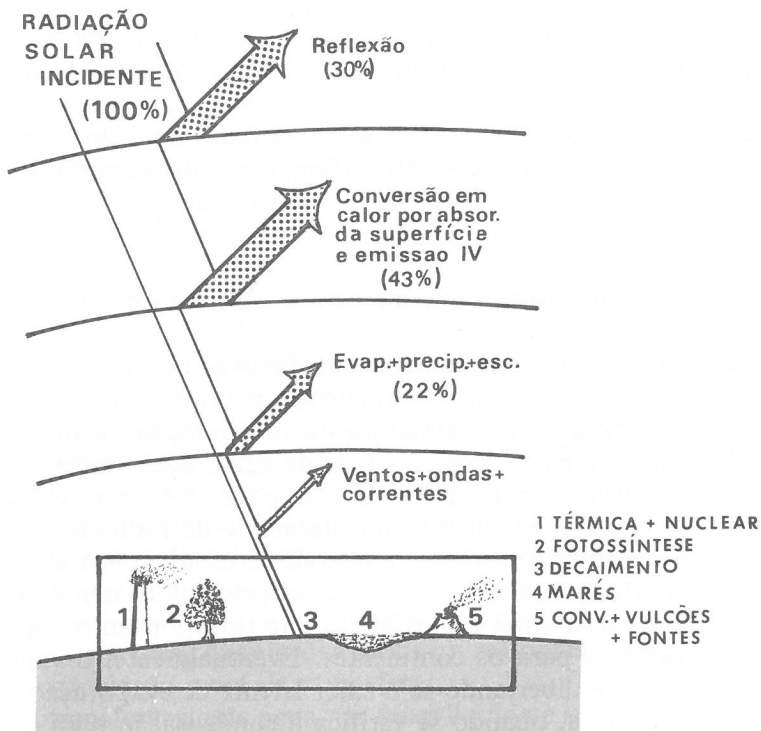


Fig. 3 — A cascata de energia no sistema climático.

Só uma pequena fracção da energia, envolvida no ciclo hidrológico, fica retida no sistema sob a forma de energia potencial, associada à precipitação caída em regiões de altitude superior ao nível médio do mar. A acção da gravidade, além de provocar a queda da precipitação, faz com que a água se esco, quer à superfície do globo, quer em profundidade na água subterrânea, transformando esta energia potencial em energia cinética do caudal de escoamento. Por sua vez, a energia cinética da água em movimento vai-se dissipando por atrito com a superfície mais ou menos rugosa das margens e dos leitos dos rios, e das torrentes com outras massas de água. Há ainda que ter em conta que a água, no seu movimento arrasta consigo materiais e diversas substâncias dissolvidas, dando origem a um trans-

porte sobresselente de massa e uma nova dissipação de energia. A salinidade dos oceanos é, de facto, devida ao depósito das substâncias dissolvidas nos rios, com preponderância de cloreto de sódio.

Os materiais transportados de níveis mais altos para níveis mais baixos transformam a energia potencial em energia cinética, que juntando-se à da corrente de base pode provocar alterações profundas na paisagem e na modelação do relevo. Vejamos o que se passa. A erosão hídrica inicia-se pelo impacte das gotas da precipitação no solo, que desagrega as partículas que constituem as rochas e os solos e as arrasta e dissolve. Podem originar-se, assim, torrentes caudalosas gerando ravinas e destruindo os solos. A acção modeladora dos grandes cursos de água constitui um dos grandes factores de transformação do relevo, cavando vales profundos, transportando materiais, etc.

Todas estas variações e transformações de energia devem ser tomadas em consideração no estudo do balanço energético e do ciclo hidrológico.

2. EVAPORAÇÃO

2.1. O conceito hidrológico e o fenómeno físico

O vapor de água é um dos constituintes minoritários da atmosfera, com uma concentração muito variável, de local para local, de altitude para altitude e de instante para instante. A evaporação lança vapor de água nos níveis inferiores da atmosfera, que depois se difunde através da troposfera por difusão molecular, por mistura turbulenta e por convecção. O vapor de água é depois, em parte, removido da atmosfera pela precipitação que cai sobre a superfície do globo e por condensação directa sob a forma de orvalho, de geada, etc. Mas a precipitação é o mecanismo de remoção mais importante, como havemos de ver.

A conservação da substância água em todo o sistema climático, e em particular na atmosfera, requer, em média, e para todo o sistema, que a evaporação e a precipitação se compensem. Mas, em escala regional ou local, não se verifica esse equilíbrio, porque o vapor

de água libertado numa dada região é depois transportado pelas circulações atmosféricas para outras regiões, onde eventualmente precipitará. Esta pequena observação mostra já a importância que o ramo aéreo do ciclo hidrológico tem para a economia da água e dos recursos hídricos, à superfície do globo.

A evaporação é um dos elementos fundamentais do ciclo hidrológico. Neste contexto a evaporação é a grandeza física que descreve a transferência natural da água das fases líquida e sólida para a fase gasosa e a sua difusão na atmosfera. Essas transições de fase podem dar-se no seio da própria atmosfera, tal como se verifica com a evaporação de gotas de água e a sublimação de cristais de gelo das nuvens. No entanto, a parte mais importante da transferência de água, na natureza, das fases sólida, ou líquida para a fase vapor, ocorre à superfície do globo, através dos oceanos, dos mares interiores, dos lagos, dos rios, dos solos, da transpiração vegetal, etc. É esta evaporação que constitui uma das partes essenciais do ciclo hidrológico, porque transfere e redistribui água e energia da superfície do globo para a atmosfera, que, assim, é abastecida de humidade.

A evaporação, no seu significado hidrológico e meteorológico, é, portanto, uma grandeza física, que descreve e quantifica o fenómeno de transição das fases sólidas e líquida para a fase vapor, em condições naturais. O termo evaporação, assim utilizado, tem um significado mais lato do que é usado em Termodinâmica para designar o fenómeno da mudança da fase líquida ou sólida para a fase vapor. E, assim, para um dado intervalo de tempo, Δt , definimos a grandeza intensidade da evaporação. E , numa região de área A por:

$$E = \frac{1}{A} \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

em que $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ dá a taxa de transferência da quantidade de água m , da superfície evaporante para a atmosfera. Avalia-se em $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$. Para um dado intervalo de tempo, a evaporação total, E_t , é definida pela expressão:

$$E_t = \frac{M}{A}$$

em que M é a quantidade total de água transferida por evaporação,

através da área A no intervalo de tempo considerado. Avalia-se, portanto, em unidades de massa/área (g/cm^2 ; kg/m^2). Notando que, sem grande erro, a densidade absoluta da água líquida é $1 \text{ g}/\text{cm}^3$, a evaporação pode exprimir-se em unidades de comprimento (mm ; cm ; etc.).

A expressão anterior é geral, sendo válida, qualquer que seja a superfície evaporante, independentemente da sua forma e natureza; não assenta em quaisquer hipóteses sobre os mecanismos envolvidos no fenómeno da evaporação. Cada superfície evaporante, pela sua estrutura, pode impor algumas restrições ao movimento interno da água, mas na interface superfície evaporante/atmosfera não há diferenças fundamentais e aplicam-se as mesmas leis físicas, qualquer que seja o tipo de superfície.

Em 1948, Thorntwaite, um climatologista famoso americano, introduziu o conceito de *evapotranspiração*, que é a perda de água por evaporação do solo e por transpiração das plantas. Este conceito foi depois completado com as duas versões seguintes:

- a) *evapotranspiração real* (evaporação) corresponde à perda total de água nas condições reais relacionada com o teor em água do solo e com as características do solo e das plantas; de uma forma geral, depende da superfície evaporante;
- b) *evapotranspiração potencial* é a perda máxima possível de água, quando o solo se encontra amplamente abastecido de água e revestido duma cultura uniforme de pequena altura. Corresponde à «capacidade de campo». O conceito é definido empiricamente e corresponde a um caso ideal da transferência natural de água do solo, completamente abastecido em água (encharcado), para a atmosfera e que se pode tomar como padrão de comparação.

Antes de considerar o problema da determinação da evaporação, vamos apresentar uma imagem qualitativa dos mecanismos do fenómeno físico da evaporação.

A evaporação é mais intensa quando se dá a partir duma superfície livre líquida, ou da superfície dum solo permanentemente abastecido e saturado de água.

À medida que uma molécula de água se escapa da superfície líquida, a sua energia diminui e, como a vaporização é contínua, o

número de moléculas na atmosfera vizinha aumenta, assim como a pressão exercida pelas moléculas que formam o vapor de água. A partir de certa altura, a camada da atmosfera vizinha já não pode conter mais moléculas, estabelecendo-se um equilíbrio entre as que são libertadas da superfície e as que voltam a ser reabsorvidas. Diz-se, então, que a camada da atmosfera está saturada e a tensão do vapor, e , atinge o valor máximo; por isso se chama tensão máxima, a tensão de saturação, e_s .

Como as moléculas não se distribuem uniformemente em altitude, e ficam mais concentradas junto à superfície, estabelece-se um certo gradiente vertical da humidade dado por $\frac{\delta e}{\delta z}$ em que z designa a altitude.

E, por isso, estabelece-se uma corrente de moléculas, por difusão da região de maior concentração, para onde a concentração é menor. Dizemos, então, que se estabelece uma corrente «contra o gradiente». Além disso, há ainda que considerar o transporte de vapor de água, devido à turbulência e à convecção na atmosfera.

Pode assim aceitar-se que a taxa de evaporação E é dada por:

$$E = -K \frac{\delta e}{\delta z}$$

em que K é o coeficiente de transferência.

Para que uma molécula de água se escape da superfície livre líquida, tem de vencer a resistência oferecida pelas ligações às outras moléculas vizinhas, como as forças de tensão superficial e outras. A partir da quantidade de energia consumida, pode avaliar-se a quantidade de água que se evaporou num certo intervalo de tempo. A quantidade de calor absorvido pela unidade de massa de água para passar à fase vapor, mantendo a temperatura constante, chama-se *calor latente* de vaporização L_e (cal g^{-1}). Por isso, para evaporar a quantidade E de água são necessárias $L_e E$ calorias.

2.2. A medição da evaporação

Como vimos, a evaporação, num dado intervalo de tempo, é a grandeza definida por $E = M/A$ expressa em gramas/cm² ou gramas/m². Mas é mais usual, avaliá-la pela expressão $E = V/A$,

sendo V o volume de água no estado líquido, que se evaporou de um recipiente aberto e exposto ao ar, de boca horizontal de área A . O seu valor pode exprimir-se, como é hábito, em milímetros. Um milímetro de evaporação representa a evaporação de um litro de água por metro quadrado.

Pode medir-se usando os *evaporímetros*. Mas a medição da evaporação é muito imperfeita e os valores com instrumentos de tipos diferentes não são comparáveis. As dificuldades aumentam quando se quer medir a evapotranspiração, por causa das características especiais e complexas das superfícies evaporantes.

Não quer dizer que não se obtenham valores numéricos com o rigor desejado. Os valores é que não são representativos da grandeza que se quer avaliar. Por isso, devemos recorrer a processos de determinação indirecta, baseados em conceitos que identificam o fenómeno da evaporação e nos mecanismos físicos que o explicam. É, portanto, recomendável que analisemos os factores da evaporação.

Em geral, a evaporação tem uma variação anual acentuada, com um máximo no Verão, e um mínimo no Inverno, porque às temperaturas mais elevadas correspondem maiores valores do défice de saturação. Logo, a evaporação é maior nas regiões mais quentes e baixas, do que nas regiões mais frias e altas.

Para que se dê a evaporação, são necessários dois factores essenciais, a saber:

- 1) uma força impulsionadora, que ajude a difundir e a remover as moléculas de água, que se vão libertando para a atmosfera;
- 2) uma fonte de energia que fomente a transição das moléculas de água das fases líquida ou sólida, para a fase vapor.

Por sua vez, a força impulsionadora resulta da acção de dois factores que são:

- a) a diferença das tensões do vapor de água (e_s, e) às temperaturas da superfície evaporante e do ar livre;
- b) a velocidade \bar{v} do vento na camada limite da atmosfera.

A radiação solar absorvida constitui a principal fonte de energia para fomentar e manter a evaporação. Os dois factores referidos

são muito poderosos nas regiões áridas subtropicais, principalmente depois duma chuvada, porque o ar está relativamente seco e o solo muito húmido. Por isso, a parte da água precipitada pode evaporar-se antes de ter a oportunidade de se escoar. Nas regiões mais húmidas a diferença das tensões do vapor é muito menos acentuada, e a evaporação é menor donde resulta um escoamento muito mais intenso.

Mas, a radiação solar, factor essencial de toda a energética do globo, é responsável por muitas das propriedades termo-hidrodinâmicas do globo e da atmosfera. E estas propriedades passam a ser factores secundários da evaporação. Podemos, pois, dizer que a taxa de evaporação da água à superfície depende de muitos e variados factores. Entre estes destacamos:

- a) a temperatura do ar e da água;
- b) a energia de aquecimento que é necessária para a evaporação;
- c) a tensão de vapor e a humidade relativa do ar da camada limite;
- d) a velocidade do vento da camada vizinha que condiciona a remoção e o transporte do vapor de água libertado pela evaporação;
- e) a pressão atmosférica;
- f) a salinidade das águas dos oceanos, porque a salinidade «atrasa» a evaporação em relação à água doce (atraso de 6%, nas mesmas condições meteorológicas);
- g) a extensão da superfície evaporante, porque, se a área de exposição é pequena, as moléculas de água libertadas são removidas mais rapidamente e de forma mais completa.

Como se vê, a quantidade de água evaporada ($E = V/A$) depende do estado higrométrico e da agitação do ar. Foi o que Dalton, a seu tempo, observou e traduziu por uma expressão que tem o seu nome. E assim a lei de Dalton diz que o valor E é dado por

$$E = kv(e_s - e)$$

em que v é a velocidade do vento na camada limite, e_s a tensão do

vapor junto à superfície evaporante, e e a tensão do vapor do ar vizinho acima da superfície; k é um coeficiente empírico.

3. A RADIAÇÃO SOLAR E A EVAPORAÇÃO

3.1. O calor latente de evaporação

A água líquida requer uma grande quantidade de energia para se evaporar. É o que nos mostra a experiência, quer através do arrefecimento associado à transpiração e à rega de ruas, quer através duma chaleira de água que se põe ao lume até ferver. No primeiro caso, a energia para a evaporação é roubada ao meio ambiente vizinho. No segundo caso, a energia é fornecida pelo combustível que se utiliza.

O calor latente de evaporação da água, isto é, a quantidade de calor necessário para evaporar um grama de água líquida à pressão normal — é aproximadamente 540 cal/g. Como se vê, é cerca de 540 vezes a quantidade de calor requerida para elevar de 1°C a temperatura de um grama de água (calor específico). A quantidade de calor para evaporar uma dada quantidade de água é 5,5 vezes maior do que a que seria necessária para elevar a sua temperatura do ponto de congelação (0°C) até ao ponto de ebulição (100°C). Para temperaturas mais baixas, ainda é necessária uma maior quantidade de calor para evaporar a água.

Sabendo a importância que tem a energia no processo da evaporação, não podemos alhear-nos de tratar, mesmo de forma elementar, o problema da energética global do globo e da atmosfera.

3.2. O balanço da energia do Globo

No balanço da energia do globo podemos desprezar o fluxo do calor proveniente do interior da Terra, que só assume valores importantes em regiões limitadas (fontes termais; geysers, etc.) A fonte de energia da Terra fica assim reduzida à radiação solar, porque a energia recebida das estrelas é também muitíssimo pequena.

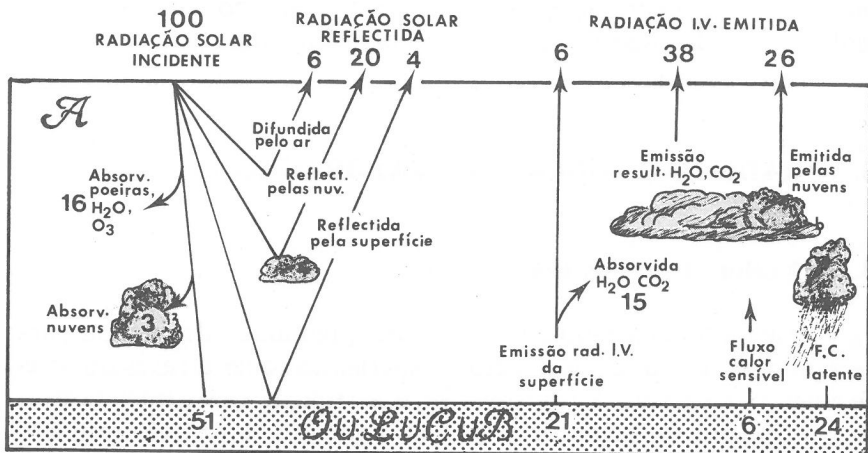


Fig. 4 — Balanços da radiação solar incidente e da radiação terrestre (inf. verm.) emitida pelo Globo e pela atmosfera.

A radiação solar que chega ao topo da atmosfera da Terra é praticamente constante. O valor da constante solar é da ordem de $1,94 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$). A energia total que chega ao topo da atmosfera é, portanto, $\pi a^2 \times 1,94 = 2,47 \times 10^{18} \text{ cal}$ por minuto. Mas distribuiu-se por toda a atmosfera terrestre, cuja área é $4\pi a^2 = 5,1 \times 10^{18} \text{ cm}^2$. Logo, em média, o valor utilizável da radiação solar é $\frac{1,94}{4} = 0,485 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$. Vamos atribuir um valor simbólico de 100 unidades a este valor médio de energia solar incidente. Nem toda esta radiação solar incidente participa da energética da Terra. Uma fracção substancial (30%) é reflectida pelas nuvens (20%); pelo globo (5%) e mais uma fracção que é retrodifundida (5%) pela atmosfera numa forma em tudo análoga à luz do luar reflectida pela Lua. Logo, só 70% da energia solar total incidente no topo da atmosfera é que participa nas máquinas térmicas que são o sistema climático e o ambiente. Da energia solar transmitida, através da atmosfera, 20% são absorvidos pela atmosfera e pelas nuvens e só 50% é que atingem a superfície do globo, onde são absorvidos e transformados em calor. Desta energia, a maior parte (24%) é utilizada na

evaporação da água, que depois vai aquecer a atmosfera, indirectamente. Outra parte menor (6%) é utilizada em aquecer a atmosfera directamente, por contacto e por difusão turbulenta. Os restantes 20% ficam retidos no globo e perder-se-ão por emissão da radiação infravermelha emitida pelo globo para a atmosfera (14%) e para o espaço exterior (6%), como mais adiante veremos.

A quantidade de energia solar recebida pela Terra iguala a quantidade de energia terrestre infravermelha emitida. Vejamos porquê. O clima não está a tornar-se, progressivamente, nem mais quente, nem mais frio. Logo, a energia solar absorvida pelo globo não se vai acumulando, indefinidamente, para ficar armazenada (descontando aquela que fica sob a forma dos combustíveis fósseis, tais como carvão, petróleo). Tem, por isso, que haver um fluxo de energia para o espaço exterior, que mantenha o regime permanente observado na Terra. A condução, a evaporação e a convecção podem transferir energia dum subsistema para o outro, ou mesmo no interior de cada subsistema, mas não podem transferir energia para fora do sistema climático. De facto, é só através da emissão de energia radiante, na banda do infravermelho que a Terra, tomada como um todo, pode perder para o espaço exterior o excesso de energia solar que recebeu. Só deste modo se pode manter o regime de temperaturas, quase estacionário, que se observa há muitos milénios na Terra.

Como sabemos, a natureza e a quantidade de radiação dependem da temperatura do corpo emissor, através das *leis de Wien* e de *Stefan*. A primeira diz que quanto mais elevada for a temperatura, menor será o comprimento de onda da radiação emitida, que corresponde ao máximo do poder emissivo ($\lambda_{\max} T = \text{const.}$). A segunda (de Stefan) diz que a quantidade total de energia é proporcional à quarta potência da temperatura ($E = \sigma T^4$). Ora, todo o objecto cuja temperatura seja superior a 0°K emite energia (princípio de Prévost) — mesmo que seja um bloco de gelo. Por isso, o globo e a atmosfera estão a emitir constantemente energia. No entanto, como as temperaturas do globo e da atmosfera são muito menores ($T = 300^\circ\text{K}$) que as do Sol ($T = 6000^\circ\text{K}$), a quantidade de radiação é diferente (Lei de Stefan) e o comprimento de onda tem valores para além do vermelho, isto é, na região do infravermelho do espectro (Lei de Wien). Ora, acontece que a radiação infravermelha é muito mais absorvida pelo vapor de água e pelo dióxido de carbono da atmosfera do que a radiação solar na banda do visível. Por isso, a atmosfera «húmida» é

muito opaca à radiação terrestre. Mesmo com céu limpo, só 1/10 da radiação terrestre é que é capaz de atravessar a atmosfera e escapar-se para o espaço exterior. Assim, a atmosfera absorve fortemente a radiação infravermelha, donde resulta um aquecimento pela radiação terrestre.

A atmosfera recebe ainda calor da superfície do globo por condução, por convecção e por condensação do vapor de água, evaporando na superfície do globo.

Por outro lado, a atmosfera, como qualquer outro corpo, radia energia em todas as direcções. Uma parte é reenviada para o globo, onde é absorvida, e lhe vai aumentar a temperatura, outra é emitida para o espaço exterior. É por isso que, mesmo só com uma quantidade de vapor de água relativamente pequena, a atmosfera é capaz de interceptar a radiação infravermelha proveniente dos continentes e dos oceanos. Se não fosse a «acção de captura» pelo vapor de água da energia radiante emitida pelo globo e pela atmosfera, a Terra teria uma temperatura mais baixa do que a actual e um clima muito diferente. A acção do vapor de água ameniza o clima e evita as grandes variações de temperatura entre o dia e a noite que, doutra forma, se observariam.

4. A HUMIDADE NA ATMOSFERA E A PRECIPITAÇÃO

4.1. A água na atmosfera

A água na atmosfera existe na fase vapor e nas fases condensadas constituindo as nuvens. Mas a quantidade de água na fase vapor excede muito a água contida nas nuvens.

A atmosfera contém sempre vapor de água em quantidade variável que pode atingir 4% em volume, cuja importância na flunereologia da atmosfera é muito grande. A quantidade máxima de vapor de água, que é enviada para a atmosfera por evaporação e evapotranspiração, depende da temperatura do ar. Como esta diminui em altitude até à tropopausa (11 km), a quantidade de vapor de água nas camadas inferiores é bastante maior que nas camadas superiores.

O estado higrométrico do ar, ou seja a humidade da atmosfera, exprime-se por meio de várias grandezas físicas que são a tensão do vapor de água, o ponto de orvalho, a humidade absoluta, a humidade relativa, a razão de mistura, a humidade específica e o défice de saturação.

Nas condições predominantes na atmosfera (excluindo as transições de fase) o vapor de água comporta-se como um gás ideal e obedece às leis de Charles e de Gay-Lussac.

A pressão parcial exercida pelo vapor de água define a *tensão de vapor*, cujo símbolo, e , vem do latim *elasticitas*. O seu valor exprime-se em unidades de pressão (mb, Pa). A quantidade de vapor que a atmosfera pode reter não é ilimitada. Há um valor máximo que é condicionado pela temperatura da atmosfera. A este valor limite corresponde, portanto, uma *tensão máxima*, e_s , que é o valor de e , quando a atmosfera está saturada, isto é, quando já não tem capacidade para reter mais vapor de água.

A humidade absoluta é a massa de vapor de água que existe na unidade de volume do ar húmido. Avalia-se em gramas por metro cúbico (g/m^3). Se considerarmos que a massa de vapor de água é M no volume V , a humidade absoluta ρ é dada por:

$$\rho a = \frac{M}{V}$$

e pode, ainda, exprimir-se em função da tensão de vapor e e da temperatura T , empregando a equação de estado do vapor de água.

A equação de estado dos gases ideais é, como se sabe, dada por:

$$pV = nRT$$

onde R é a constante universal dos gases ideais, T a temperatura absoluta e n o número moles sentido em V . Este pode calcular-se se conhecermos o valor da molécula grama M :

$$n = \frac{m}{M}$$

Se inserirmos este valor na equação anterior, vem:

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

Por definição $V/m = 1/\rho = v$, em que v é o volume específico (cm^3/g) e ρ a densidade (g/cm^3). Assim a equação de estado reduz-se a:

$$pv = (R/M)T$$

ou

$$p = \rho R'T$$

em que $R' \equiv R/M$ designa a *constante individual* do gás ideal.

A equação de estado para o vapor de água pode, então, escrever-se:

$$e = \rho w (R/M_w)T$$

onde ρw é a densidade do vapor de água ou a humidade absoluta e e é a tensão do vapor.

A razão de mistura, r , é a quantidade de vapor de água que existe misturada com um grama de ar seco. É dada pelo quociente $r = \frac{m_w}{m''}$, sendo m_w a massa do vapor de água que encontra misturado com m_a gramas de ar seco. Exprime-se normalmente em gramas por quilograma (g/kg) e pode calcular-se a partir da expressão

$$r = 0,622 \frac{e}{p}$$

em que $M_w/28,9 = 0,622$ é a densidade relativa do vapor de água em relação ao ar seco.

A humidade específica q é a massa de vapor de água que existe em um grama de ar húmido:

$$q = \frac{m_w}{m_a + m_w} = \frac{q}{1 + r}$$

Substituindo r pela sua expressão anterior vem para a humidade específica:

$$q = 0,622 \frac{e}{p - 0,318e}$$

Na prática, os valores numéricos de q e de r são equivalentes.

A *temperatura do ponto de orvalho* é a temperatura para a qual o ar fica saturado, quando o ar é arrefecido, mantendo a pressão constante e sem juntar, ou subtrair vapor de água.

A *humidade relativa* v é a relação entre a massa de vapor de água actualmente existente e aquela que existiria se a atmosfera estivesse saturada. É fácil ver que v é dada pela relação entre a tensão do vapor e e a tensão máxima e_s :

$$v = \frac{e}{e_s}$$

A *humidade relativa* é um parâmetro muito utilizado na prática e o seu valor varia de 0% a 100% quando a atmosfera é seca ou está completamente saturada.

O *défice de saturação* é uma grandeza que exprime a deficiência do ar em humidade, em relação à evaporação. Exprime-se pela diferença ($e_s - e$). Muitas vezes exprime-se ainda por $(1 - v)$, sendo v a humidade relativa.

4.2. A formação das nuvens

A precipitação constitui o vector fundamental da entrada da água no ramo terrestre do ciclo hidrológico, estabelecendo uma das ligações com o ramo aéreo. A outra ligação, entre os dois ramos, é feita pela evaporação. Dizemos que há precipitação quando qualquer partícula de água sólida ou líquida que cai da atmosfera, em geral de uma nuvem, atinge o solo. Há ainda outros hidrometeoros, isto é, outros produtos da condensação do vapor de água, formados na própria atmosfera, ou na superfície, que se depositam no solo, e que provêm da humidade da atmosfera, sem nuvens, como o orvalho e a geada.

A precipitação tem uma grande variedade de formas. Entre nós, as mais usuais são a chuva, a neve e o granizo. Mas também devemos mencionar a saraiva, a neve rolada e a chuva gelada. A precipitação forma-se a partir do vapor de água da atmosfera, ainda que a sua natureza dependa muito de factores externos e da dinâmica da atmosfera.

O processo da precipitação começa com a formação de nuvens, que são constituídas, além do ar húmido, por gotículas de água e por cristais de gelo, ou por ambos, resultantes da condensação ou da sublimação da água sobre núcleos de condensação ou de sublimação. Os principais núcleos de condensação são constituídos por partículas de fumos, por poeiras e por partículas de sais provenientes dos oceanos. Outras substâncias cristalinas, como sílica e o quartzo, fornecem os núcleos de sublimação, sobre os quais o vapor de água transita directamente para a fase sólida.

Há sempre vapor de água e núcleos de condensação na atmosfera, mesmo nos dias mais claros. Mas para a formação das nuvens tem de se verificar um arrefecimento que leve o ar húmido à saturação e depois à condensação do vapor de água. O arrefecimento, mais eficiente, na atmosfera é produzido pelo movimento vertical do ar, movimento que pode ter origem térmica ou mecânica. À medida que o ar sobe a pressão diminui e dá-se uma expansão, que é adiabática, porque é muito rápida e o ar é mau condutor do calor. Com a expansão adiabática verifica-se um arrefecimento, a temperatura iguala a temperatura do ponto de orvalho, o ar húmido fica saturado, e começa a verificar-se a condensação.

O movimento vertical pode ser devido:

- a) à convecção que se observa quando o solo está muito aquecido;
- b) à subida de ar mais quente ao longo de ar mais frio; ou,
- c) à ascensão ao longo das encostas das montanhas; ou, ainda,
- d) devido à convergência de ar na camada da atmosfera junto ao solo. A convergência, nestas condições, força o ar a subir.

O mecanismo envolvido na ascensão que conduz ao arrefecimento é muitas vezes utilizado para classificar o tipo de precipitação que se observa. Assim, os meteorologistas e os hidrologistas referem-se à precipitação convectiva, à precipitação frontal, à precipitação orográfica ou à precipitação de convergência.

A precipitação de massa de ar é a designação utilizada quando a precipitação resulta da convecção que se observa no interior de massas de ar, devido à existência de instabilidade, ou quando uma massa de ar frio e mais denso penetra e investe contra ar mais quen-

te e mais leve. Estes movimentos convectivos originam nuvens de desenvolvimento vertical como cúmulos e cúmulo-nimbos, cuja precipitação é do tipo aguaceiros.

Devemos ainda acentuar que não há nenhum processo natural que remova completamente toda a humidade da atmosfera. Por isso, a atmosfera está sempre, mais ou menos, húmida. Mesmo nos desertos o ar é húmido, ainda que, neste caso, o teor em vapor de água seja muito pequeno e a humidade relativa muito baixa. Devemos também referir que, embora as nuvens sejam a origem da precipitação, nem todas as nuvens provocam precipitação. Só em determinadas condições é que esta se observa. Para se dar a precipitação é necessário que as gotas de água, ou os cristais de gelo, existentes nas nuvens cresçam até atingirem dimensões suficientemente grandes para caírem, por efeito da gravidade. Este crescimento é feito por coalescência, à custa da junção de várias gotículas, ou por difusão do vapor de água existente na fase dispersante da nuvem. Devemos notar que a precipitação não se pode considerar como um estado limite da condensação do vapor de água nas nuvens. O estado da precipitação é diferente do estado de condensação e não se podem tomar como passos dum mesmo processo de evolução. Para que se observe a precipitação é necessário que intervenham factores externos, susceptíveis de fazer cessar o equilíbrio coloidal, que se verifica numa nuvem de gotas que tendem a ser uniformes.

A coalescência, resultante do choque de umas gotículas com outras, pode conduzir à formação de gotas maiores de precipitação. Outro mecanismo responsável pelo crescimento das gotas é o mecanismo do cristal de gelo (Bergeron, 1932). Para que este mecanismo funcione têm de existir na nuvem as três fases: cristais de gelo, gotas e vapor de água. A tensão máxima do vapor de água em relação ao gelo, para temperaturas abaixo de 0°C , é menor do que em relação à água líquida. Assim, quando um cristal de gelo está em presença de uma gota sobrefundida (líquida abaixo do 0°C), cresce a expensas desta, porque a atmosfera comum está sobressaturada para o cristal de gelo, que cresce, e subsaturada para a gota líquida, que assim se definha. O cristal de gelo cresce e pode atingir as dimensões críticas de queda. Este mecanismo é muitas vezes designado por mecanismo das três fases.

4.3. A natureza das nuvens

Quando o ar fica saturado, o vapor de água condensa e formam-se as nuvens. O tipo de nuvens depende, em grande parte, do processo que conduz à saturação do ar húmido. Vamos, por isso, começar pela classificação das nuvens.

Quanto à natureza as nuvens classificam-se em 4 famílias e 10 géneros, como se mostra no quadro anexo. O critério de classificação baseia-se na altura dominante das bases.

<i>Famílias</i>	<i>Géneros (símbolos)</i>	<i>(símbolos)</i>
Nuvens altas (com base e 6000 m)	{ Cirros Cirro-estratos Cirro-cúmulos	(Ci) (Cs) (Cc)
Nuvens médias (com base a 2000 m)	{ Alto-cúmulos Alto-estratos	(Ac) (As)
Nuvens baixas (nível inferior abaixo de 2000 m)	{ Estrato-cúmulos Estratos Nímbo-estratos	(Sc) (St) (Ns)
Nuvens de desenvol- vimento vertical	{ Cúmulos Cúmulos-nimbos	(Cu) (Cb)

Os *cirros* são nuvens constituídas por cristais de gelo, com textura fibrosa e delicada. Os *cirro-estratos* são constituídos por cristais de gelo e têm uma cor esbranquiçada e quando se formam em frente do Sol originam os *halos*, que são constituídos por anéis luminosos em volta do Sol com aberturas de 22° e de 46°. Os *cirro-cúmulos* são constituídos por cristais de gelo e têm a forma de flocos ou de novelos esbranquiçados e sem sombras.

Os *alto-estratos* são constituídos por cristais de gelo e, às vezes, com gotículas de água e formam um véu fibroso, mais espesso e acinzentado que os *cirro-estratos*. Os *alto-cúmulos* têm formas globulares e são constituídos por cristais de gelo e gotículas de água sobrefundida.

Os *estrato-cúmulos* têm uma forma de rolos, ou de massas arre-

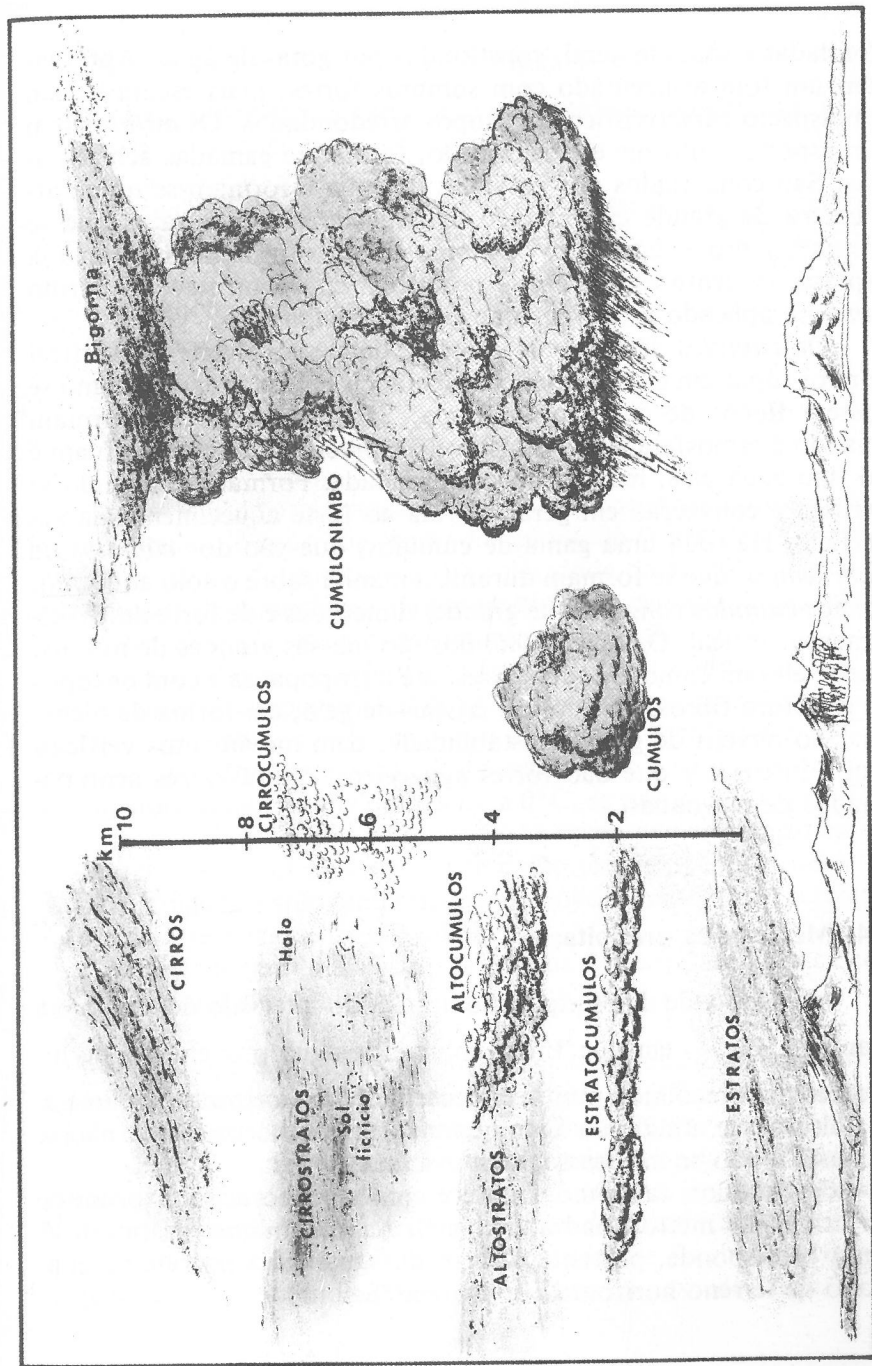


Fig. 5 — Formas e tipos de nuvens.

dondadas e são, em geral, constituídos por gotas de água. Apresentam um tom acinzentado com sombras fortes, mais escuras. Têm um aspecto característico com topos arredondados. Os *estratos* têm um aspecto uniforme e estratificado, formando camadas acinzentadas. São constituídos por gotículas de água e formam-se numa atmosfera de grande estabilidade. Os *nevoeiros* são estratos que se formam junto à superfície. Os *nimbo-estratos* formam uma camada espessa, cinzenta escura e que produzem chuva ou neve. O termo *nimbo* é aplicado às nuvens que geram precipitação.

Os *cúmulos* são nuvens grossas, de desenvolvimento vertical com os topos em cúpula com protuberâncias arredondadas, como se fossem flocos de algodão em rama. São nuvens que se formam quando a atmosfera é muito instável. A precipitação que originam é do tipo aguaceiro, mas de fraca intensidade. Formam-se quando se verifica a convecção em geral, devida ao forte aquecimento da superfície. Há toda uma gama de *cúmulos*, que vão dos *cúmulos de bom tempo*, que se formam durante a manhã sobre o solo aquecido, até aos *cúmulos congestos* de grandes dimensões e de forte desenvolvimento vertical. Os *cúmulos-nimbos* são massas grandes de nuvens, que se elevam como grandes torres, até à tropopausa e com os topos de estrutura fibrosa devido aos cristais de gelo, em forma de bigorna. São nuvens de grande instabilidade, com movimentos verticais muito intensos e que dão fortes aguaceiros, muitas vezes acompanhados de trovoadas.

4.4. Medição da precipitação

A quantidade de precipitação num dado intervalo de tempo é a grandeza $R = \frac{V}{s}$ em que V é o volume de água proveniente de hidrometeoros recolhida num recipiente de boca horizontal de área s . E é a altura que atingiria a água numa superfície horizontal se não se escoasse e não se infiltrasse, nem evaporasse.

O seu valor, tal como acontece com a evaporação, exprime-se em litros por metro quadrado (l/m^2), ou em milímetros (mm). A 1 mm corresponde, portanto, 1 litro de água caída por metro quadrado de terreno horizontal, ou a $10 m^3/ha$.

A intensidade da precipitação avalia-se pela reacção $R = \frac{\Delta R}{\Delta t}$, isto é, pelo quociente da variação da quantidade da precipitação ΔR pelo intervalo de tempo Δt em que caiu. Exprime-se usualmente em mm/hora, ou em mm/min.

A medição da quantidade de precipitação faz-se com udómetros ou pluviómetros que são, fundamentalmente, recipientes cilíndricos de boca horizontal. Se os instrumentos têm um dispositivo de registo chamam-se udógrafos.

4.5. As formas de precipitação

As formas de precipitação observadas dependem das dimensões das partículas de água que caem, do seu estado físico, das condições genéticas da sua formação, da sua velocidade de queda, do grau de estabilidade da atmosfera e da temperatura da camada de ar, que as partículas vão atravessar, até atingirem a superfície.

A precipitação formada pelo processo das três fases é, inicialmente, constituída por cristais de gelo. Quando a temperatura da camada de ar, que a precipitação vai atravessar, é inferior a 0°C , a precipitação permanece sólida e deposita-se sob a forma de neve. Se a temperatura da camada é superior a 0°C , as partículas de gelo fundem, formando as gotas de chuva. Só se exceptuam o granizo e a saraiva que caem muito rapidamente e não têm tempo para derreter. Assim, atingem o solo ainda no estado sólido, mesmo que a temperatura seja relativamente elevada.

Entre as formas mais normais em que a precipitação pode ocorrer destacamos as seguintes:

- *Chuvisco* é uma precipitação, bastante uniforme, de gotas de água muito numerosas, de diâmetros inferiores a 0,5 mm, que caem com velocidades muito pequenas, parecendo flutuar no ar.

O chuvisco provém duma camada baixa, contínua e densa de estratos, que pode chegar ao solo dando nevoeiro. Em geral, as gotinhas do chuvisco resultam de processos de acreação em nuvens quentes. A quantidade de precipitação resultante do chuvisco é muito pequena, acumulando-se a uma taxa que não excede 1 mm/hora.

É uma forma de precipitação que só ocorre em condições de estabilidade da atmosfera.

- *Chuva* é uma precipitação de gotas de água no estado líquido, de diâmetro superior a 0,5 mm e que cai com uma velocidade superior a 3 m/s. Há um limite natural das dimensões máximas das gotas de chuva.

Assim, gotas com mais de 5 mm de diâmetro são instáveis e fragmentam-se em novas gotas quando caem. A velocidade terminal das gotas com 5 mm é da ordem de 9 m/s. A chuva contínua e intensa está, em geral, associada com superfície frontais quentes ou com depressões e provêm dos nimbo-estratos, dos alto-estratos e dos cúmulos-congestos.

Em relação à intensidade, a precipitação pode ser fraca se é da ordem de 0,5 mm/hora, moderada se não exceder 4 mm/h e forte se ultrapassa 4 mm/h.

A chuva é, em regra, desencadeada pelo processo das três fases (Mecanismo de Bergeron).

- *Neve* é uma precipitação de água no estado sólido, principalmente com a forma de cristais de gelo, opaco, ou, semiopaco, hexagonais, ramificados, estrelados, ou dendríticos. Quando a temperatura é superior a -10°C os cristais agregam-se em flocos, que podem atingir alguns centímetros.

Os cristais de neve são muito leves e, por isso, caem com velocidades da ordem de 1 m/s. Nas latitudes médias a queda de neve apresenta-se sob a forma de flocos. As nuvens que originam a neve são as mesmas que originam a chuva (Ns, As, Cu², Sc).

- A *neve molhada* é uma forma de precipitação, simultânea, de chuva e de neve. A chuva e a neve caem, em regra, de uma camada contínua e extensa de nimbo-estratos, ou de uma camada espessa e elevada de alto-estratos. O mecanismo de geração é o das três fases.

- *Neve gelada* é uma camada de gelo homogêneo e transparente, que se forma nas superfícies horizontais e verticais, quando há precipitação de gotas de água sobfundidas, que passam ao estado sólido ao tocarem nos corpos arrefecidos situados no ar. É esta neve que, ao acumular-se em grandes quantidades nas árvores e nos fios telegráficos, provoca o derrube das árvores e dos postes, causando grandes estragos.

Além destas formas, podíamos ainda considerar a *neve em*

grãos, as *agulhas de gelo* e a *neve rolada*, que dependem muito da estrutura e do tipo de equilíbrio da atmosfera, abaixo das nuvens e das condições genéticas.

- *Granizo* é uma precipitação de grãos de gelo translúcido, quase esféricos, com 2mm a 5mm de diâmetro. São constituídos por um núcleo opaco, coberto por camadas concêntricas alternadas de gelo transparente e opaco, devido à presença de numerosas bolhas de ar. Em geral, apresenta um aspecto exterior vidrado, ou molhado.

A estrutura em camadas concêntricas é atribuída às diferentes nas taxas de acumulação e de congelação da água sobrefundida. Quando um grânulo de granizo cai através duma região de nuvem, com grande conteúdo de água líquida, esta acumula-se rapidamente antes de poder gelar formando-se uma camada de água líquida que se transforma em gelo transparente, quando congela. Se o grânulo passa por regiões com menos densidade de gotículas, estas são agregadas e congelam rapidamente, deixando entre si espaços em que fica retido o ar, o que origina a opacidade.

O granizo forma-se em regiões de fortes correntes ascensionais e de elevado conteúdo de gotículas sobfundidas, nos cúmulo-nimbos.

É uma forma de precipitação, que resulta de condições de forte instabilidade de atmosfera, com a ocorrência de aguaceiros e de trovoadas.

- *Saraiva* é uma precipitação de fragmentos de gelo, cujas dimensões excedem por vezes 50mm. É, por assim dizer, granizo em ponto maior e que resulta dos mesmos factores, mas ampliados.

- *Aguaceiros* são formas de precipitação sólida ou líquida, que começam e terminam bruscamente, com variações rápidas de intensidade e com alternância de nuvens carregadas (cúmulos grossos e cúmulo-nimbos) e de abertas de céu azul. Os aguaceiros estão associados a fortes movimentos convectivos e a uma grande instabilidade da atmosfera. Podem ser acompanhados, ou não, por trovões e relâmpagos.

5. O RAMO AÉREO DO CICLO HIDROLÓGICO

5.1. O papel da atmosfera e o ciclo hidrológico

O papel da atmosfera no ciclo hidrológico é fundamental. É na atmosfera que são possíveis os movimentos rápidos verticais que, com o arrefecimento adiabático, levam à condensação e à formação das nuvens. E as nuvens são as células geradoras da precipitação que inicia o ramo terrestre do ciclo da água.

A atmosfera é o reservatório que acolhe, generosamente, o vapor de água evaporado da superfície com a sua capacidade de retenção devida à sua temperatura. É um laboratório que processa o vapor de água, transformando-o em água líquida e sólida, para depois o remeter por precipitação à origem. Sem este processamento o vapor de água em difusão contínua atingiria os níveis elevados em que seria destruído por fotodissociação. E assim se secariam os vales e as fontes, os rios e os mares! A atmosfera é, por isso, o tampão superior que aguenta as águas dos mares oceanos!

Mas, as circulações da atmosfera geram as condições para a formação de nuvens e para lhe modelar o tipo e as características. Não é em vão que:

«As nuvens são a caligrafia do céu, sem erros de ortografia.»

Outro papel primordial da atmosfera é o transporte de água, sobretudo na fase vapor, que origina o ramo aéreo do ciclo hidrológico. Sem este «caudal aéreo» não se fecharia o ciclo e não haveria a reciclagem da água.

Mas, analisemos algumas implicações do papel primordial da atmosfera no ciclo hidrológico.

5.2. A falácia da teoria evaporação-precipitação *in situ*

A falta duma representação qualitativa e de determinações quantitativas adequadas, conduziram a ideias confusas sobre a natureza do papel da atmosfera no ciclo hidrológico.

Assim, os hidrologistas clássicos admitiam que a maior parte da água da precipitação sobre os continentes provinha, directamente,

de humidade resultante da evapotranspiração *in situ*. Minimizava-se, portanto, o fluxo do componente água na atmosfera e, essencialmente, reduzia-se esse fluxo à compensação do escoamento da água dos continentes, como «resultava da inspecção da equação clássica de hidrologia», que havemos de analisar no próximo capítulo.

Estudos recentes mostram bem que o fluxo total do componente água na fase vapor constitui, de longe, a parcela mais importante da equação do ciclo hidrológico.

Apesar de se considerar firmemente estabelecido em muitos domínios da literatura (Horton, 1943), o conceito da correspondência evaporação-precipitação quase *in situ* está errado.

A aceitação desta hipótese levava a concluir que, para aumentar *in situ* a precipitação, bastava aumentar a evapotranspiração em detrimento do escoamento total, por meio de barragens, de lagos artificiais, da irrigação, da plantação de florestas, etc. Infelizmente, tal não é de esperar, visto que o fluxo do vapor de água não tem de ser compensado, exactamente, *in loco*, pelo escoamento. E reciprocamente! Humphreys (1937), por exemplo, «concluía» que a principal fonte de água caída sobre os continentes era proveniente da evaporação da água nos próprios continentes, «porque a dias com precipitação se seguiam dias com precipitação e a dias secos se seguiam dias secos». De acordo com este ponto de vista, um aumento de evaporação conduziria, necessariamente, a um aumento de precipitação e reciprocamente, gerando-se desta interacção uma reacção em cadeia que se manteria até que o escoamento não compensado pelo fluxo do vapor de água extinguísse esta cadeia.

As teorias da evaporação-precipitação quase *in situ* baseavam-se, fundamentalmente, nas hipóteses seguintes:

- a) ainda que a mobilidade da atmosfera fosse grande o transporte de vapor associado seria insignificante;
- b) o fluxo de vapor de água só teria significado em regime quase estacionário e condicionaria, apenas, o escoamento total.

Quanto à primeira hipótese, resultados recentes mostram que é falsa; há claramente um transporte efectivo, com as áreas de convergência e de divergência, bem demarcadas, sobre os oceanos e sobre os continentes. Os cálculos indicam que as quantidades de vapor de

água que se movem dos oceanos para os continentes e reciprocamente são enormes, e que a quantidade de água devida à evapotranspiração local parece ser pequena. Quanto à segunda hipótese, tanto na escala hemisférica, como na continental ou regional, os cálculos dos fluxos totais do vapor de água apresentam variações sazonais e interanuais muito consideráveis. Estes resultados mostram, imediatamente, o desacordo daquelas premissas com os dados experimentais, fornecidos pelas observações de altitude, de que só recentemente, com a invenção da radiossondagem, se dispõe.

Cabe ainda fazer um comentário, que se relaciona com o mecanismo da precipitação, no aspecto da meteorologia sinóptica. Como se sabe, a precipitação é condicionada por factores termodinâmicos e dinâmicos. Entre estes, o mais importante é a velocidade vertical, associada aos campos da convergência e divergência da atmosfera. Estes campos são inteiramente independentes dos factores que condicionam a evaporação. Logo, esta não pode determinar univocamente a precipitação, que era a ideia básica (mas falaz) da teoria da evaporação/precipitação *in situ*.

Mas, como se conclui do exame e da inspecção da análise das cartas dos campos da divergência, também não se pode aceitar a ideia, extremamente oposta, de que a fonte da humidade disponível para a precipitação é constituída, exclusivamente, pela água evaporada dos oceanos. Sendo assim, os fenómenos de precipitação só se observariam em massas de ar de origem marítima.

É evidente que uma massa de ar continental pode ganhar humidade por evapotranspiração ao atravessar grandes massas de água (lagos, mares, oceanos, etc.) ou grandes florestas. Outro tanto sucede, por vezes, com as massas de ar marítimo, mesmo tropicais, ao atravessarem regiões continentais.

Outro argumento em favor da precipitação-evaporação quase *in situ* baseava-se nas determinações das concentrações em cloro das águas de escoamento dos rios e da precipitação a que se procedeu em vários pontos nos Estados Unidos (Horton, 1943). Os valores das concentrações diminuíram, muito rapidamente, do litoral para o interior. Por isso, era-se levado a concluir que a precipitação de origem oceânica se devia confinar apenas às regiões do litoral. É evidente, que esta conclusão só seria verdadeira se os núcleos de condensação fossem constituídos, exclusivamente, por partículas de cloreto de sódio e se, por sua vez, a quantidade de «clorião» encontra-

da nas águas do escoamento fosse exactamente proveniente dos núcleos de condensação.

Ora, sabe-se hoje que só uma pequena fracção dos núcleos de condensação é constituída por partículas de cloreto de sódio e não se pode admitir que o conteúdo em cloro das águas de escoamento possa ser proveniente dessa fracção dos núcleos de condensação. A análise química cuidada das águas da precipitação mostrou que o seu conteúdo em cloro é há muito inferior ao da água que se escoo nas regiões do litoral. A concentração em sal das águas de escoamento deve atribuir-se à grande solubilidade da água e à existência de partículas de dimensões muito variáveis espalhadas pelos ventos. Estas, umas caem devido ao seu peso, e são arrastadas pela precipitação, outras podem funcionar como núcleos de condensação. Nalguns casos as partículas de cloreto de sódio, oriundo dos oceanos, podem ser transportadas até grandes distâncias da costa. No entanto, vai-se dando uma deposição selectiva, com as de maiores dimensões caindo mais junto à costa. Daqui resulta o decréscimo da concentração observada nas águas do escoamento, em que se dissolvem as partículas caídas, à medida que se avança para o interior.

Em conclusão podemos afirmar que a água evaporada num dado local pode ir precipitar a milhares de quilómetros de distância. É, afinal, como se diz num conhecido aforismo popular: «num lado se põe o ramo, noutro se vende o vinho».

As implicações dos aspectos dos problemas da precipitação que temos estado a tratar são muito importantes, quando se considera a possibilidade de provocar a precipitação por processos artificiais, numa dada região. Ainda mesmo que seja possível precipitar toda a água contida numa massa nebulosa, como o conteúdo em águas das fases líquida e sólida é muito pequena, o processo não se pode manter se não houver um fluxo de vapor de água suficientemente intenso que garanta a continuidade do processo. E este fluxo não é condicionado por factores locais ou regionais, mas pela circulação geral.

Quaisquer modificações nos factores do clima, na essência, correspondem a um modificação das características da circulação geral da atmosfera.

Em média, a quantidade de água precipitada em todo o globo é da ordem de 100 cm por ano. Os valores médios da quantidade de água precipitável existente na atmosfera sob a forma de vapor de água são da ordem de 2,8 cm. Pode concluir-se, portanto, que a

água retida na atmosfera podia ser removida num período inferior a dez dias, se fosse totalmente precipitada e cessasse, completamente, a evaporação.

Estudos recentes dos campos de distribuição da quantidade de água precipitável nos hemisférios Norte e Sul, com base nas observações do Ano Geofísico Internacional (AGI), mostram que o seu valor médio para toda a atmosfera é da ordem de 2,8 cm. Este valor, tomando em consideração a área do globo, permite avaliar em $14,3 \times 10^{12}$ toneladas a quantidade de água retida pela atmosfera o que constitui um manancial comparável a um verdadeiro lago de dimensões médias.

CAPÍTULO IV

PRECIPITAÇÃO E EVAPORAÇÃO

1. DISTRIBUIÇÃO PLANETÁRIA DA PRECIPITAÇÃO

A precipitação é uma grandeza que varia muito de local para local e, em cada local, no decurso do tempo. No entanto, os valores médios da quantidade de precipitação já são representativos e à escala de meses são relativamente estáveis e, por isso, podem representar-se em mapas. Vamos apresentar apenas a análise da distribuição média anual da quantidade de precipitação, à escala global. A distribuição revela a influência dos oceanos e dos continentes e a variação sazonal.

Os aspectos mais relevantes das cartas com a distribuição da precipitação são os valores elevados que se verificam na região equatorial, ao longo da zona intertropical de convergência (ZITC), que corresponde ao equador térmico. É a zona das grandes florestas virgens. São de assinalar os valores extremamente elevados nas regiões equatoriais da América do Sul, da África, da Indonésia e do Pacífico oriental onde a precipitação atinge e, por vezes, ultrapassa os 3000 mm por ano. No seu ciclo anual a ZICT desloca-se para norte e para sul seguindo o movimento anual aparente do Sol. Há um contraste notável nos mapas sazonais no Sul e Sudoeste Asiático devido, principalmente, à monção de Sudoeste da Índia que se verifica no Corno de África, na Índia e no Sudoeste da Ásia.

Nas regiões subtropicais dos dois hemisférios, devido à influência dos grandes anticiclones semipermanentes, onde predomina a subsidência, a precipitação é muito baixa, podendo atingir valores inferiores a 100 mm por ano. É por isso que grandes extensões dos continentes subtropicais são cobertas por desertos (Sara; Arábia; China e Novo México; Namíbia, Austrália). No decurso do ano os grandes centros de altas pressões deslocam-se para norte e para sul com o Sol, originando os Verões secos e condições de semiaridez nas regiões dos bordos polares dos grandes anticiclones.

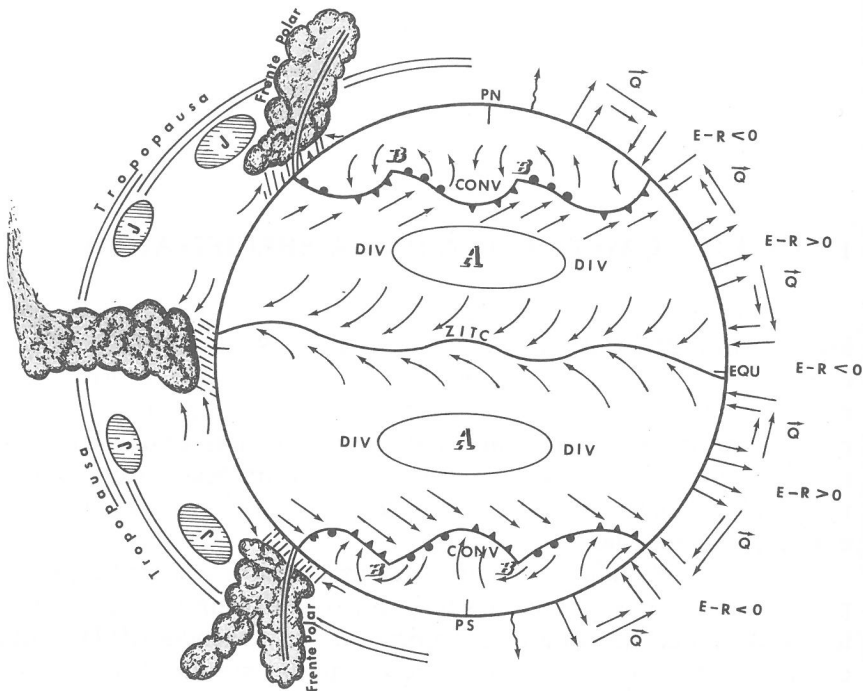


Fig. 6 — A circulação geral da atmosfera, o ciclo hidrológico e as zonas climáticas.

Nas regiões das latitudes médias, a precipitação volta a aumentar, apresentando um máximo secundário. Este aumento está associado à superfície frontal polar e às depressões que se desenvolvem ao longo da frente. A precipitação é abundante em todas as estações nas latitudes médias elevadas, enquanto que nas zonas do lado do equador a precipitação é mais abundante no Inverno; no Verão a precipitação é muito escassa. Um exemplo típico destas condições é a região mediterrânica. A frente polar, que se desenvolve ao longo dos bordos polares dos grandes anticlones semipermanentes, desloca-se em latitude com estes, atingindo as latitudes mais baixas durante os fins do Outono. Assim se explica o regime de precipitação de Portugal (um máximo em Novembro quando a frente polar se desloca para sul e outro em Fevereiro, no seu movimento de regresso para norte), e o regime da precipitação do Norte de África

com um máximo em Novembro. Nas regiões subpolares e polares a temperatura do ar é tão baixa, que limita a capacidade máxima de retenção da atmosfera para a humidade. Por isso, a precipitação é inferior a 100 mm por ano, em todas as estações do ano.

O contraste entre os continentes e os oceanos torna-se mais evidente, quando se comparam os perfis meridionais representados na tábua 2. O deslocamento meridional da ZICT é muito mais pronunciado sobre os continentes do que sobre os oceanos. A amplitude do deslocamento da ZICT condiciona, de forma decisiva, os climas das regiões marginais das grandes zonas dos climas áridos ou desérticos. É o que se passa na região do Sahel, no Sul do Sudão e na Etiópia, em que as estações das chuvas dependem do deslocamento para norte (no Verão) da ZICT.

2. DISTRIBUIÇÃO PLANETÁRIA DA EVAPORAÇÃO

A taxa de evaporação avalia-se pela quantidade de água perdida por evaporação de uma superfície de um metro quadrado num dado intervalo de tempo. Avalia-se, portanto, em l/m^2 ou em mm.

A taxa de evaporação depende de muitos factores. Os mais importantes são a temperatura do ar, o gradiente vertical da humidade, a velocidade do vento e a disponibilidade em água. A evaporação é, muitas vezes, medida por meio de evaporímetros, que constam de tinas circulares de pouca profundidade e de diâmetro variável em que se mede o desnível da superfície livre da água, ou o evaporímetro de Piche (um tubo de ensaio invertido com uma tampa constituída por papel poroso).

Os valores das medições são muito influenciados pelas condições pontuais e pela exposição local. Ainda que estas medições sejam úteis para avaliar a evaporação de reservatórios de água, lagos, áreas irrigadas, são de pouca utilização para avaliar os balanços de água numa região com o rigor desejado. A água que se evapora da tina, por exemplo, é imediatamente removida pelos ventos dominantes e o vapor é sucessivamente substituído pela evaporação de mais e mais água, enquanto esta existir na tina. Esta disponibilidade em água não é a mesma dos solos e, por isso, os evaporímetros condu-

zem, em geral, a valores, no terreno, superiores aos que se deviam verificar em condições naturais. Mas estas são por sua vez alteradas nas vizinhanças da tina, porque a evaporação rouba calor ao meio ambiente e porque por vezes cria uma atmosfera mais húmida do que a real.

Sobre os oceanos o ar em contacto com a água da superfície atinge um estado de equilíbrio que tende a moderar a taxa de evaporação e os valores das medições (medidas) da evaporação são de maior confiança.

Assim se explica a grande variedade de estimativas da evaporação para uma mesma região, que se encontram nas publicações. Mesmo as medições com evapotranspirómetros (*i.e.* instrumentos que medem a evaporação dos solos e a transpiração das plantas) variam, substancialmente, com o tipo de evapotranspirómetro utilizado. Por isso, a evaporação é melhor avaliada por processos indirectos recorrendo a expressões matemáticas, baseadas na física do processo.

A evaporação ocorre de forma contínua nas superfícies das águas, dos solos, das plantas, da neve e dos campos de gelos; neste último caso trata-se da sublimação (passagem da fase sólida à fase vapor). Como referimos, a água contida nos solos pode ser extraída pelas plantas e lançada na atmosfera sob a forma de vapor pela transpiração das principais plantas. A evapotranspiração é um processo que resulta da combinação da evaporação da água do solo e da transpiração da vegetação. Quando o solo se encontra saturado em água («*encharcado*») diz-se que se atingiu a capacidade de campo. Neste caso, a evaporação da superfície molhada é controlada pelos mesmos factores externos que dos oceanos: velocidade dos ventos na camada de contacto e da diferença da humidade ao longo da vertical na camada limite, e é independente da quantidade de água disponível para a evaporação.

A evaporação, nestas condições, pode determinar-se a partir da lei da Dalton (1812) que diz: «a taxa de evaporação é proporcional à velocidade dos ventos e à diferença da tensão máxima do vapor e_s e a tensão actual e (défice de saturação)».

$$E = k v (e_s - e)$$

Sobre os oceanos a evaporação pode calcular-se a partir duma variante da lei de Dalton com alguma segurança:

$$E = \rho C_D |v| (q_s - q_a)$$

em que ρ é a densidade do ar, C_D um coeficiente de difusão (= 0,0014) e $(q_s - q_a)$ é a diferença da humidade específica de saturação à temperatura da água da superfície do mar e a humidade específica da atmosfera livre.

Nas figuras 7 e 6 apresentam-se os mapas da evaporação à escala mundial. As regiões de evaporação mais elevadas encontram-se nas águas subtropicais em que dominam os grandes anticiclones semipermanentes e que constituem como que «desertos oceânicos» (o maior dos quais é o Mar Vermelho). Como se vê, há uma grande discontinuidade nos valores da evaporação, quando se passa dos oceanos para os continentes: as isolinhas dum certo valor terminam bruscamente ao atingir os continentes.

Sobre os oceanos, torna-se evidente o efeito das correntes marítimas, como se pode avaliar pelos valores extremamente elevados da evaporação, mesmo no Inverno, da ordem de 2000 mm por ano, ou na região leste dos grandes giros oceânicos (correntes quentes: Golfo, Kuroshio, etc.). É interessante comparar estes valores da evaporação nas regiões em que predominam as correntes frias (Canárias, Califórnia, Benguela, Peru). Nas regiões equatoriais, onde a precipitação é abundante, a evaporação é, de certo modo, menos intensa devido às temperaturas mais baixas das águas dos oceanos e aos ventos mais fracos, que ali se fazem sentir. Nos continentes, os valores máximos da evaporação observam-se na região equatorial, devido não só à maior precipitação (há mais água disponível), mas também às temperaturas mais elevadas, que ali se verificam.

A partir de mapas análogos, é possível calcular o perfil médio da evaporação nas várias latitudes. Estas curvas sintetizam os principais aspectos da evaporação sobre os oceanos, mostram que as taxas de evaporação tendem a ser menores no Verão do que no Inverno, devido às variações da intensidade do vento e à diferença da humidade.

3. O BALANÇO PLANETÁRIO DA ÁGUA À SUPERFÍCIE DO GLOBO

Depois de analisar, separadamente, as distribuições da evaporação e da precipitação é natural comparar os comportamentos destas duas grandezas, porque estão fortemente ligadas à climatologia e à hidrologia. Por isso, apresentamos na tábua 1 os valores médios zonais da precipitação e da evaporação para zonas de 10° de latitude e para os hemisférios. De forma análoga, na tábua 2, apresentam-se os valores médios totais das mesmas grandezas para os vários continentes e para os oceanos. As tábuas incluem, também, as diferenças $R-E$ que em condições médias anuais, e correspondendo a um regime permanente, representam o escoamento r

$$R-E = r$$

As tábuas incluem ainda os cocientes E/R e o «coeficiente de escoamento r/R . Estas duas grandezas são importantes, porque constituem índices climáticos muito divulgados e são muito utilizados: um é o índice de aridez, E/R , e o outro, r/R , indica a fracção da precipitação caída que se transforma em escoamento. Na tábua 2 inclui-se ainda o escoamento dos rios dos vários continentes.

Deve ter-se presente que os valores de R e de E diferem de autor para autor, devido às incertezas na avaliação espacial de R e das determinações de E . Em geral, os valores são ajustados de forma a haver um balanço perfeito entre os valores de R e de E para todo o globo.

Os valores de R dados na tábua mostram que para o hemisfério Norte, os valores são ligeiramente inferiores aos do hemisfério Sul, ao contrário do que se verificava com os valores de E .

Para todo o globo, e para um número suficientemente grande de anos, a precipitação deve igualar a evaporação. A precipitação para os dois hemisférios é quase igual enquanto que para a evaporação existem diferenças consideráveis (15 mm/ano). Os valores mais elevados de E no hemisfério Sul resultam da existência duma área livre muito maior da superfície dos oceanos. O hemisfério Norte apresenta um balanço positivo ($R-E = 73$ mm/ano), enquanto que o hemisfério Sul apresenta um défice de (-73 mm/ano). Portanto, so-

mos levados a concluir que tem de existir um fluxo de água líquida, através do equador, do hemisfério Norte para o hemisfério Sul. É interessante acentuar que a mesma quantidade de água, mas agora na fase vapor, é exportada do hemisfério Sul para o hemisfério Norte, como já tivemos ocasião de referir ao tratar do ciclo hidrológico em escala global (Peixoto, 1980). Há, por isso, uma compensação perfeita, que resulta da conservação da quantidade da substância água, que à escala global se mantém constante.

Como se depreende da análise da tábua 2, as grandezas R , E e $R-E$ têm um comportamento muito diferente nos continentes e nos oceanos. Esta diferença de comportamentos resulta, não só, das diferenças fisiográficas e termodinâmicas, mas também da extensão da área.

A América do Sul apresenta os maiores valores de escoamento ($r = R - E$), enquanto que a Austrália e a Antártica apresentam os valores menores, quer de R , quer de E . Em regra, ambas as grandezas têm valores muito menores sobre os continentes do que sobre os oceanos. Em média, os valores de $R - E$, sobre os continentes, são da ordem de 266 mm/ano. Este excesso de água condensada é transferido pelos rios e pelos glaciares para os oceanos, a fim de compensar o défice de 110 mm/ano que ali se verifica. Claro que, quando os valores de $R - E$ são multiplicados pelas áreas dos continentes e dos oceanos, verifica-se que há compensação entre os valores assim obtidos. A análise dos valores da tábua mostra que os valores de $R - E$ são positivos para os oceanos Ártico e Pacífico, enquanto que, para os oceanos Atlântico e Índico são fortemente negativos, conduzindo ao valor do défice já referido de -110 mm/ano, quando se tomam todos os oceanos.

Estas diferenças dos valores de $r = R - E$, tomando em consideração os escoamentos dos rios, levam a concluir que deve haver um fluxo contínuo de água dos oceanos Ártico e Pacífico para os oceanos Atlântico e Índico. A título de exemplo, verificamos que o transporte de água pelos rios, que desaguam no oceano Atlântico, é da ordem de $r_0 = 197$ mm/ano. Por conseguinte, a diferença $(E - R) - r_0 = 175$ mm/ano deve provir dos oceanos Ártico e Pacífico. Por outro lado, o oceano Índico só recebe 37 mm/ano do escoamento dos rios que ali desaguam e, por isso, o oceano Pacífico tem de fornecer os restantes 179 mm/ano.

O excesso dos valores de $R - E$ verificado sobre os continentes é

compensado pelo fluxo resultante de vapor de água, transportado pela circulação geral da atmosfera das grandes regiões de produção de vapor de água, que são as regiões dos grandes anticiclones subtropicais semipermanentes onde a evaporação, como já vimos, é extremamente activa. A evaporação intensa que ali se verifica conduz a valores muito elevados da salinidade das águas dos oceanos naquelas zonas.

Ainda que tivéssemos obtido uma ideia global da distribuição da substância na água pelo sistema climático e do fluxo através dos vários subsistemas, a imagem só fica completa quando se toma na devida conta o ramo aéreo do ciclo hidrológico.

Como se depreende das considerações anteriormente feitas, a atmosfera, com a sua circulação geral, desempenha um papel fundamental na alimentação dos grandes rios dos continentes ao fornecer o vapor de água indispensável para alimentar o excesso da precipitação sobre a evaporação que ali se verifica.

Mas estes aspectos serão tratados com maior profundidade em publicação futura, quando tratarmos da água na atmosfera.

*
* * *

A esta distribuição geral da precipitação, em escala planetária, sobrepõem-se os factores regionais e locais, tais como as formas de relevo a proximidade dos mares interiores e dos oceanos etc., que introduzem distorções na configuração zonal.

A fim de dar uma ideia global da distribuição da precipitação, da evaporação e depois do escoamento analisemos os perfis latitudinais de R , E e por fim de $r = R - E$.

Como se vê o perfil da precipitação $[\bar{R}]$ apresenta um máximo equatorial associado à frente intertropical de convergência ladeado por dois máximos nas latitudes médias associados às frentes polares. Por seu turno, o perfil da evaporação $[E]$ apresenta dois máximos nas regiões subtropicais e com um valor menos acentuado nas regiões equatoriais.

Da combinação dos perfis de $[E]$ e de $[R]$ obtém-se por diferença o perfil do escoamento $[\bar{r}]$ que apresenta um máximo ($[\bar{R}] > [E]$) nas regiões equatoriais associado dos caudais dos grandes rios desta região ladeado por outros dois máximos ($[R] > [E]$) nas latitudes ele-

vadas. As latitudes subtropicais são caracterizadas por um excesso da evaporação sobre a precipitação, como era de esperar.

Tábua 1

Valores médios anuais da precipitação (*R*) e da evaporação (*E*) para zonas de 10° de latitude, em unidades de mm/ano (segundo Baumgartner and Reichel, 1975)

	Surface área	<i>R</i>	<i>E</i>	<i>R</i> - <i>E</i>	<i>E</i> / <i>R</i>	(<i>P</i> - <i>E</i>)/ <i>R</i>
80° - 90° N	3.9	46	36	10	0.78	0.22
70° - 80° N	11.6	200	126	74	0.63	0.37
60° - 70° N	18.9	507	276	231	0.54	0.46
50° - 60° N	25.6	843	447	396	0.53	0.47
40° - 50° N	31.5	874	640	234	0.73	0.27
30° - 40° N	36.4	761	971	-210	1.28	-0.28
20° - 30° N	40.2	675	1110	-435	1.64	-0.64
10° - 20° N	42.8	1117	1284	-167	1.15	-0.15
0° - 10° N	44.1	1885	1250	635	0.66	0.34
0° - 10° S	44.1	1435	1371	64	0.96	0.04
10° - 20° S	42.8	1109	1507	-398	1.36	-0.36
20° - 30° S	40.2	777	1305	-528	1.68	-0.68
30° - 40° S	36.4	875	1181	-306	1.35	-0.35
40° - 50° S	31.5	1128	862	266	0.76	0.24
50° - 60° S	25.6	1003	553	450	0.55	0.45
60° - 70° S	18.9	549	229	320	0.42	0.58
70° - 80° S	11.6	230	54	176	0.23	0.77
80° - 90° S	3.9	73	12	61	0.16	0.84
0° - 90° N	255.0	990	897	73	0.92	0.07
0° - 90° S	255.0	975	1048	73	1.07	0.07
Globo	510.0	973	973	-	1.00	-
Unidades	10 ⁶ km ²	mm/ano	mm/ano	mm/ano	-	-

Tábua 2

Valores médios anuais da precipitação (R)
e da evaporação (E) para os vários continentes e oceanos

Região	área (10^6 km ²)	R (mm/ano)	E (mm/ano)	$R - E$ (mm/ano)	$R +$	E/R	$(P - E)/R$
Europa	10.0	657	375	282	—	0.57	0.43
Ásia	44.1	696	420	276	—	0.60	0.40
África	29.8	696	582	114	—	0.84	0.16
Austrália	8.9	410	410	60	—	0.83	0.17
América do Norte	24.1	645	403	242	—	0.62	0.38
América do Sul	17.9	1564	946	618	—	0.60	0.40
Antártica	14.1	169	28	141	—	0.17	0.83
Todos os continentes	148.9	746	480	266		0.64	0.36
Oceano Ártico	8.5	97	53	44	307	0.55	0.45
Oceano Atlântico	98.0	761	1133	-372	197	1.49	-0.49
Oceano Índico	77.7	1043	1294	-251	72	1.24	-0.24
Oceano Pacífico	176.9	1292	1202	90	69	0.93	0.07
Oceanos	361.1	1066	1176	-110	110	1.10	-0.10
Globo	510.0	973	973	0	—	1.10	0

+ r = escoamento dos continentes para os oceanos

CAPÍTULO V

**A QUANTIFICAÇÃO
DO CICLO HIDROLÓGICO**

1. A NECESSIDADE DE CONTABILIZAR OS RECURSOS HÍDRICOS

Como verificámos no capítulo anterior (quadros 1 e 2), a água não se distribui uniformemente no globo. Há regiões em que a precipitação é abundante, como a zona equatorial das grandes florestas virgens, e as zonas temperadas das latitudes médias e elevadas. Mas, também, há regiões muito áridas, como as zonas das latitudes subtropicais em que se formam os grandes desertos, em ambos os hemisférios. Há ainda, as zonas de transição, onde a quantidade de precipitação é escassa e mal distribuída no tempo, que se designam por zonas semiáridas.

Mas não é só desta distribuição, à escala planetária da Terra, que nos vamos ocupar. Vamos estudar a economia da água numa região limitada, ou num dado local, de forma a obter os elementos necessários para uma gestão adequada dos recursos hídricos disponíveis.

A precipitação não cai duma maneira uniforme em todos os pontos duma região, nem no decurso do tempo. Varia com o mês, com a estação e, além disso, apresenta mesmo nos meses chuvosos, uma grande variabilidade, de ano para ano.

A variação da precipitação pode levar às condições extremas de escassez, originando as secas, ou de superabundância, gerando as cheias e os dilúvios. Com as secas, ao espectro da fome junta-se o desespero da sede. Com as cheias, junta-se à tragédia da destruição a ansiedade da sobrevivência.

Torna-se, por isso, necessária uma distribuição adequada dos recursos hídricos para suprir faltas e evitar excessos. E esta gestão tem de basear-se em dados objectivos.

Felizmente, a água pode ser contabilizada!

Os elementos do ciclo hidrológico podem medir-se ou avaliar-se, sendo traduzidos por números, expressos em unidades convenientes.

Numa dada região há uma quantidade de água que chega; há uma quantidade de água que parte e, em geral, há alguma água que fica. É o saldo entre a «entrada» e a «saída», ou entre o «deve» e o «haver».

A água chega através da precipitação, que cai sobre a forma de chuva, ou de neve; através da intersecção da água dos nevoeiros pelas plantas e pela superfície; da água que se deposita com a formação de orvalho e de geadas; e da água que é transportada pelo homem através de condutas e canais.

De toda a água que «entra» e se deposita há uma parte que se perde para a atmosfera, por evaporação; outra que se escoia à superfície para formar os riachos, os ribeiros e os rios; outra que se infiltra no solo, indo alimentar os grandes reservatórios subterrâneos.

A água da chuva, da neve e doutras formas de precipitação, acumula-se temporariamente na vegetação, no solo, nos lagos e nos rios. À medida que a precipitação continua, ou a neve se derrete, o solo deixa de poder reter mais água, que, por isso, passa a escorrer à superfície e a penetrar a maiores profundidades. Esta vai acumular-se nos reservatórios subterrâneos, os quais mantêm as nascentes, e alimentam os rios, na ausência de precipitação e do degelo.

Quando o solo já não tem capacidade para reter mais água, diz-se que está saturado. A partir de então, a água precipitada vai quase toda, directamente, para a rede hidrográfica.

A contabilidade da água, à superfície, para uma dada região, é fácil de estabelecer. Fundamentalmente, trata-se de fazer o balanço entre a quantidade de água entrada na região, a quantidade de água saída e a que fica retida ou armazenada.

2. A EQUAÇÃO CLÁSSICA DA HIDROLOGIA

O cálculo do balanço em água numa região pode fazer-se, aplicando o princípio da conservação ao ramo terrestre do ciclo hidroló-

gico. Pode fazer-se contabilizando as grandezas que correspondem ao «deve» e ao «haver». Assim, para uma dada região e para um certo intervalo de tempo a equação de balanço pode escrever-se na forma:

$$R + N + D + \tau = \Delta S_p + \Delta S + \Delta S_u + r_i + r_s + r_u + W + E$$

em que os símbolos têm os significados seguintes:

«Haver»:

R, N, D, τ — quantidade de água recebida na região, respectivamente, por precipitação, por intersecção do nevoeiro, por deposição de outros hidrometeoros (orvalho, geada, etc.) e transportada pelo homem.

«Balanço»:

$\Delta S_p, \Delta S, \Delta S_u$ — variações das quantidades de água armazenada à superfície, no solo e nas águas subterrâneas.

«Deve»:

r_i, r_s, r_u, W — quantidade de água que se infiltra, que se escoia, à superfície e no subsolo, e a que é retirada pelo homem.

E — quantidade de água que é devolvida à atmosfera, por evaporação, incluindo a transpiração pelas plantas.

É uma equação, que exprime, de forma quantitativa, os fenómenos que ocorrem no ciclo hidrológico. Como se vê, é uma simples equação de contabilidade, que só envolve elementos hidrológicos e não envolve nenhum factor. É uma equação que exprime, apenas, uma condição que tem de se verificar para um certo intervalo de tempo e não toma em conta a evolução. É uma equação de condição e não constitui, portanto, uma equação da dinâmica do ciclo hidrológico.

A importância relativa de cada um dos termos depende do problema específico que se considera. Em regra, os termos mais importantes são a precipitação R , a variação da água armazenada à super-

fície e no solo ($\Delta S_p + \Delta S$), o escoamento na secção final do troço de água r , e a evaporação E . Neste caso, a equação reduz-se a:

$$R = \Delta S_p + \Delta S + r_s + r_u + E$$

Quando se consideram intervalos de tempo suficientemente grandes e regiões de área extensa pode desprezar-se o termo de armazenamento, ΔS , e a equação reduz-se a:

$$R - r = E$$

que é a forma mais simples da equação da hidrologia e foi estabelecida por Dalton (século XIX).

Tradicionalmente, as grandezas de maior interesse prático são a precipitação, R , e o escoamento, r , que, em geral, se podem medir. A medição da evaporação, E , e da variação da água armazenada, ΔS , não se faz, em regra, devido, principalmente, à dificuldade em se obterem valores aceitáveis destas grandezas, como referimos. Mesmo os valores da precipitação, em regiões montanhosas e nos oceanos, são de pouca confiança.

O escoamento que se utiliza na equação do balanço hídrico deve incluir as duas formas básicas de escoamento, designadamente o escoamento à superfície do globo e o escoamento subsuperficial, resultante da água que existe no interior do solo.

É evidente que, num problema de rega ou num problema de abastecimento de água, se podem desprezar os termos τ , W e ΔS . Em aproveitamento, nas regiões com nevoeiros frequentes, N pode ser importante. O mesmo se passa com D , quando se consideram os «poços aéreos» e as orvalhadas.

3. BALANÇO DA ÁGUA NO SOLO

A água existente nas camadas do solo, mais próximas da superfície (até à profundidade de 1 m, aproximadamente), designa-se por *água do solo* ou «*humidade*» do solo.

Esta grandeza tem importância na Climatologia, na Ecologia,

e, sobretudo, na Agronomia. A água do solo é um ingrediente vital do ambiente biológico.

A água existente nas camadas mais profundas do solo é, como já vimos, designada por água subterrânea.

Considerando uma coluna de solo de secção unitária (1m^2 , por exemplo) e exprimindo o fluxo da água em unidades de comprimento por tempo (mm/dia, mm/mês, etc.), a equação de balanço, para um determinado intervalo de tempo, pode escrever-se:

$$R = E + \Delta S + r$$

em que, como já referimos, R é a precipitação, E a evapotranspiração, ΔS é a variação da quantidade de água do solo e r inclui o escoamento superficial e a infiltração até à zona da água subterrânea.

A evapotranspiração é a evaporação através das plantas. Convém recordar que há dois modos de definir a *evapotranspiração*:

- i) *Evapotranspiração real* (E_r) é a quantidade de água que, em condições naturais, é transferida do solo, através da vegetação, para a atmosfera;
- ii) *Evapotranspiração potencial* (E_p) representa o fluxo de vapor de água do solo, através da vegetação, para a atmosfera, em condições ideais, do solo estar amplamente abastecido de água; representa a capacidade máxima de um solo devolver à atmosfera energia sob a forma de fluxo de calor latente.

Quando o valor de R for superior ao de E_p , ou, ainda, quando a quantidade de água do solo for igual à sua *capacidade de campo*, tem-se $E_p = E_r$. Nas outras circunstâncias, E_r é inferior a E_p .

Em Portugal, como é típico nas regiões das latitudes médias, a *evapotranspiração potencial* tem um «ciclo» anual muito acentuado: menores valores no Inverno e maiores valores no Verão. Supondo, agora, que, durante o Verão, há água suficiente (de rega, por exemplo) para que o valor da evapotranspiração real (E_r) seja igual à evapotranspiração potencial (E_p), haverá um *superavit de água*, quando R for superior a E_p . Nestas circunstâncias, há escoamento superficial. Se, durante o Verão, o solo não for regado, e se o valor de R for inferior ao de E_p , a vegetação utilizará a água retida no solo, e a quantidade armazenada vai diminuindo.

Os valores acumulados de $E_p - E_r$, desde o início do período, em que há diminuição da água do solo, até que comece a haver recarga do solo em água, designam-se por *défice de água no solo*, e exprimem-se, em regra, em milímetros. Uma vez terminado o período em que há défice de água no solo, segue-se o período de *reposição de água no solo*, durante o qual o solo voltará à sua capacidade de campo. Assim, a quantidade de precipitação R superior a E_p , ou seja $(R - E_p)$, é utilizada na recarga. Uma vez completada a recarga, segue-se um novo período com superavit de água.

Como exemplo, apresenta-se a seguir o balanço hídrico (climatológico) relativo a Melgaço feito pelo Dr. Rocha Faria do INMG.

A tábua 3 mostra que num ano, há um défice (δ) igual a 129mm. Assim, há necessidade de se proceder a regas, totalizando 129mm, para que E_r seja sempre igual a E_p .

Tábua 3

Balanço hídrico do solo em Melgaço (em milímetros)

Meses	Equação:	R	=	E_p	$\pm G$	+ s (Superavit)	E_p	$\delta = (E_p - E_r)$
JAN		112	=	20	+ 0 +	92	20	0
FEV		122	=	22	+ 0 +	100	22	0
MAR		141	=	40	+ 0 +	101	40	0
ABR		77	=	54	+ 0 +	23	54	0
MAI		87	=	79	+ 0 +	8	79	0
JUN		54	=	97	-43 +	0	103	6
JUL		20	=	75	-55 +	0	127	52
AGO		42	=	62	-20 +	0	114	52
SET		60	=	65	- 5 +	0	84	19
OUT		117	=	60	+57 +	0	60	0
NOV		156	=	32	+66 +	58	32	0
DEZ		175	=	21	+ 0 +	154	21	0
Total		1163		627	0	536	756	129

4. BALANÇO HÍDRICO NA ATMOSFERA; EQUAÇÃO GENERALIZADA DO BALANÇO

Seja uma coluna da atmosfera de secção unitária que se estenda desde a superfície do globo até ao topo da atmosfera. Os termos que se consideram na equação do balanço hídrico, relativo à coluna, são:

- i) água que entra na coluna sob a forma de vapor, que se evaporou do solo (incluindo a transpiração das plantas) ou de superfícies livres de água, na base da coluna. Esta contribuição representa-se por E (evaporação e evapotranspiração);
- ii) o transporte horizontal de vapor de água que entra e que sai da coluna, devido à circulação geral da atmosfera. O transporte de vapor de água na atmosfera representa-se por \bar{Q} . O fluco líquido resultante, isto é, a diferença entre o que sai e o que entra na coluna, representa-se por \bar{Q}^* . Um valor positivo \bar{Q}^* indica que a coluna recebeu menos vapor de água do que exportou, enquanto que um valor negativo indica que a coluna importou água na fase vapor;
- iii) a coluna pode ainda perder água por precipitação, R , e por deposição, D , incluindo o orvalho, a geada, etc.

O aumento ou a diminuição do vapor de água armazenado na coluna (água precipitável) e de água e gelo das nuvens costuma representar-se por ΔW . Por conseguinte, a equação do balanço da coluna da atmosfera será:

$$E - (R + Q^*) = \Delta W$$

Se considerarmos os valores médios do ano, o valor de ΔW é praticamente nulo e a equação do balanço reduz-se a:

$$E - R - Q^* = 0$$

ou seja:

$$Q^* = E - R$$

isto é, o «saldo» entre a entrada e a saída de vapor de água, na coluna, devido ao caudal aéreo, associado à circulação geral da atmosfera, é igual à diferença entre a evaporação (evapotranspiração) e a precipitação. Estas equações são equações generalizadas da Hidrologia e que mostram bem a importância do fluxo aéreo e, portanto, o papel da atmosfera no ciclo hidrológico.

A utilização sistemática da equação generalizada do balanço hídrico começou a ser feita, com sucesso, a partir de 1958. E isto foi devido à rápida expansão da rede de estações aerológicas, a partir da década dos anos 40, que permitiu uma medição cada vez mais detalhada da quantidade de água precipitável W , e do transporte, Q^* , do vapor de água na atmosfera. Pode dar-se uma descrição mais pormenorizada da equação generalizada do balanço hídrico.

Se compararmos a equação anterior com a equação simplificada da Hidrologia $P = E - R$, vemos que em regime estacionário $Q^* = r$, isto é: o escoamento dos rios dos continentes para os oceanos é exactamente compensado pelo fluxo de vapor de água importado dos oceanos. É por isso que «os rios correm para o mar, contudo este nunca se enche» (*Eclesiastes*, 17:2).

5. RELAÇÃO ENTRE OS BALANÇOS HÍDRICO E ENERGÉTICO DE UMA REGIÃO

5.1. Factores e elementos do ciclo hidrológico

Os factores do ciclo hidrológico são as grandezas que originam e mantêm o ciclo hidrológico e a sua dinâmica. Entre estes, a radiação solar é o factor essencial. Ora, a radiação solar recebida pela Terra, não se distribui uniformemente devido à esfericidade da Terra e aos factores astronómicos. Surgem, portanto, na distribuição da radiação e nos seus efeitos, variações em latitude e no tempo, incluindo as variações diárias, estacionais e anuais.

Como se viu, balanço hídrico de uma região é, apenas, a formulação matemática do balanço da quantidade de água, relativamente a um dos ramos do ciclo hidrológico — o ramo terrestre — numa dada região. Por outro lado, também se pode formular, matematicamente, o balanço energético dessa região e durante o mesmo intervalo de tempo. Vamos ver que existe uma relação matemática entre as duas equações de balanço, devido ao fenómeno da evaporação.

Com efeito, considerando um intervalo de tempo de um ano (para simplificar a formulação), a equação do balanço hídrico de uma região, na interface solo-atmosfera é:

$$R = E + r$$

Por outro lado, a equação do balanço energético, para a mesma região e para o mesmo intervalo de tempo, pode escrever-se:

$$F = E + LE$$

em que F é o balanço resultante da energia da região; H é a transferência de entalpia de superfície para a atmosfera (calor sensível); LE é o calor consumido para se dar a evaporação e L representa o calor latente de evaporação.

Um pouco de «matemática» permite-nos combinar as duas equações e escrever:

$$\frac{F - H}{L} = R - r$$

Esta equação mostra a relação que existe entre os termos energéticos (primeiro membro), que são factores do ciclo hidrológico, e os termos de massa, que são os elementos do ciclo hidrológico (segundo membro).

Vamos aproveitar esta equação para introduzir alguns índices muito usados em Climatologia e em Hidrologia. Assim, se fizermos:

- i) $D = \frac{F}{LR}$ definimos o *índice de aridez*, que relaciona os efeitos do balanço da energia à superfície com a precipitação;

ii) $B = \frac{H}{LE}$ definimos a *razão do BOWEN*, que relaciona a quantidade de calor transferida do solo para a atmosfera, com a quantidade de calor latente associado à evaporação E ;

iii) $C = \frac{r}{R} = 1 - \frac{E}{r}$ definimos o *coeficiente de escoamento* que é um parâmetro muito utilizado no estudo hidrológico preliminar numa bacia hidrográfica.

A equação clássica da hidrologia pode assim revestir a forma:

$$D = (1 + B) (1 - C)$$

em que intervêm os três índices anteriores e lhe dá uma «forma adimensional».

Estas considerações permitem concluir que certos aspectos hidrológicos de uma região (uma bacia hidrológica, por exemplo) se podem fazer com o auxílio da equação do balanço energético, e que é possível obter uma relação entre índices (razões) energéticos e hidrológicos.

6. DETERMINAÇÃO DA EVAPORAÇÃO

6.1. Método do balanço energético

Vamos agora fazer algumas aplicações das equações de balanço e mostrar como estas se podem utilizar para avaliar, por processos indirectos, a evaporação, E , que, como já referimos, é uma grandeza muito difícil de medir.

Vamos considerar a interface superfície-atmosfera e os fluxos das várias formas de energia através da interface. Vamos ainda pôr num lado da igualdade a soma das parcelas do «haver» (energia que chega) e no outro a soma das parcelas do «deve» (energia que sai). Para haver equilíbrio, tem de o «haver» ser igual ao «deve», e, portanto:

$$K\downarrow + L\downarrow + W_a = \alpha K\downarrow + L\uparrow + H + LE + G + M,$$

os símbolos têm os significados seguintes:

$K\downarrow$ representa a radiação solar global incidente;
 $\alpha K\downarrow$ a radiação solar reflectida e α o albedo da superfície;
 $L\downarrow$ a radiação emitida pela atmosfera para a superfície;
 $L\uparrow$ a energia radiante de grande comprimento de onda emitida pela superfície para a atmosfera;
 W_a o fluxo de energia transportada por advecção;
 H o fluxo de calor sensível da superfície para a atmosfera;
 G o fluxo de energia que penetra no solo ou na água, e
 M representa o fluxo de outras formas de energia, tal como a fotossíntese, etc.

Vamos considerar a expressão do balanço radiativo F de radiação à superfície isto é:

$$F = (K\downarrow - \alpha K\downarrow) - (L\uparrow - L\downarrow)$$

Sendo assim, a equação de balanço da energia escreve-se na forma:

$$F + W_a = H + LE + G + M$$

Em geral W_a e M são desprezíveis, em face das outras formas de energia; se introduzirmos a razão de Bowen, B , atrás definida, podemos escrever a seguinte expressão que envolve a evaporação:

$$LE = \frac{F - G}{1 + B}$$

Analogamente, para o calor sensível, tem-se:

$$H = (F - G) \frac{B}{1 + B} \text{ ou } G = H/LB$$

A evaporação, E , pode assim obter-se a partir de medições micrometeorológicas de F e de G , desde que se conheça B .

Ora, parece que isto não adiantaria muito, porque também B se não conhece, visto que envolve E que queremos determinar. Mas vamos mostrar que se pode obter B , sem ter que se conhecer os fluxos de água e de calor, através da superfície do solo, ou das plantas, re-

correndo à termodinâmica e à difusão turbulenta. Quando se pode admitir que as constantes de difusão do calor e da humidade são iguais, vem para a razão de Bowen:

$$B = \frac{H}{LE} = \frac{c_p}{L} \frac{\delta T}{\delta q}$$

em que q é a humidade específica, dada por $q = 0,622 e/P$ (P a pressão atmosférica e e a tensão do vapor). Se fizermos figurar na expressão anterior a tensão do vapor, notando que $\delta q = 0,622 \frac{\delta e}{P}$, vem

$$B = \gamma \frac{\delta T}{\delta e}$$

em que o parâmetro γ é dado por:

$$\gamma = \frac{p c_p}{0,622L}$$

O valor da constante γ vale 0,61 quando $p = 1000$ mb. Os valores de $\frac{\delta T}{\delta e}$ são dados, aproximadamente, pelo declive da curva de saturação da água.

6.2. Método do balanço hídrico

Este método assenta, pura e simplesmente, na equação clássica da Hidrologia, resolvida em ordem a E :

$$E = R - (\Delta S_p + \Delta S + r_s + r_u)$$

Numa bacia hidrográfica, para um intervalo de tempo suficientemente longo, podem desprezar-se alguns termos na expressão anterior e, numa primeira aproximação, tem-se:

$$\begin{aligned} E &= R - r \\ &= R (1 - C) \end{aligned}$$

sendo C o coeficiente de escoamento.

Esta expressão é muito expedita numa análise imediata e preliminar do comportamento dos elementos hidrológicos numa bacia, desde que se conheça o coeficiente de escoamento. Este depende, entre outras, das características pedológicas e geológicas da bacia e da cobertura vegetal, do tipo de vegetação, etc.

CAPÍTULO VI

**A ÁGUA, AGENTE MODELADOR
DO CLIMA E DO AMBIENTE**

1. O CLIMA, COMPONENTE ESSENCIAL DO AMBIENTE

O clima não é mais do que um dos elementos componentes do ambiente. De facto, condiciona a vida e o habitat dos organismos vivos. Muitas espécies da flora e da fauna adaptam-se a certos tipos de clima e não sobrevivem em climas diferentes. O clima é, portanto, factor decisivo da paisagem vegetal e uma das causas determinantes dos tipos de espécies animais que predominam numa dada região. O clima modela a ecologia e condiciona a vida à superfície da Terra.

É o clima que determina, em parte, a formação e a utilização dos solos e delimita as regiões aráveis ou inóspitas. O clima é factor determinante da agricultura e de toda a geografia humana. É o clima que faz os desertos, as estepes, as tundras e as florestas.

É o clima que activa a ascensão e a prosperidade dos povos e que, outras vezes, provoca o seu declínio.

As grandes variações do clima modificaram as formas de utilização dos solos, os tipos de culturas e as formas de exploração dos mares e dos lagos.

Em síntese, o clima modela o ambiente natural, condiciona a qualidade de vida do homem e deixa uma marca profunda nos seus hábitos e na sua maneira de ser.

O clima constitui fundamentalmente um recurso natural precioso. É um património que é essencial conhecer e que se deve preservar e amar, a fim de garantir a sua qualidade.

Mas o clima não é senão um estado de quase equilíbrio em que se encontram envolvidos todos os subsistemas do sistema climático. É a interacção entre os vários subsistemas que leva aos processos termodinâmicos e de transporte que ali ocorrem. Todavia, a interacção só é possível devido aos dois factores fundamentais que são a

cascata da energia, iniciada com a radiação solar, e a cascata da água que se manifesta no ciclo hidrológico.

É o Sol, que nos alumia e aquece, e a roda da água, sempre a girar, que constroem o clima que, por sua vez, contribui para a formação do ambiente. As cascatas da energia e da água são linhas de crédito, que o clima contabiliza e administra, de «forma sábia e prudente», para manter o ambiente e a vida que nele se desenrola.

As cheias, as inundações e as secas constituem, por assim dizer, rupturas transitórias da contabilidade climática e que resultam de anomalias da circulação geral da atmosfera. E estas nem sempre são fáceis de prever. As secas do Sahel, na década dos anos 70, alteraram profundamente o ambiente daquela região, pelas repercursões que tiveram na paisagem, na flora e na fauna e, sobretudo, na qualidade de vida das populações.

2. A ÁGUA, A ENERGÉTICA DA TERRA E O CLIMA

A acção da água é decisiva para a caracterização do clima e para a suavização do ambiente. Com efeito, o clima de um local, ou de uma região, é caracterizado por um certo número de grandezas físicas, que se designam por *elementos climáticos*, dos quais os mais importantes são a temperatura e a precipitação. Os outros elementos, como os ventos dominantes, a pressão atmosférica, a humidade do ar, a nebulosidade, etc., são elementos secundários. Por outro lado, o clima resulta dum conjunto de condições, que constituem os *factores do clima*.

Os factores do clima podem classificar-se em factores cósmicos gerais, externos ao sistema, e factores gerais internos. Os primeiros compreendem a radiação solar, a distância da Terra ao Sol, a geometria e a inclinação do eixo do Globo terrestre e o seu movimento de rotação. Os segundos compreendem a existência e a constituição da atmosfera, a circulação geral planetária, as diferenças de comportamento termodinâmico dos gelos, dos continentes e dos oceanos, a fisiografia dos continentes, como o relevo, os lagos, a cobertura vegetal, a influência dos oceanos, etc.

A água intervém decisivamente nos factores internos, nos quais

tem um papel preponderante, devido à possibilidade da sua existência nas três fases: sólida, líquida e gasosa. Esta situação é a única nos planetas do sistema solar. No planeta Vénus a água só pode existir na fase gasosa, enquanto que em Marte e noutros planetas só se pode observar na fase sólida.

A possibilidade da existência das três fases é uma consequência das temperaturas que se observam na atmosfera e à superfície do Globo. Para as temperaturas dominantes na atmosfera o vapor de água condensa. A quantidade de vapor de água, que existe na atmosfera, é muito variável e depende também da temperatura. Se a temperatura média da Terra fosse mais elevada, os oceanos evaporavam-se e a composição da atmosfera da Terra seria muito diferente, devido à adição à atmosfera de uma grande quantidade de vapor. De facto, se toda a água dos oceanos se evaporasse o vapor de água passaria a ser o principal componente da atmosfera. Os seus valores seriam 500 vezes superiores ao do azoto e a pressão atmosférica à superfície da Terra seria 250 vezes maior do que a actual. Basta fazer um pequeno exercício de reflexão, notando que a massa de água dos oceanos é cerca de $1,4 \times 10^{21}$ kg, enquanto que a atmosfera é apenas $5,29 \times 10^{18}$ kg.

As propriedades físicas das várias fases da água são muito diferentes. Essas diferenças de comportamento são particularmente importantes para a radiação solar recebida e para a radiação terrestre infravermelha emitida pela atmosfera e pelo Globo. Assim o vapor de água é um forte absorvente da radiação infravermelha terrestre, mas é relativamente transparente para a radiação solar. As nuvens são fortemente opacas para a radiação infravermelha planetária, ao mesmo tempo que reflectem uma grande parte da radiação solar que nelas incide. Na fase líquida a água absorve a radiação solar, quase como um sólido húmido. Na fase sólida (gelo, neve, etc.) a radiação solar incidente é fortemente reflectida, devido aos valores elevadíssimos do albedo, contribuindo para um arrefecimento substancial do ar vizinho.

O desenvolvimento e a evolução da atmosfera da Terra conduziram a valores moderados da pressão atmosférica (1013,25mb) e da temperatura do ar, à superfície, (15°C), devido à formação dos oceanos.

Analisemos mais algumas consequências imediatas da existência da água, para o clima e para o ambiente.

Como vimos, o vapor de água é, praticamente, transparente para a radiação solar visível, mas é um forte absorvente da radiação emitida pelo Globo na banda do infravermelho. A energia radiante absorvida pelo vapor de água da atmosfera é depois reemitida e uma parte é enviada de novo para o Globo. Esta energia vai ser absorvida e vai aquecer as camadas inferiores da atmosfera e da superfície do Globo, provocando um aumento da temperatura do ar. Esta passa, assim, a ter valores mais elevados do que teria, se não houvesse a absorção da radiação infravermelha pelo vapor de água da atmosfera, tornando o ambiente muito mais ameno durante a noite.

O vapor de água funciona como um tampão para a energia do Globo terrestre, exactamente como se se tratasse da cobertura de vidro de uma estufa. De facto, o vapor é praticamente «transparente» para a radiação solar visível, e «opaco» para a radiação infravermelha terrestre. Tudo se passa como se a energia solar fosse apanhada por um dispositivo de ratoeira, constituído pelo vapor de água para onde é fácil entrar e difícil de sair. A radiação solar, depois de absorvida, vai aquecer o Globo, que passa a emitir radiação terrestre infravermelha, que se vai acumulando sucessivamente nas camadas inferiores da atmosfera, devido à forte absorção do vapor de água (e do dióxido de carbono).

Por isso, se designa, com propriedade, por efeito de estufa, a acção que o vapor de água tem na disposição do balanço energético da Terra.

Os oceanos, devido ao valor elevado do calor específico da água e à grande penetração da radiação solar incidente, constituem grandes reservatórios de energia do sistema climático, contribuindo como um factor de moderação do clima. Os oceanos cedem calor às massas de ar, em contacto, que vão aquecer as regiões mais frias e fornecem o calor necessário para a evaporação contínua da água. Os oceanos funcionam como um regulador e um agente moderador do clima.

A água é de importância fundamental no balanço energético da atmosfera e de todo o Globo. O calor latente associado às transições de fase, quando é libertado, depois da condensação, na atmosfera, constitui uma das principais fontes de energia da atmosfera, ao mesmo tempo que a emissão de energia radiante, na banda do infravermelho, constitui um sumidouro. As nuvens têm um papel decisivo no balanço da radiação solar por causa do calor elevado do seu al-

bedo, isto é, da fracção da quantidade de radiação solar incidente, que é reflectida pelas nuvens. Esta energia reflectida não participa na energética da Terra.

Podemos, assim, afirmar que a água, depois da atmosfera, é o factor interno do clima mais proeminente. Na verdade, condiciona e comanda toda a energética do Globo e da atmosfera, através da absorção da radiação infravermelha pelo vapor de água e da radiação solar pelos continentes e pelos oceanos e, ainda, através do albedo dos gelos e das nuvens. Além disso, as transições de fase, com os calores latentes respectivos, são também de grande importância no balanço energético do Globo. Logo, a água sendo um agente modelador da acção da radiação solar e da radiação terrestre, determina a distribuição da temperatura no Globo. Por outro lado, através do ciclo hidrológico fixa a distribuição da precipitação, que é outro elemento climático fundamental. Em síntese, é a água que determina as grandes zonas climáticas da Terra. As nuvens e a precipitação, com as temperaturas e os ventos, constituem de facto os elementos climáticos fundamentais!

3. A ÁGUA FACTOR DA DINÂMICA DO SISTEMA CLIMÁTICO

Se a atmosfera, por um lado, e os outros subsistemas do Globo, por outro, constituíssem duas entidades separadas, a radiação solar e terrestre e a condução do calor não poderiam, só por si, estabelecer o balanço energético do Globo, nem determinar as zonas climáticas da Terra. Com efeito, devido à forte absorção da radiação solar pelo Globo, comparada com a fraca absorção da atmosfera, a superfície do Globo passaria a ter um excesso de energia, com um sobreaquecimento enquanto que a atmosfera livre apresentaria um défice muito acentuado, por causa da sua forte emissividade para a radiação infravermelha.

Todavia, a atmosfera e o Globo são sistemas acoplados, através da transferência de calor sensível e da circulação da água. Do excesso de energia absorvida pela superfície do Globo, cerca de 20% são consumidos na evaporação da água, à superfície. Esta energia é

transferida para a atmosfera sob a forma latente (quantidade de calor absorvida ou emitida, sem variação de temperatura, na transição de fase da unidade de massa de uma substância), quando se dá a condensação. Outra parte (cerca de 7%) é transmitido à atmosfera sob a forma de calor sensível (calor adicionado a um corpo com alteração da sua temperatura).

O ciclo hidrológico vai, por isso, constituir um factor fundamental na caracterização do clima e em toda a sua dinâmica.

Devido à assimetria latitudinal da absorção da radiação solar e à pequena variabilidade em latitude da radiação infravermelha emitida, há um excesso de energia nas regiões tropicais e um défice nas regiões polares. Logo a atmosfera fica sujeita a uma circulação da fonte quente para a fonte fria. A circulação é depois modificada por outros factores, como a geometria e pelo movimento de rotação do Globo, e, ainda, pela fisiografia da superfície e pela natureza termodinâmica das condições fronteira.

Devido à interacção da atmosfera com os oceanos, estes recebem uma parte da quantidade do movimento da circulação geral da atmosfera, originando o grande sistema das correntes marítimas e, numa escala menor, as vagas e a ondulação. Podemos pois, em face da forte interacção entre os dois subsistemas, atmosfera (\mathcal{A}) e oceanos (\mathcal{O}), e da sua grande mobilidade, tão diferente da dos outros subsistemas do sistema climático, considerar um subsistema climático especial $\mathcal{A} \cup \mathcal{O}$ e designá-lo por *geofluido*. Tomado em sentido lato, este fica animado pela circulação geral conjunta, à escala planetária, constituída pela circulação geral da atmosfera, mais rápida, e pelo sistema dos grandes giros oceânicos, mais lentos.

A água, pela sua acção física e química, à superfície, modela a paisagem e, de acordo com a topografia e a natureza geológica, provoca modificações nas formas do relevo e nas transformações nos solos. A água origina primeiro e depois transporta e deposita quantidades enormes de sedimentos causando alterações profundas na fisiografia do Globo. É por isso que a água é um agente forte da modelação do Globo e um factor decisivo da Geomorfologia.

A água, em conjunto com a radiação solar, com os ventos, com as variações de temperatura e com a cobertura vegetal, constitui o grande factor que contribui para o estabelecimento do equilíbrio ecológico, quer em sentido transiente, quer em regime quase permanente.

A água move-se nos aquíferos subterrâneos até ressurgir em nascentes e em fontes, ou se lançar nos lagos e nos rios, constituindo o caudal de fundo que mantém os cursos de água durante as estações secas. Uma tal descarga determina uma circulação contínua da água nos aquíferos, que é compensada pela infiltração e percolação das águas de superfície, que torna possível a recarga dos aquíferos.

A infiltração e a percolação estabelecem a ligação entre a fase superficial do ramo terrestre e a sua fase subterrânea, desempenhando um papel análogo ao da evaporação e da precipitação na ligação do ramo terrestre superficial e o ramo aéreo do ciclo hidrológico.

A circulação geral da atmosfera e a água são o factor determinante da distribuição das grandes zonas climáticas da Terra, pelo papel decisivo que têm na geração e na distribuição da precipitação e na caracterização local e regional da temperatura. Com efeito, a circulação geral da atmosfera, com os seus vários regimes, determina, fundamentalmente, as regiões desérticas e semiáridas e as regiões chuvosas do globo. As primeiras observam-se nas regiões que estão sob a influência da circulação dos grandes anticiclones subtropicais, principalmente dos bordos leste, em que a subsidência (movimentos descendentes) é muito intensa. A subsidência é acompanhada por uma compressão adiabática, que conduz a um aquecimento, que faz diminuir, por um lado, a humidade relativa da atmosfera e aumentar a evaporação. Por outro lado, a subsidência aumenta a estabilidade estática da atmosfera impedindo, portanto, a formação de nuvens e da precipitação.

As regiões chuvosas do Globo, pelo contrário, observam-se onde predominam os movimentos verticais ascendentes da atmosfera de origem mecânica ou térmica. No primeiro caso, é o que se verifica com a subida gradual das massas de ar húmido e quente ao longo das superfícies frontais polares, ou ao longo de barreiras de montanhas, ou ainda o que se observa com a convergência de ar nas camadas inferiores da atmosfera. No segundo caso, há que considerar a convecção de origem térmica e dinâmica que se forma na camada limite planetária e se estende por vezes até níveis muito elevados devido ao contacto com a superfície fortemente aquecida. O primeiro caso é muito comum nas regiões das latitudes médias, onde domina a frente polar enquanto que o segundo ocorre, principalmente, nas regiões tropicais e equatorial ao longo da Frente Internacional de Convergência (FIC).

O movimento ascensional constitui um ingrediente dinâmico, essencial, nos mecanismos da formação da precipitação. De facto, a subida de ar origina uma expansão adiabática, que é acompanhada por um arrefecimento que leva à condensação e à formação de nuvens. Além disso, o movimento vertical aumenta a instabilidade da atmosfera o que permite a penetração das nuvens até níveis muito elevados, ultrapassando o nível de congelação, factor importantíssimo para a precipitação.

A alternância dos regimes da circulação geral da atmosfera constitui um factor decisivo na história climática da Terra, pela acção que tem no ramo aéreo do ciclo hidrológico. Este, por sua vez, condiciona toda a dinâmica da distribuição e da evolução, no decurso dos tempos, dos recursos hídricos, devido às implicações decisivas que tem nos balanços mássico e energético da oceanosfera e da criosfera.

As extensões da criosfera e dos oceanos e das regiões desérticas, áridas, semiáridas e chuvosas da Terra, são determinadas pela temperatura do ar e pela disponibilidade em água utilizável do ciclo hidrológico. Mas, a água disponível é controlada pela distribuição espaço-temporal da precipitação, que, por ocorrer na atmosfera, é, em última análise, comandada pela circulação geral. No que se refere à temperatura, já sabemos que a sua distribuição no Globo é condicionada pelas circulações gerais da atmosfera e dos oceanos, que transportam o excesso da radiação solar recebida na zona compreendida entre 34°N e 34°S, para as regiões de latitudes mais elevadas, através do fluxo meridional da entalpia.

Por isso, a radiação solar, a circulação geral da atmosfera e a água constituem os factores predominantes que regem o comportamento do sistema climático, quando este é tomado *in toto*, incluindo, portanto, a atmosfera, a criosfera, a hidrosfera, a litosfera e a biosfera. Como qualquer destes componentes constitui um subsistema termodinâmico não isolado e aberto para a substância água, é através da sua circulação, isto é, do ciclo hidrológico, que se dá a interacção entre os vários componentes do sistema climático. É desta interacção que resulta o estado termo-hidrodinâmico de quase equilíbrio dominante da atmosfera, que constitui o clima.

Em face das considerações feitas, somos levados a concluir que a água constitui, na verdade, um factor decisivo na dinâmica do ambiente. De facto, é o ramo aéreo do ciclo hidrológico, condicionado

pela circulação geral da atmosfera, que ao forçar a circulação no ramo terrestre do ciclo, determina toda a dinâmica da circulação da substância água no sistema climático. Por outro lado, sob a fase vapor, determina o balanço da energética da Terra.

4. A PRECIPITAÇÃO E O CLIMA

4.1. Factores da precipitação

A acção exclusiva da radiação solar, nas condições ideais da superfície do Globo ser homogênea e uniforme da temperatura estar em repouso, teria como efeito uma distribuição zonal uniforme da temperatura média do ar à superfície, com diminuição gradual da temperatura desde o equador até aos pólos. A esta distribuição simples, conceptual, da temperatura do ar sobrepõe-se uma distribuição, igualmente simples, da pressão atmosférica. Na região equatorial a pressão é relativamente baixa, os ventos são fracos e as correntes ascendentes de ar originam nuvens de convecção como cúmulos (Cu^2) e cúmulo-nimbos (Cb), que produzem precipitação forte e, por vezes, com trovoadas.

Para um e outro lado do equador até 30° de latitude, dominam os ventos alisados à superfície, que sopram de nordeste (NE) no hemisfério Norte, e de sudeste (SE) no hemisfério Sul. Do encontro dos dois sistemas de ventos resulta uma forte convergência e a criação da Frente Internacional de Convergência (FIC). Como é evidente, com a convergência horizontal do ar na base da atmosfera, o ar tem de se «escapar para cima», desenvolvendo fortes movimentos verticais ascendentes.

Ao longo desta desenvolvem-se fortes movimentos convectivos ascensionais, que produzem nuvens de desenvolvimento vertical, com precipitações muito abundantes, quase diárias, e trovoadas muito frequentes. Pode dizer-se que a FIC é o principal agente modelador das condições meteorológicas na região intertropical. É nesta região que têm origem os rios de grande caudal, como o Amazonas, o Congo, o Nilo, o Ganges, o Indu, o Yangtzé e onde se encontram as grandes florestas virgens. Na região equatorial os ventos são

fracos e variáveis («doldrums») e a pressão atmosférica um pouco abaixo do valor médio normal (1013 mb).

À medida que nos aproximamos das latitudes tropicais, a Frente Internacional de Convergência deixa de varrer essas zonas, ou mesmo de as atingir com tanta frequência, a pressão atmosférica aumenta, os ventos sopram com mais intensidade e de forma persistente, constituindo, como dissemos, os alisados de NE, no hemisfério Norte e de SE no hemisfério Sul.

A deslocação para norte ou para sul da Frente Internacional de Convergência, acompanhando o movimento anual aparente do Sol, vai influenciar, decisivamente, o clima das regiões em que se faz sentir a sua influência. Pode dizer-se que as grandes secas verificadas no Sahel e em toda a África subtropical, desde o Senegal, até ao Sudão e à Etiópia, resultam da FIC não se ter deslocado suficientemente para norte (ou para sul, no hemisfério Sul). Vemos mais que a estação chuvosa nestas regiões coincide com o Verão.

Em cada hemisfério, na zona de 30° de latitude, há uma zona de altas pressões que se designam por anticlones, que ocupam grandes extensões sobre os oceanos. Nestes anticlones verificam-se movimentos descendentes (subsidência). Com este movimento descendente, verifica-se uma compressão adiabática, com um aumento da temperatura e a dissipação das nuvens; por isso, o céu apresenta-se limpo, há bom tempo e calma, ou ventos fracos. Os movimentos verticais descendentes, associados à forte subsidência nos anticlones subtropicais, fecham a circulação celular meridional (de Hadley), uma em cada hemisfério, cujo ramo ascendente se desenvolve ao longo da Frente Internacional de Convergência.

Para a zona entre os 45° e 60° de latitude podem soprar os ventos de oeste provenientes da zona bordadura dos anticlones subtropicais e ventos de noroeste provenientes da zona das depressões subpolares. Devido à confluência destas circulações forma-se a Superfície Frontal Polar, onde as massas de ar quente e húmido em contacto com massas de ar polar frio sobem por estas, como já referimos. Assim, originam-se movimentos verticais que com a expansão adiabática e o inerente arrefecimento provocam uma forte nebulosidade e precipitação, ao longo da superfície frontal, com ar polar frio por baixo e o ar quente e húmido, por cima.

A distribuição planetária da pressão e dos ventos associados apresenta uma variação anual, que se traduz por uma migração pe-

riódica das duas frentes polares, uma em cada hemisfério, e da frente intertropical, para norte e para sul, das suas posições médias.

A frente polar do hemisfério Norte atinge a posição extrema para o lado do pólo em Julho, para o lado do equador em Janeiro, com uma amplitude bastante grande. No hemisfério Sul as variações são quase simétricas, com menor amplitude devido ao efeito dos factores regionais (menos continentes e mais oceanos).

A frente intertropical atinge as posições extremas em Agosto no hemisfério Norte e em Fevereiro no hemisfério Sul e a distância entre estas duas posições é máxima na região Ásia-Austrália e mínima nas regiões do Atlântico e no Pacífico.

As flutuações anuais da frente intertropical de convergência são fundamentais para definir as estações das chuvas e, portanto, como é óbvio, para a caracterização dos climas de zonas semiáridas de transição como a Sahel, etc. Em anos em que a frente intertropical não atinge as latitudes mais elevadas são anos de seca nas regiões de transição.

4.2. A precipitação e a caracterização dos climas

A consideração dos factores climáticos gerais (radiação solar; forma esférica do globo; movimento anual de translação da Terra; a inclinação do eixo de rotação da Terra; existência de distribuição dos continentes e oceanos) explica a existência de cinco grandes zonas climáticas: uma zona tórrida, duas zonas temperadas e duas zonas frígidas.

Se tomarmos por base o valor médio anual da quantidade de precipitação R , o clima pode ser *desértico* (se R é inferior a 125 mm); *árido* se R está compreendido entre 125 mm e 250 mm; *semiárido* se R varia entre 250 mm a 500 mm; *moderadamente chuvoso* se R está compreendido entre 500 mm e 1000 mm; *chuvoso* se R está compreendido entre 1000 mm e 2000 mm e *excessivamente chuvoso* se R é superior a 2000 mm.

Se considerarmos a temperatura média anual T da atmosfera como critério, o clima classifica-se em *glacial* ($T < 0^{\circ}\text{C}$), *frio* ($0 < T < 10^{\circ}\text{C}$), *temperado* ($10 < T < 20^{\circ}\text{C}$) e *quente* ($T > 20^{\circ}\text{C}$). Se a variação anual da temperatura, ΔT , for inferior a 10°C o clima é

oceânico, se ΔT estiver compreendido entre 10° e 20°C o clima é *moderado*; se ΔT for superior a 20°C é *continental*.

O clima do continente português é temperado ou frio nas terras altas; moderado, oceânico no litoral do centro, seco, variando de semiárido no litoral do Algarve e na Mancha Branca de Pinhel, até excessivamente chuvoso no Alto-Minho.

Nos Açores o clima é temperado, oceânico e vai de moderadamente chuvoso a chuvoso; na Madeira é seco e moderadamente chuvoso.

4.3. Distribuição planetária da precipitação e as zonas climáticas

A distribuição planetária da precipitação, tendo em vista as considerações gerais que fizemos no parágrafo anterior, é condicionada pela circulação geral da atmosfera, pelas superfícies frontais polares e pela frente intertropical de convergência.

É certo que a matéria prima da precipitação é a água fase vapor, mas o seu complexo fabril é constituído pelas nuvens. No entanto, a «arquitectura e a tecnologia da nebulosidade» e, portanto, a rentabilidade das fábricas são determinadas pelos movimentos da circulação geral. Têm especial relevância os movimentos verticais que, embora, com valores muito pequenos, apenas da ordem de cm/s , são decisivos em todo o processo. Assim, os movimentos ascendentes são o factor determinante na construção, na forma e na manutenção do sistema nebuloso e, finalmente, nos mecanismos de desencadeamento da precipitação. Pelo contrário, os movimentos subsidentes, persistentes, teimosos e contínuos, ou destroem o sistema nebuloso, com o aquecimento da atmosfera, dissipando as nuvens pela evaporação, ou limitam a edificação dum sistema nebuloso condigno, impedindo que os topos das nuvens atinjam níveis suficientemente elevados. Quando muito permitem uma arquitectura «sem rasgos», achatada e confinada, de estrato-cúmulos, que constituem uma decepção para a precipitação.

É evidente que a formação das nuvens e a precipitação resultam das mesmas causas, mas a precipitação é o resultado do processo numa fase muito mais avançada.

Sendo assim, podemos dizer, em termos gerais, que a precipitação na região equatorial deve ser abundante porque as massas de ar

predominantes são quentes e húmidas (massa de ar *E*) e os movimentos convectivos verticais, associados à frente intertropical de convergência, muito intensos. Além disso, devido à radiação solar absorvida e à forte evaporação que origina, formam-se nuvens convectivas (Cu e Cb) que produzem fortes fenómenos de instabilidade, como aguaceiros e trovoadas locais.

Nas regiões subtropicais, com as correntes atmosféricas subsidentes de compensação, a compressão adiabática vai aumentar a temperatura do ar descendente a afastar a atmosfera da saturação, que fica mais seca, fomentando e acelerando a evaporação, o que conduz a uma nebulosidade muito menor. Mais em direcção aos pólos, nas regiões das latitudes médias e elevadas, as depressões que acompanham as superfícies frontais polares respectivas vão originar movimentos verticais ao longo das superfícies frontais e causar forte nebulosidade e precipitação de chuva ou de neve devido, principalmente, à ascensão das massas de ar tropical do sector quente, que atingem níveis elevados e, portanto, temperaturas muito baixas. Nas regiões polares, propriamente ditas, a precipitação volta a ser escassa devido ao movimento subsidente que predomina nas regiões anticiclónicas polares e ao baixo teor em humidade das massas de ar ártico e polar que ali predominam.

Em termos gerais, podemos dizer que o Globo se encontra dividido nas grandes zonas climáticas seguintes:

- a) Zona equatorial, onde predomina a frente intertropical de convergência, com forte precipitação e temperatura elevada que produzem um clima quente e húmido. É a zona das grandes florestas tropicais e das nascentes dos rios de grande caudal (Amazonas, Congo, etc.);
- b) As zonas subtropicais, uma em cada hemisfério, onde predominam os grandes anticlones semipermanentes com pressões atmosféricas elevadas e forte subsidência e, por isso, com fraca precipitação. É nesta cintura de altas pressões que se formam os grandes desertos da Terra. Nestas zonas observa-se um clima árido nas regiões centrais dos grandes anticlones, ou semiárido e quente nos bordos dos anticlones;
- c) As zonas das latitudes médias e elevadas onde a precipitação

associada à frente polar é abundante, definindo regiões de clima temperado e húmido;

- d) As zonas das calotas polares em que a temperatura é baixa e a precipitação escassa, com climas frios e semiáridos (tundra, de solos gelados ou de neves e gelos permanentes);
- e) Zonas de transição com precipitação de maior variabilidade, como as regiões mediterrânicas em relação à frente polar e as regiões do Sahel em relação à frente intertropical de convergência.

CAPÍTULO VII

**A ÁGUA FACTOR, DE PROGRESSO
E DE DESENVOLVIMENTO**

1. O PROBLEMA DA ÁGUA EM ESCALA MUNDIAL

Como se afirma na carta Europeia da Água (Conselho da Europa, 1968): «Não há vida sem água. A água é um bem precioso, indispensável a todas as actividades humanas.» «A água não tem fronteiras. É um bem comum que impõe uma cooperação internacional.»

Dada a circulação contínua e fechada da substância água no ciclo oceano-atmosfera-continente-oceano, esta, ao contrário do que se passa com os outros recursos naturais (petróleo, carvão, gás natural, etc.), apresenta uma característica única: a sua massa global, qualquer que seja a frequência e a intensidade da sua utilização pelo homem, pelas plantas, etc., mantém-se praticamente constante no nosso planeta.

Pode no entanto mudar de fase e, cada fase, já não é constante. O aumento da quantidade de água numa fase é compensada pela diminuição da massa das outras. Assim, em períodos glaciários, com o aumento da criosfera, o nível médio dos mares baixa.

Mas, considerando a água apenas na fase líquida, com a sua utilização, a qualidade deteriora-se. De facto, a água não constitui uma dívida graciosa e ilimitada da natureza. O homem, persuadido de que a água se renova e recupera indefinidamente tem vindo a fazer, durante séculos, um uso inconsiderado deste bem insubstituível e tão precioso. A continuar assim, a deterioração da água pode vir a transformar-se num problema socioeconómico dos mais graves e urgentes do nosso tempo. De facto, se a Terra fosse comparada a uma laranja média, toda a água da Terra (oceanos, glaciares, águas subterrâneas, lagos, rios, atmosfera) seria representada, na mesma escala, apenas por uma gota minúscula depositada por um conta-gotas delicado.

A água que o homem consome não é uma água qualquer; tem de ser doce e possuir uma determinada qualidade. Ora, como vimos, o maior reservatório de água é constituído pelos oceanos em que a água é fortemente salgada. Para se utilizar é preciso proceder à sua dessalinização o que, em condições naturais, é feito pelo sistema gigantesco natural de destilação que é o ciclo hidrológico. Por meios artificiais é economicamente pouco viável, pelos custos elevados que envolve.

Como referimos anteriormente, (Fig. 3), as reservas globais de água, águas subterrâneas e atmosfera, elevam-se a $33,6 \times 10^6$ quilómetros cúbicos (km^3) constituindo cerca de 2,7% da massa total da água da hidrosfera. Mas as reservas, directamente utilizáveis, são muito mais reduzidas, porque a parte de leão da água doce do Globo se encontra nos glaciares e calotas geladas polares, ou seja, cerca de $25 \times 10^2 \text{ km}^3$ o que corresponde a 70% do total, e muito difícil de explorar na prática. De toda a água do Globo só 0,65%, repartidos pelas águas subterrâneas, pelos lagos, mares interiores, rios e pela atmosfera, constituem a reserva de recursos hídricos potenciais para o homem. A exploração das águas subterrâneas ($8,4 \times 10^6 \text{ km}^3$) que, nalgumas regiões, constitui a fonte principal de abastecimento, apresenta limitações, porque não se encontram uniformemente repartidas. Por outro lado, o volume de água extraído não deve exceder o que resulta da recarga possível, pela infiltração da água da precipitação natural e das águas utilizadas no quadro das actividades do homem.

Por isso, na maior parte das regiões do Globo os rios e os lagos são e continuarão a ser, por muito tempo, a principal fonte da água necessária ao homem. E as reservas utilizáveis, longe de serem inesgotáveis, correspondem a cerca de metade da água dos rios e dos lagos (a $100\ 000 \text{ km}^3$), ou seja 28% dos recursos em água doce, isto é, 0,007% da massa total da água da Terra. Os outros $100\ 000 \text{ km}^3$ correspondem à água salgada de vários lagos e mares interiores.

A quantidade de água evaporada dos oceanos é $361\ 000 \text{ km}^3/\text{ano}$, enquanto que a evaporada dos continentes é cerca de $62\ 000 \text{ km}^3/\text{ano}$. Por outro lado, a precipitação sobre os oceanos estima-se em $324\ 000 \text{ km}^3/\text{ano}$ e em $99\ 000 \text{ km}^3/\text{ano}$ sobre os continentes. Por conseguinte, os oceanos exportam para os continentes $37\ 000 \text{ km}^3/\text{ano}$ de água sob a forma de vapor e que é transportada pela circulação geral da atmosfera.

Este valor de água condensa-se e cai sob a forma de precipitação sobre os continentes (99 000 km³/ano), que depois se deposita, se escoia e se infiltra de várias maneiras e 26 000 km³/ano retornam à atmosfera por evaporação das águas superficiais do solo e da transpiração das plantas. Os restantes 37 000 km³ por ano retornam aos oceanos, através do escoamento dos grandes rios e das águas subterrâneas, fechando assim o ciclo hidrológico oceano-atmosfera-continente-oceano.

Dos 37 000 km³ por ano, que constituem os recursos potenciais em água doce disponível, só é utilizável a parte estável do escoamento, que é da ordem de 14 000 km³. O escoamento que é regulado pelo armazenamento subterrâneo (11 900 km³), pelos reservatórios artificiais construídos pelo homem (1840 km³) e por alguns lagos (260 km³), corresponde a um terço da água transferida dos oceanos para os continentes. De facto, a distribuição dos grandes rios nos vários continentes é extremamente desigual e alguns deles correm em regiões inacessíveis. Por isso, só uma fracção dos 37 000 km³ é utilizável, pelo menos enquanto não for possível realizar obras grandiosas de transferência. Nas condições actuais, o homem controla apenas 3000 km³ por ano para satisfazer as suas necessidades. Notando que cerca de 5000 km³ do escoamento estável se perde em terras inóspitas, restam à volta de 6000 km³ por ano, como recurso em água para o desenvolvimento e crescimento futuros.

O escoamento fluvial, reconstituído todos os anos pelas precipitações atmosféricas, representa, portanto, os recursos renováveis em água e que poderemos utilizar, sem risco de tocar nos recursos perenes, como se fosse o juro do capital hídrico que se quer manter. Por isso, a quantidade de água disponível para a população da Terra fica condicionada por este valor enquanto não for prático, possível e económico aumentá-lo por outros processos. Entre estes, referimos a dessalinização da água dos oceanos, a utilização dos gelos dos icebergues, ou das calotas da Gronelândia e da Antárctica, por exemplo.

A utilização excessiva da água «invisível» subterrânea, como se fosse uma exploração mineira, atingiu já, nalgumas regiões, o limite tolerável de utilização, se é que em vários casos não o excedeu já. E continuamos a observar em muitas partes do Globo a extracção crescente da água subterrânea acumulada, muitas vezes, durante vários séculos. E, por vezes, o abaixamento do manto freático é acom-

panhado pela subsidência do solo, levando nalguns casos ao seu colapso.

Os recursos «renováveis» em água doce são, portanto, limitados. Além disso, uma exploração desordenada e atrabiliária dos recursos hídricos, tomados como um dom na natureza, conduziu a um esgotamento e a uma deterioração da qualidade das reservas disponíveis que, por seu turno, prejudicam irreparavelmente os mundos animal e vegetal, destruindo o equilíbrio ecológico da biosfera.

2. A ÁGUA, FACTOR DE DESENVOLVIMENTO

Não se pode conceber qualquer desenvolvimento económico, social e cultural, sem tomar em consideração a água, que assim aparece, como referimos na introdução, como factor decisivo no progresso das sociedades. Mas os problemas da água não são só aqueles que se referem à sua disponibilidade e à sua abundância, mas também os que se prendem com a sua distribuição geográfica e com as taxas de consumo. E o factor determinante no aumento espectacular do consumo de água reside na explosão demográfica actual. A população da Terra que em 1900 era cerca de 1670 milhões de habitantes quase que duplicou em 1975 (3,5 biliões) e prevê-se que venha a ser de 7 biliões em 2015.

Os consumos de água por pessoa variam, entre 900 m³ por ano, numa sociedade rural, e 2700 m³ por pessoa e por ano, numa sociedade altamente industrializada, como a dos Estados Unidos. Aceitando, então, uma capitação média anual da ordem de 1500 m³ por pessoa e por ano, o consumo actual para toda a população da Terra é cerca de 450 m³ por ano. Este consumo global reparte-se da seguinte forma: 48% para a indústria, 42% para a rega, 1% para outros usos agrícolas e 9% para usos domésticos. Parte da água utilizada evapora-se (20% com a indústria e 80% com a agricultura) e parte é lançada como água residual para o meio ambiente.

Para o cálculo das necessidades futuras em água, deve ter-se em conta não só o aumento demográfico, com a subida do padrão de vida a que está directamente ligado o aumento dos níveis de água.

Cálculos recentes mostram que, desde o ano 1900, a utilização de água no mundo aumentou sete vezes, passando de 400 km³ por ano, para 2800 km³ por ano, para satisfazer as necessidades da população, da agricultura e da indústria. A utilização por habitante triplicou durante o mesmo período, o que, em grande parte, se explica pelo aumento das populações urbanas. Enquanto que em 1900 a utilização média por habitante representava 240 m³ por ano, espera-se que no ano 2015 venha a atingir valores da ordem de 1130 m³ por ano. Considerado isoladamente, o consumo da indústria, desde 1900 até 1975, aumentou mais de vinte vezes, passando de 30 km³ por ano para 600 km³ por ano. Na agricultura o consumo, no mesmo período, aumentou seis vezes, passando de 350 km³ para 2100 km³ por ano.

Nas primeiras décadas a seguir ao ano 2000, espera-se que a indústria venha a utilizar 2750 km³ de água por ano e a agricultura 4700 km³ por ano, enquanto que as necessidades domésticas poderão atingir 650 km³/ano. Tudo junto conduz a um consumo global da ordem de 8500 km³. Este consumo representa cerca de 20% dos recursos em água doce no nosso planeta, contidos no escoamento fluvial global.

Mas a utilização deverá, antes, ser comparada com a fracção explorável deste fluxo, isto é, com a parte que pode ser efectivamente utilizada. As variações de precipitação no decurso do tempo e a evaporação, mais ou menos regular, originam variações sazonais do escoamento e mesmo flutuações deste, de ano para ano. O escoamento médio, que corresponde a um valor estável, é cerca de 1200 km³, enquanto que o restante se reparte em caudais irregulares, ou de regime perturbado, designadamente através das cheias.

Além disso, o escoamento fluvial reparte-se geograficamente de forma muito desigual. Basta considerar as grandes zonas climáticas da Terra e as extensas regiões áridas do Globo. Para as regiões habitadas da Terra os recursos renováveis em água doce são da ordem de 12 5000 km³, valor que é da ordem de grandeza dos consumos previstos para o ano 2015.

Mas o problema da água torna-se ainda mais complexo quando se considera a necessidade de manter padrões elevados da qualidade da água, porque a utilização conduz à sua deterioração. A poluição reduz substancialmente as disponibilidades em água, porque à medida que a sua utilização tem aumentado para fins industriais, agríco-

las e outros, gerou-se a sua contaminação. O volume das águas residuais, provenientes da indústria e dos usos domésticos, lançado no ciclo hidrológico atinge 700 km³ por ano e poderá vir a atingir valores próximos de 2000 km³ por ano em 2015. As águas residuais, mesmo as que são purificadas pelos métodos tecnológicos mais modernos, precisam, para serem recuperadas e voltarem a ser utilizadas de novo, ser diluídas em volumes dez vezes maiores (para alguns produtos químicos cem vezes) de água pura, o que mostra o volume enorme da água doce que é necessário mobilizar para se obter a sua reciclagem. A manter-se este ritmo no ano 2015 as operações de depuração poderiam atingir valores próximo das disponibilidades totais actuais. Só a planificação científica, eminentemente pluridisciplinar, dos recursos hídricos e um esforço conjunto, a nível nacional e internacional, na aplicação de medidas sistemáticas contra a deterioração e a poluição, poderão remediar as perspectivas sombrias e críticas que se avizinham.

Um dos processos de suprir a escassez dos recursos em água nas regiões habitadas do Globo é o de trazer os recursos hídricos excedentes dos rios de regiões menos povoadas, que, como referimos, constituem cerca de 50% do total da área do Globo. Seria, afinal, uma operação gigantesca, que exigiria obras de engenharia vultuosíssimas e, por enquanto, quase impensáveis. Seriam verdadeiras operações de cirurgia do Globo, com o desvio de grandes rios e a construção de verdadeiros mares interiores (v.g. transferência de parte do caudal do Congo para o Tchad; desvio do Obi e dos rios setentrionais da Rússia para a formação do grande mar interior a norte do mar Cáspio; desvio de parte das águas do rio Colombia para assegurar a irrigação das terras semidesérticas do Canadá e dos Estados Unidos, etc.).

Outro processo que tem vindo a ser encarado para suprir as carências de água é o do transporte de grandes blocos de gelo da Antárctica para regiões áridas ou inóspitas do Globo, como a Austrália, a Califórnia do Sul e a Arábia. Como se sabe, os icebergues do Ártico são mais irregulares e mais pontegudos e fragmentos, do que os icebergues da Antárctica que têm uma forma tabular, mais estável e, por isso, mais fáceis de transportar.

Mais de 75% da água doce está armazenada nas calotas polares da criosfera. A dessalinização da água do mar é um processo muito oneroso. A produção de água doce pelo transporte de icebergues

começa pelo contrário a ser considerada economicamente competitiva e realizável.

Suponhamos que se pretendia transportar, ou rebocar, um icebergue da Antártica com 1200 m de comprimento, 300 m de largura e com 300 m de espessura. Teria uma massa da ordem de 100 milhões de toneladas. Durante a viagem, em que 9/10 do icebergue estariam mergulhados no oceano durante a viagem, havia uma parte que fundia, da ordem de 20%. Ficavam, mesmo assim, disponíveis cerca de 80 milhões de toneladas de água, ou seja, a quantidade de água necessária para manter uma população de 800 000 habitantes durante um ano, admitindo um consumo médio da ordem de 1000 m³/ano por habitante.

A participação e a colaboração de organizações nacionais e internacionais, governamentais e não governamentais (UNESCO, OMM, OMS, FAO, ICSU, etc.), constituem a condição indispensável para a solução do problema da água da Terra para manter o nosso mundo físico e biológico e para garantir o progresso económico e cultural da humanidade.

3. RESERVAS HÍDRICAS E TAXAS DE CONSUMO

À medida que se tem dado o desenvolvimento industrial e que a urbanização se tem processado a um ritmo até agora desconhecido, começam a tomar grande acuidade todos os problemas relacionados com a *água*, que passa a ser o grande factor, quase determinante, da taxa de crescimento industrial e da capacidade populacional duma região.

Torna-se, por isso, inadiável que se proceda à elaboração de inventários de consumo para os vários fins. Da quantidade total de precipitação caída numa região qual é a fracção que se perde por evaporação? E por escoamento? E por infiltração? Da que é consumida, em que sectores, em que actividades e como se distribui? Pelo sector industrial? Pelo sector agrícola? Pela urbanização? Pelas necessidades humanas?

É evidente que nem toda a água retirada para consumo deve ser utilizada, ou consumida num ciclo único. A água empregada na re-

frigeração industrial, por exemplo, pode ser reutilizada. Já a água utilizada na agricultura, para a rega, é em parte perdida por evapotranspiração e, portanto, não é recuperável, directamente.

Espera-se que, com o aumento da população e dos consumos «per capita», a água retirada, para usos humanos gerais, venha a aumentar de 81% no ano 2015.

Ora, as necessidades humanas, em água, são permanentes e crescentes, enquanto que os recursos hídricos dos rios com escoamento irregular, no decurso do tempo e, portanto, com um regime mais ou menos transiente, são variáveis e desfasados em relação às necessidades e à procura.

Torna-se, por isso, indispensável o armazenamento de água pela construção de barragens, pela constituição de lagos artificiais a fim de constituírem grandes reservatórios, que garantam um consumo permanente. É evidente que surgem perdas inevitáveis por evaporação, devido ao aumento da área livre de exposição. Mas, mesmo assim, espera-se que venha a ser possível, com sistemas apropriados de barragens e de represas, um coeficiente de utilização de quase 90% da água que circula nos vários cursos de água.

Por fim, tem de considerar-se o problema da *qualidade de água*. À medida que a água circula através do solo e das rochas vai dissolvendo alguns dos constituintes, principalmente os de maior solubilidade. Assim, a quantidade de materiais dissolvidos varia com a natureza das rochas, com a quantidade de água circulante, com a sua velocidade, etc. Quando a concentração da água, em sais dissolvidos, excede 0,05 (50 por mil), deixa de ser utilizável para consumo humano, e se for da ordem de 0,2 deixa de ser útil para qualquer outro fim. Vê-se, pois, a importância que tem a inventariação das águas subterrâneas, a avaliação da sua qualidade e o cálculo do caudal possível para que esta reserva hídrica seja usada de forma racional e eficiente, sem a levar à sua exaustão.

A quantidade de água subterrânea é relativamente elevada; é cerca de 3000 vezes a quantidade de água que, num dado instante, circula em todos os rios. Mas a sua utilização é difícil. Por vezes, em regiões da crosta, pouco porosas ou pouco permeáveis, o reabastecimento de poços é tão lento que não é possível, sequer, a utilização das reservas subterrâneas por este processo. A possibilidade da sua utilização exige a existência de um aquífero conveniente, e que simultaneamente constitua um «transportador» de água adequado. A

realimentação dos aquíferos é difícil e lenta, porque a maior parte da água precipitada — a fonte primária de água dos recursos naturais — ou se evapora, ou se escoia para os oceanos pelos rios.

Calcula-se em cento e cinquenta anos o tempo necessário para a realimentação de um aquífero normal a 600 m/800 m de profundidade, se a água fosse removida completamente. Logo, quando se usa a água de um manancial, por bombagem ou por outro qualquer processo, com uma velocidade de consumo superior à de realimentação, estamos, de facto, a transformar a exploração da água subterrânea numa «exportação mineira» com todos os inconvenientes inerentes, e que pode levar a situações muito críticas nalgumas regiões. Deve ter-se presente que o tempo de reconstituição e de realimentação dum aquífero é da ordem de séculos.

A superfície superior de um aquífero — manto freático — pode surgir à superfície, como acontece, por vezes, com alguns lagos, em fontes, etc., ou pode estar a algumas centenas de metros de profundidade.

As águas subterrâneas movem-se muito lentamente, como se constituíssem um grande rio com um curso heterogéneo, pela presença de muitos materiais estranhos, e cujo tempo de residência, até atingir os oceanos, pode ir de horas até milhares de anos.

O manto freático não é horizontal e tende a seguir a topografia da superfície, devido à resistência variável oferecida pelos materiais subjacentes da crosta, que constituem as camadas geológicas. Acima do manto freático há uma zona não saturada de água, em que existe uma quantidade considerável de água sob várias formas e que, genericamente, se designam por *águas vadasas*; na região imediatamente inferior à superfície, em que se desenvolvem as raízes das plantas predomina a *água do solo*, que se mantém principalmente por capilaridade.

As águas vadasas, devido à acção gravítica, vão-se escoando por percolação para níveis inferiores, até atingirem o manto freático e serem incorporadas nas águas subterrâneas. As águas vadasas não se podem considerar um recurso hídrico directo, mas são essenciais para a realimentação e restabelecimento das águas subterrâneas.

*
* *
*

Toda a exposição e toda a análise apresentadas até agora foram feitas partindo da premissa que se mantém o grau de pureza original da água disponível. Ora sabemos bem que não é assim. Às limitações expostas vem agora sobrepor-se o perigo real da poluição das águas que reduz, substancialmente, a sua disponibilidade e pode levar à deterioração acentuada da água como recurso natural, o que poderá pôr em risco a sobrevivência da humanidade. À medida que a utilização das águas tem aumentado, para fins industriais e outros, gerou-se a sua contaminação provocando, não só a destruição ou a deterioração da água já utilizada, como a dos rios ou dos lagos em que é lançada. Uma porção relativamente pequena de água poluída pode destruir e tornar, portanto, não-utilizável mananciais consideráveis de recursos hídricos. O crescimento da população e o seu progresso, com a demanda constante de maiores consumos em água, o que constitui um dos índices mais seguros do desenvolvimento económico, social e até cultural, traz, inevitavelmente, à superfície grandes preocupações para a sociedade. A incapacidade de controlar todos os factores, que conduzem à degradação dos recursos hídricos, pode levar a situações extremamente perigosas em que algumas por serem irreversíveis podem vir a ser quase fatais.

Das considerações feitas resulta um sentido de urgência nas precauções a tomar em todos os problemas que se prendam com a administração e a gestão, tomadas no sentido mais lato, de todos os aspectos que se relacionam com a água, como um recurso natural insubstituível.

4. A ÁGUA E A ENERGIA

4.1. Alguns aspectos preliminares

O termo *energia* começou a aparecer depois de 1807. Os princípios científicos que regem o comportamento da energia só foram estabelecidos na segunda metade do século passado, e, desde então, têm vindo sofrer alguns ajustamentos.

A maior fonte de energia na Terra é a radiação solar. Directa ou indirectamente, vivemos numa atmosfera aquecida pela energia solar; comemos alimentos, cuja existência é devida à conversão, por fotossíntese, da radiação solar. Beneficiamos dum sistema de ventos, de chuva, de rios, todos componentes do ciclo hidrológico, gerado e mantido pela radiação solar. Nas condições actuais mais de 95 % de energia que utilizamos provém dos combustíveis fósseis, que essencialmente são energia solar fossilizada e armazenada. Ainda que a maior parte da energia do Universo seja gravitacional, o homem está, principalmente, dependente da radiação solar e, depois, da energia química e termodinâmica dos alimentos e dos combustíveis.

A energia captada do vento e da água, com velas especialmente projectadas e da água com as rodas hidráulicas, quebraram as limitações às quantidades de energia até então circunscritas ao trabalho animal. Começaram a surgir dispositivos inanimados para a produção de energia, que não necessitavam de alimentação, nem de pausas para descanso e que produziam mais energia por muito menos investimento em homens e materiais.

A civilização ocidental teve um impulso vital com estas inovações a que se juntou a grande revolução na agricultura com o uso da charrua com o cavalo, nos campos férteis da Europa, em vez do arado de madeira tradicional.

Na Idade Média começou a aparecer uma civilização tecnológica na Europa Ocidental, baseada principalmente na energia da água e do vento e na energia da madeira. Essas foram as fontes da energia durante os séculos seguintes, até aos fins do século XVIII com maiores aperfeiçoamentos, é certo. Foi então que apareceram quase simultaneamente a máquina a vapor e o carvão de Coke, descobertas que viriam despoletar a Revolução Industrial no século XIX, como veremos.

4.2. As grandes etapas da energia e a água

Começaremos com a invenção da nora que teve lugar antes da era cristã. A nora permitiu a elevação da água, à custa da corrente da própria água. A nora romana (noria) era constituída por uma grande roda hidráulica munida de pás na periferia, com eixo hori-

zontal, colocado acima duma corrente de água com um caudal regular. A quantidade de movimento do curso de água era transmitido às pás da roda, que assim era posta em movimento. Mais tarde, no Império Romano, surgiu o moinho que com um sistema de engrenagens permitiu a transformação do movimento da corrente de água em movimento de rotação em torno de um eixo vertical. O moinho descrito por Marcus Vitruvius (século I da Era Cristã) e que ainda se pode encontrar nalguns cursos de água de várias regiões de Portugal foi decisivo para o desenvolvimento industrial da Europa. O seu tratado *De Architectura Librum Decimum* foi o grande Manual da Engenharia na Idade Média de que se serviram gerações sucessivas de engenheiros.

Este dispositivo correspondeu a um grande avanço tecnológico. Quando Roma foi invadida pelos Bárbaros, no ano 536, os Romanos tiveram que construir levadas de água subterrâneas para substituir alguns dos aquedutos destruídos, que transportavam a água que movia um sistema comunitário de moinhos. Assim, foi possível continuar a manter o sistema de moinhos, que produziam a farinha necessárias para alimentar a população e que retardou a queda de Roma?

O moinho vetruviano espalhou-se por todo o Império Romano e generalizou-se na Idade Média. O tipo de engrenagens aperfeiçoou-se, e o moinho passou a ser utilizado não só para moer os cereais e produzir a farinha, como para serrar madeira e o mármore, para triturar minérios, para preparar e mover pedras abrasivas, etc. Estas inovações permitiram produzir novos utensílios e novas ferramentas que levaram a grandes progressos industriais como a fiação e a tecelagem.

Claro que este sistema de transformação de movimento de translação em movimento de rotação podia ser realizado pelo homem e por animais. Mas a sua potência era naturalmente pequena e muito mais cara do que se se utilizasse a água corrente.

Pode dizer-se que as rodas hidráulicas constituíram a base do desenvolvimento industrial na Renascença e nos séculos seguintes, antes da Revolução Industrial que viria a surgir nos fins do século XVIII e princípios do século XIX.

A economia do processamento industrial favorecia as ribeiras caudalosas. A economia dos transportes favorecia os rios, os canais e os mares, em vez das derrotas continentais. Os grandes cursos de

água constituíam as grandes vias de comunicação, ao mesmo tempo que transportavam os minérios, as lãs, as madeiras e todos os materiais, para serem processados.

Foi, por isso, que a indústria se desenvolveu mais rapidamente, onde abundavam cursos de água e, ainda, mais acentuadamente, onde as correntes tinham maiores desníveis. É o caso da Covilhã em Portugal, onde se desenvolveu uma indústria notável de têxteis, principalmente a seguir à acção do conde da Ericeira (século XVII) e depois reforçada no tempo do marquês de Pombal (século XVIII).

Portanto, a indústria e o comércio floresceram nas margens dos grandes rios, ou junto ao mar. Os avanços da tecnologia levaram à formação duma forte classe mercantil, ao reforço do poder militar, ao aumento da riqueza e à ânsia da conquista e exploração de novas terras, para obter matérias primas.

O desenvolvimento de aglomerados urbanos, junto aos rios, teve ainda a vantagem destes poderem dispor dos desperdícios e facilitar o transporte de esgotos, etc.

Mas, há limites para a expansão e crescimento industrial, baseados no aproveitamento da energia hidráulica, usando, apenas, meios mecânicos, como moinhos com rodas hidráulicas, etc. É que a energia hidráulica produzida num local tinha que ser ali utilizada, visto que não era possível o seu transporte a distância.

É certo que se podiam construir canais ou levadas de água, para actuar manufacturas ou engenhos, situados em locais mais convenientes, mas, mesmo assim, o processo não se revelava rendoso. E com o virar do século XVII, na Europa, todos os locais adequados estavam praticamente ocupados, o que limitou a oferta de bens, apesar da procura continuar a aumentar. Por fins do século XVIII surgiu a primeira máquina a vapor que, depois de aperfeiçoada, levaria à Grande Revolução Industrial do século XIX e à construção dos caminhos de ferro.

Depois, com o desenvolvimento dos motores de combustão interna, verificou-se um progresso imparável nos transportes, que levou à generalização do transporte automóvel dos nossos dias.

4.3. A máquina a vapor e a Revolução Industrial

A energia, até ao século XVIII, provinha dos homens, dos animais, das quedas de água e dos ventos. As rodas e os moinhos hidráulicos proliferaram ao longo dos cursos de água e as embarcações à vela passaram a ter muito maiores dimensões, maior capacidade de manobra e maior eficiência: a arte da navegação atingiu um grande desenvolvimento e transformou-se na ciência náutica.

O uso do carvão para o aquecimento das grandes cidades trouxe, indirectamente, um avanço tecnológico que se havia de revelar decisivo para o início da Revolução Industrial. Em Inglaterra as minas desciam a grandes profundidades e encontravam-se, frequentemente, inundadas. Para tentar extrair a água das minas usavam-se moinhos de vento, molinetes, bombas manuais e outras variantes actoadas por animais. Foi então que Savery (1698) inventou uma bomba a vapor, que permitia a extracção da água, mas que era perigosa por causa das explosões. Depois, Newcomen (1705) introduziu modificações, que a tornaram muito mais manuseável e menos perigosa. A máquina de Newcomen espalhou-se rapidamente. Entretanto, James Watt introduziu modificações importantíssimas na máquina de Newcomen. Entre estas destacaremos a transformação do movimento de vai-vem, comandado por um êmbolo, que se deslocava num cilindro por acção do vapor de água, em movimento de rotação dum volante. A outra foi a inclusão dum condensador. Só desta forma a máquina a vapor se mostrou capaz de substituir os processos tradicionais existentes de aproveitamento de energia (eólica e hídrica). E, assim, com a máquina a vapor, iniciou-se, de facto, a Revolução Industrial. Na máquina a vapor a fonte quente é constituída por uma fornalha em que é produzido calor com a combustão de carvão, de lenha ou de outro combustível qualquer. O calor é transmitido à caldeira, que contém água, o qual vai provocar a sua vaporização. O vapor de água é produzido a uma pressão relativamente elevada e, ao expandir-se num cilindro, vai provocar o movimento de um êmbolo que realiza o trabalho.

A invenção e o desenvolvimento da máquina a vapor forneceu não só uma fonte de energia para as fábricas, mas proporcionou, também, o transporte mais rápido e mais económico, por água e por terra. Pelos começos do século XIX começaram a surgir os barcos a vapor. Primeiro, em 1807, Robert Foulton materializou a ideia da

propulsão por roda com o barco *Clermont*, que foi de Nova Iorque até Albany, ao longo do Rio Hudson. Depois, em 1826 o barco *Cu-raçau* atravessou o Atlântico, usando a energia da máquina a vapor.

Quando foi possível colocar a máquina a vapor sobre rodas (1802), estava aberta uma era nova nos transportes terrestres e surgiram os caminhos de ferro, que haviam de revolucionar toda a economia e iniciar uma época de progresso, até aí nunca igualada.

Os primeiros caminhos de ferro começaram a construir-se por altura de 1820 em Inglaterra. O caminho de ferro propagou-se a todo o mundo e, por alturas de 1870, era já possível ir de Paris a Moscovo, ou de Nova Iorque a S. Francisco, por via férrea.

A velocidade elevada e o preço baixo do transporte permitiram o fluxo de mais matérias primas e de mais alimentos para as cidades industriais e levar, rapidamente, os produtos das fábricas a mercados muito distantes.

A máquina a vapor, alimentada a carvão, aumentou a produção a níveis nunca previstos e revolucionou todo o conceito de transporte. A máquina a vapor foi, na realidade, o grande instrumento da Revolução Industrial.

A máquina a vapor (alternativa) está hoje quase totalmente abandonada, tendo sido substruída pela *turbina* de vapor em que o trabalho produzido pela expansão duma corrente fluida permanente de vapor aquecido é recolhido por um dispositivo rotativo de pás ligadas ao veio da máquina.

Nas turbinas continua a utilizar-se o vapor de água, como agente de transformação, porque o vapor de água, devido ao seu elevado calor de vaporização, transporta uma grande quantidade de energia sob a forma de calor. Deve, ainda, juntar-se que a água é acessível, abundante e barata!

4.4. A água e a produção de electricidade

Só a partir do estabelecimento das grandes centrais hidroeléctricas, nos fins do século XIX e no século XX, é que se venceu a grande barreira, que limitava o uso generalizado da energia.

A construção das grandes barragens e de outros aproveitamentos hidroeléctricos constituiu uma fase decisiva para o fornecimento de energia eléctrica em quantidades que permitiram os grandes avan-

ços tecnológicos na primeira metade do século XX. A energia eléctrica constitui a forma de energia, até agora desenvolvida pelo homem, que menos poluição causa no meio ambiente. É, por isso, que se diz que é uma forma de energia limpa.

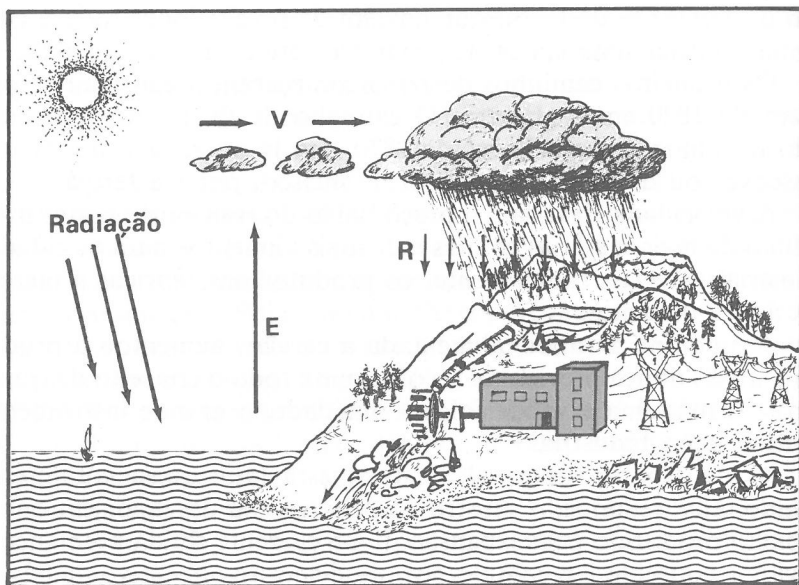


Fig. 7 — A água e a energia.

Mas, outra grande vantagem da energia eléctrica é o seu transporte a distância, permitindo a sua utilização em locais muito afastados das centrais hidroeléctricas onde é produzida.

A primeira central hidroeléctrica foi construída em 1881 em Inglaterra (Godalming). A partir de então, os países industrializados, que tinham rios e locais adequados, começaram a desenvolver os seus recursos hidroeléctricos. Até mesmo países com abundância de combustíveis fósseis (carvão, principalmente) desenvolveram grandes esforços neste sentido, porque a exploração das minas de carvão tem sido sempre um trabalho árduo e difícil. Nas décadas dos anos 20 e 30, os desenvolvimentos hidroeléctricos, com a criação de albufeiras artificiais, por meio de barragens, eram encarados como uma parte fundamental da grande vaga do progresso e do futuro.

Aceitava-se que era a fonte de energia que podia aliviar a pobreza e satisfazer, de forma económica, as populações rurais. Foi a altura da construção das grandes barragens, que com um certo atraso, se estenderam também a Portugal.

Os desenvolvimentos hidroeléctricos, em grande escala, dependem da existência de condições apropriadas. Essas condições dependem das características da fisiografia da região seleccionada, designadamente a rede hidrográfica, a orografia e a forma do relevo, e das características geológicas dos terrenos em que vão ser implantadas as estruturas. A rede hidrográfica e as suas características hidrológicas são os factores determinantes; o escoamento tem de ter valores adequados e as albufeiras capacidade suficientemente grande para garantirem caudais contínuos com a «intensidade» necessária para accionar as turbinas da central hidroeléctrica.

Ainda que, teoricamente, a energia hidroeléctrica seja um recurso renovável, todas as albufeiras têm uma vida limitada (até 400 anos?) por causa do assoreamento inevitável, devido ao transporte de sedimentos e à erosão da barragem. Esta e a sedimentação constituem uma circunstância infeliz, porque a energia hidroeléctrica é a mais eficiente e a «mais limpa» das formas de energia desenvolvidas pelo homem.

As albufeiras, além de fornecerem energia hidroeléctrica para a rega ou para abastecimento das populações, são também um elemento de valorização duma região, porque constituem elementos de grande interesse turístico e de lazer para as populações, com o desenvolvimento de actividades recreativas, como a pesca desportiva, a motonáutica, a vela e a natação, etc.

Quando as albufeiras se destinam ao abastecimento de água potável às populações, há que rodear de cuidados especiais os mananciais, de forma a preservar a qualidade da água a níveis desejáveis. É indispensável evitar os efeitos negativos para a saúde pública, devendo impedir-se o depósito de resíduos e manter as condições higiénicas que garantam a segurança das populações.

5. A MÁQUINA A VAPOR E O APARECIMENTO DA TERMODINÂMICA COMO CIÊNCIA

Historicamente, o aparecimento da ciência da Termodinâmica, como um novo ramo da Física, foi uma consequência do desenvolvimento da máquina a vapor. O melhor aproveitamento da máquina a vapor e o aumento do seu rendimento passaram a constituir preocupações dominantes, logo que se iniciou a sua utilização. Depois, havia que compreender «como é que o calor produzia trabalho». Foi nestas circunstâncias que surgiram Carnot, Rumford, Mayer, Joule e, mais tarde, Helmholtz, Clausius e Gibbs, entre outros; todos são nomes grandes da Ciência!

Sadi Carnot em 1824, com a idade de 28 anos, publicou os princípios fundamentais que governam a eficiência das máquinas térmicas. Assim, o rendimento máximo, η , duma máquina térmica só depende das temperaturas da fonte quente, T_q , e da fonte fria, T_f , e é independente do agente de transformação:

$$\eta = (T_q - T_f)/T_g = 1 - \frac{T_q}{T_f}$$

em que as temperaturas são expressas em graus Kelvin, isto é, $T = t(^{\circ}\text{C}) + 273,15$. Como se vê, o rendimento máximo, teórico, de uma máquina térmica é sempre inferior a 100%.

Julius Robert Mayer era um médico ao serviço da marinha holandesa. Em 1840, verificou que o sangue venoso dos doentes javaneses era vermelho claro, uma cor semelhante à que se encontrava no sangue arterial oxigenado de doentes da Alemanha e das regiões nórdicas. Mayer concluiu que, nos climas quentes, o corpo necessita de menos oxigenação para manter a temperatura do corpo, do que nas regiões de clima mais frio. E foi com base nestas reflexões que Mayer enunciou, pela primeira vez, o princípio da conservação da energia (para maior desenvolvimento pode consultar-se a nossa publicação de 1985).

Mas, já antes de Mayer, Benjamin Thomson, natural de Massachusetts, mais tarde conde de Rumford, ao superintender o fabrico de canhões na Baviera, em 1798, avaliou a quantidade de calor produzido na produção de canhões. Estava na moda a «teoria do caló-

rico», que Rumford destronou, porque não era possível explicar a origem do calórico, que poderia provocar o aquecimento tão intenso, que se verificava na brocagem da alma dum canhão... O funcionamento da broca era executado com um rodízio accionado por dois cavalos. O arrefecimento da broca era feito com água, que ao fim de algum tempo começava a ferver.

Rumford afirmava que «não havia calórico nenhum» e que o aquecimento resultava da acção da broca sobre o bronze dos canhões. E juntava, ainda, que as «fontes de acção» dos cavalos eram os alimentos que comiam, e que, afinal, se os alimentos fossem queimados, produziam ainda mais calor do que aquele que se media na água aquecida. Rumford verificou que havia uma perda na eficiência das conversões da energia química (dos alimentos) em energia mecânica (do movimento), e desta em «energia calorífica». Ainda que se referisse a «conversões», Rumford não propôs qualquer teoria.

James Prescott Joule, em 1840, através de medições, cujo rigor ainda hoje nos surpreende, mostrou que a mesma quantidade de trabalho, independentemente da forma como era produzido, conduzia sempre à mesma quantidade de calor. Estabeleceu, definitivamente, a equivalência entre trabalho e calor e determinou o valor do equivalente mecânico do calor (4,18 Joules por caloria). Por isso, o Primeiro Princípio da Termodinâmica, que exprime a equivalência do trabalho e calor, é designado por Princípio de Mayer-Joule. É uma versão preliminar do Princípio da Conservação de Energia que haveria de ser generalizado por Helmholtz (1847).

Hermann von Helmholtz era um médico do Exército Prussiano e um físico notável. Helmholtz identificou as formas de calor latente (não altera a temperatura) e calor sensível com as formas de energia potencial e cinética das moléculas, respectivamente. Explicava que o calor desenvolvido com a combustão era devido à energia cinética dos átomos libertados das estruturas ordenadas, que caracterizam os sólidos, para o estado gasoso, desordenado e caótico, em que as moléculas e os átomos tinham uma energia cinética muito maior. Foi Helmholtz que generalizou a equivalência de calor e trabalho enunciando o Princípio Geral da Conservação da Energia, que tem constituído a pedra angular do desenvolvimento da Física. É hoje considerado como um dos princípios fundamentais da Ciência.

Com base nos trabalhos de Carnot, de Mayer e de Helmholtz,

em meados do século passado, surgiu uma nova disciplina autónoma da Física, a Termodinâmica, como um sistema formal científico. Os estudos e os trabalhos de Clausius, de Kelvin, de Maxwell e de Gibbs foram decisivos. O Princípio de Carnot foi generalizado, conduzindo à versão moderna do Segundo Princípio da Termodinâmica — o Princípio da Entropia — hoje um dos grandes Princípios da Ciência, da Economia, da Sociologia e da Informação. Kelvin introduziu o conceito de temperatura absoluta.

Posteriormente, em fins do século passado, Josiah Gibbs publicou trabalhos de excepcional importância para o desenvolvimento da Termodinâmica e da Química. Introduziu uma nova via de investigação na Termodinâmica, com o desenvolvimento dos potenciais termodinâmicos e estudou, de forma definitiva, o problema geral do equilíbrio termodinâmico em sistemas homogêneos e heterogêneos (várias fases). Foram estes desenvolvimentos que levaram aos grandes progressos da Engenharia Química. Já no nosso século, foi desenvolvida a teoria dos processos irreversíveis (Ostwald, 1931, Prigogine, 1947).

A Termodinâmica é uma ciência dedutiva baseada no Primeiro e no Segundo Princípio, já referidos, a que se juntou um Terceiro Princípio enunciado por Nernst (1906). De acordo com este princípio, quando a temperatura absoluta tende para zero a entropia tende também para zero. Este princípio é de grande importância para o cálculo dos valores das várias grandezas termodinâmicas dos componentes de reacções químicas.

CAPÍTULO VIII

**A ÁGUA E O AMBIENTE:
O PREÇO DO PROGRESSO
E DO DESENVOLVIMENTO**

1. OS CUSTOS AMBIENTAIS DO DESENVOLVIMENTO E DO PROGRESSO

O desenvolvimento e o progresso verificado nos últimos decénios nos domínios da agricultura, da exploração mineira, da indústria, dos transportes, do urbanismo, das actividades recreativas, do nível de vida, têm um preço, cuja factura é paga pelo ambiente. É uma consequência do Princípio da Entropia, que constitui uma das leis fundamentais da Natureza.

Há muito que os economistas sabem que o «desperdício» em matéria e em energia é um resultado da tendência inexorável da entropia aumentar. É que a nossa civilização de consumismo é uma civilização de desperdício. Produzir mais máquinas e mais automóveis, explorar mais minas; fazer mais vias de comunicação; obter mais produtos agrícolas; produzir mais energia; utilizar mais água, tudo conduz a um aumento da entropia, isto é, à deterioração do ambiente com a poluição da atmosfera, das águas, dos solos e dos campos.

A industrialização, o aumento do bem-estar das populações e as práticas agrícolas levaram à poluição química e orgânica da atmosfera ao lançar nesta novos produtos como o dióxido de enxofre (SO_2), o ácido sulfídrico (SH_2), o óxido de azoto (NO_x), o dióxido de carbono (CO_2), hidrocarbonetos e outros compostos voláteis. Ao produzir uma elevada taxa de aquecimento, o homem vai provocar a poluição térmica da atmosfera com um aquecimento, principalmente, nos aglomerados urbanos. Os poluentes químicos SO_2 , SH_2 e NO_x vão originar a precipitação ácida e os nevoeiros poluídos (*smogs*). O aumento do dióxido de carbono (CO_2) vai, através do efeito de estufa, provocar um aquecimento generalizado da Terra,

que poderá ter consequências na fusão dos gelos polares, no aumento do nível médio do mar, na distribuição das zonas climáticas e na produção agrícola. Este assunto foi já tratado por nós anteriormente (Peixoto, 1986).

Os hidrocarbonetos e os seus derivados, os fluorcarbonos (freons), podem levar à depleção do ozono da atmosfera, que constitui, como se sabe, um filtro protector, que não deixa passar a radiação ultravioleta da radiação solar. A diminuição da concentração do ozono («buraco do ozono») poderia permitir que a radiação ultravioleta atingisse o globo, com todos os perigos inerentes.

Mas a atmosfera e o globo são sistemas que interactivam por serem sistemas abertos. Logo, o que se faz na atmosfera repercute-se nos outros componentes do sistema climático e, portanto, na água.

Mas, se a poluição atmosférica tem repercussões imediatas na qualidade da água, a poluição directa da água é mais perigosa devido às actividades humanas, podendo gerar problemas de qualidade, que se devem ter em conta.

Como indicámos, menos de 1 % da água na Terra é directamente utilizável e desta, apenas metade é acessível na superfície da Terra. A quantidade de água utilizável é limitada e o inventário global da água doce pode ser facilmente delapidado.

A problemática da água envolve alguns problemas sociais, que convém mencionar. Entre estes devemos destacar o sobreuso dos aquíferos, a poluição e, às vezes, a contaminação da água, a erosão e a sedimentação, a degradação das zonas húmidas costeiras, as inundações acidentais, a probabilidade de secas prolongadas, a ocorrência de avalanches, etc.

Os tempos de residência da água na superfície da Terra são da ordem de alguns dias nos rios, de décadas nos lagos e de séculos nos glaciares. No entanto, tem de ter-se presente a grande variabilidade da quantidade de água disponível no decurso do ano, de ano para ano, e de região para região.

A qualidade da água pode constituir um factor limitativo do seu uso e, por isso, convém identificar as fontes, os sumidouros e o movimento dos poluentes, através dos rios, dos solos, dos aquíferos, da vegetação para a atmosfera, dos oceanos e da biosfera.

A poluição da água tem sérias repercussões sobre a qualidade do ambiente. E a situação agrava-se, ainda mais, com a sua contaminação. De facto, deve distinguir-se entre poluição e contaminação

da água: a poluição da água resulta do lançamento de substâncias estranhas que adulterem e modifiquem a sua composição ou o seu estado, ficando menos adequada para a sua utilização. A contaminação da água resulta da introdução de substâncias tóxicas ou de organismos patogénicos que a tornam imprópria, ou mesmo perigosa, para o consumo público e para usos domésticos.

2. INTERFERÊNCIA DO HOMEM NO AMBIENTE E NOS RECURSOS HÍDRICOS

A superfície da Terra forma um espaço geográfico em que o Homem criou um ambiente construído, próprio. Assim, ao construir o seu habitat, exerce directa ou indirectamente e, ainda, de forma não deliberada, ou intencional, uma influência sobre a terra e a paisagem que o rodeia.

O homem transforma o ambiente natural, principalmente, através da agricultura e da construção. É o que tem acontecido com a construção dos grandes desenvolvimentos urbanos, de complexos industriais, de estruturas lineares (caminhos de ferro, estradas, pontes, túneis), de redes de trabalhos de utilidade pública, de estruturas de aproveitamento de água (canais, albufeiras, barragens, lagos artificiais), etc. Todas estas actividades são acompanhadas pela agricultura: construção de terraços e culturas em socalcos em terrenos declivosos, amanhos da terra, queimadas, deflorestação, etc. A estas actividades devemos juntar ainda as explorações mineiras, de pedreiras e de outras, que causam mudanças substanciais e, por vezes, muito adversas no meio ambiente.

De acordo com o grau de disrupção que causam no ambiente, as actividades humanas podem ser seriadas como segue: destruição de florestas; práticas agrícolas; desenvolvimento urbano e transportes; indústria e actividades mineiras.

Todas estas actividades vão interferir com os recursos em água. Em regiões densamente povoadas, com forte desenvolvimento industrial e com uma agricultura intensiva, as influências negativas no ambiente acumulam-se de forma que os efeitos se multiplicam.

Todas estas actividades nos ecossistemas têm repercussões subs-

tanciais no ciclo hidrológico. A vegetação utiliza a água para o seu desenvolvimento, aumentando a evapotranspiração. A quantidade de água utilizada nas culturas é determinada pelos tipos de vegetação e pela disponibilidade em água.

As florestas têm uma acção muito particular no ciclo hidrológico. Com efeito, as florestas aumentam a intersecção, favorecem a infiltração, transformam o escoamento superficial em escoamento subterrâneo, tendo um efeito regulador do regime de cheias, restringindo as flutuações das descargas. Ao reduzir as grandes enxurradas, a floresta protege os solos duma erosão, que se pode tornar irreversível. As florestas protegem ainda a qualidade da água, aumentando substancialmente a sua pureza.

O ambiente antropogénico criado tem um impacte imediato nos ecossistemas naturais e, portanto, nos recursos hídricos. Um exemplo elucidativo é a disrupção causada pela eliminação da cobertura natural da superfície. As explorações da madeira, o desejo e a necessidade de adquirir solos férteis para a agricultura, levaram à substituição da floresta e da cobertura vegetal natural por terras aráveis, causando e reforçando as cheias e acelerando a erosão dos solos.

A deflorestação ao facilitar o escoamento superficial diminui substancialmente a armazenagem subterrânea. A deflorestação e a urbanização de encostas pode ter efeitos trágicos pelo aumento desmedido do coeficiente de escoamento.

Como se vê «manutenção de uma cobertura vegetal apropriada de preferência florestal, é essencial para a conservação dos recursos hídricos» (Carta Europeia da Água, 1968).

Outro efeito desfavorável é a degradação dos recursos hídricos pela utilização extensiva de pesticidas e de fertilizantes na agricultura, como já referimos.

O homem pode afectar, de forma decisiva, o regime da água com a alteração da paisagem. Através da construção de reservatórios e de barragens para o aumento das reservas em água, o homem contribui para a regularização de caudais e para a prevenção de cheias, mas influencia o regime da água dos solos.

As estradas e os caminhos de ferro além de alterarem o regime de escoamento expõem directamente formações geológicas até aí protegidas, originando sérios riscos de acelerar a erosão e constituir um perigo para o regime hidrológico da região com o assoreamento da rede de drenagem natural.

Como é fácil de ver, torna-se indispensável um ordenamento racional do território para reduzir ao mínimo as influências antropogénicas no ambiente.

3. A POLUIÇÃO DA ÁGUA

3.1. Fontes de poluição

A água, que se encontra na Natureza, contém sempre substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas ou em suspensão. Algumas substâncias são incorporadas por processos naturais e outras são lançadas pelas actividades do homem, vindo algumas delas, por fim, a depositar-se nos lagos e nos oceanos. Em resultado de reacções químicas podem surgir outras substâncias derivadas.

Algumas das substâncias dissolvidas são benéficas, desde que a sua concentração não seja excessiva. A contaminação, como dissemos, refere-se a substâncias indesejáveis, perigosas para o homem ou para o meio ambiente e que, em regra, provêm da actividade humana. A forma mais antiga de contaminação artificial é, talvez, aquela que é produzida, principalmente, por águas residuais e por toda a qualidade de detritos lançados pelo homem.

Com a industrialização passaram a ser lançadas novas substâncias químicas nas águas e na atmosfera e começou a aparecer precipitação ácida. Mais recentemente, chegam também aos rios e aos lagos pesticidas, fertilizantes e toda a espécie de resíduos metálicos que depois são parcialmente transportados para os oceanos. Há ainda que juntar a poluição causada pelo derrame casual de petróleo nos portos e nos oceanos.

Mas as águas podem ser inquinadas pelas águas residuais dando aso à propagação de grandes epidemias como a febre tifóide, a cólera, etc. Existem outros tipos de contaminação da água, que podem ser deletérios para a saúde do homem, como resíduos tóxicos de processos industriais. É o caso de resíduos de mercúrio que depois de depositados se transformam, por acção das bactérias, em substâncias altamente tóxicas, que posteriormente passam à cadeia da alimentação. A estes resíduos devemos juntar os do chumbo, do zinco e do cádmio e ainda isecticidas como o DDT, etc.

3.2. Efeitos da poluição da água

A concentração dos agentes de poluição e da contaminação de um rio depende da quantidade de materiais que ali são lançados e da importância do escoamento do próprio rio. Alguns dos contaminados podem ser decompostos por processos químicos ou pela acção de determinadas bactérias. A velocidade da decomposição depende da quantidade de oxigénio disponível. Este, por sua vez, aumenta com a velocidade de escoamento (maior superfície é exposta no mesmo intervalo de tempo), com a existência de cascatas e de acidentes. Facilita-se assim uma autopurificação, que em águas lentas se torna mais difícil. Se a entrada de poluentes é muito elevada em relação à quantidade de oxigénio existente, e se o escoamento não é suficientemente grande, o processo natural de autopurificação não funciona e podem atingir-se níveis elevados de contaminação.

A água é utilizada não só para fins domésticos, como para actividades recreativas (vela, motonáutica, natação, pesca, etc.), o que representa, sempre, um elemento de valorização local e regional. Ora estas águas requerem um determinado nível de qualidade, que a contaminação pode deteriorar de forma irreversível.

A água também se utiliza para fins da refrigeração, na indústria. A água dum rio, ou dum lago, pode servir como agente de arrefecimento de complexos industriais ou centrais hidroeléctricas. Depois é devolvida à origem, com uma temperatura superior, indo provocar uma «contaminação térmica» dos rios ou dos lagos. Ora, esta «contaminação» pode ter efeitos ecológicos deletérios pelas modificações que introduz no meio aquático, levando a uma aceleração dos processos químicos e biológicos de que pode resultar, devido ao grande consumo, um decréscimo do conteúdo de oxigénio e uma deterioração das condições de sobrevivência da fauna piscícola.

Este problema tem-se verificado principalmente nas vizinhanças de centrais térmicas e das centrais nucleares. A poluição térmica pode ser reduzida, se as águas utilizadas no arrefecimento forem, elas próprias, arrefecidas antes de voltarem a desaguar nos rios ou nos lagos. Para isso, utilizam-se grandes torres de arrefecimento em que as águas são levadas ao topo de torres para depois serem despejadas em cascatas ao longo das paredes laterais, arrefecendo pela sua exposição à atmosfera.

Há ainda outras formas de contaminação das águas que podem

afectar decisivamente o ambiente, e que podem levar à eutroficação dos lagos, de que falaremos.

Qualquer curso ou depósito natural de água contém gases dissolvidos, que se encontram em equilíbrio com a atmosfera. É assim que os peixes e outros tipos de vida aquática sobrevivem e obtêm o oxigénio indispensável para a sua respiração. A quantidade de oxigénio, que a água pode reter até à saturação, depende da temperatura e segue a lei da diminuição da solubilidade dos gases, com o aumento da temperatura. Durante o Verão, como a temperatura da água é mais elevada, a quantidade de oxigénio dissolvida atinge o mínimo.

As substâncias degradáveis ou as águas dos esgotos, susceptíveis de serem oxidadas, levam a uma deplecção parcial do oxigénio, podendo gerar mesmo uma autodepuração. No entanto, se a taxa de consumo de oxigénio for muito elevada, as condições podem alterar-se de forma quase irreversível.

Como se sabe, os efluentes da actividade agrícola, de esgotos domésticos e industriais, que desaguam em muitos lagos e estuários são ricos em produtos fosfatados, azotados e noutras matérias orgânicas. Esta abundância em produtos ricos em fósforo e em azoto nos lagos conduz à sua *eutroficação* (que em grego quer dizer «bem nutrido»). Na acepção actual, eutroficação significa a deterioração das condições e das propriedades dos lagos e dos estuários, que permitem suportar a vida normal, causada por uma fertilização excessiva, provocada pelos efluentes. A eutroficação é devida, portanto, a um fluxo abundante de nutrientes, do que resulta uma taxa elevada de produção de matéria orgânica, vegetal.

As algas e as plantas aquáticas desenvolvem-se rapidamente, alastrando-se a regiões não afectadas, inicialmente. Esta proliferação conduz a uma decomposição da matéria orgânica, com o aparecimento de produtos pouco desejáveis.

A eutroficação reflecte-se na composição das espécies, no número de géneros existentes, nas dimensões das populações e na produtividade de vários grupos de organismos do ecossistema aquático.

Se o aumento da produção de matéria orgânica (algas, plantas, etc.) no ecossistema aquático for excessivo, verifica-se um grande consumo do oxigénio dissolvido. O seu teor pode baixar rapidamente e, por vezes, conduzir ao seu desaparecimento completo, principalmente nas águas de maior profundidade, que, assim, se transfor-

mam em «águas mortas». O desaparecimento do oxigénio dissolvido, ou mesmo a sua diminuição, impede a vida animal e conduz ao desaparecimento de muitas espécies piscícolas e outras.

De facto, as águas de escoamento, passando através de regiões tratadas com vários fertilizantes constituem mananciais de nutrientes, mais ou menos ricos, produzindo flores específicas muito diferentes nas águas dos lagos, com uma grande variedade de algas, de microrganismos e de plantas aquáticas.

Existe, pois, uma correlação entre a natureza dos fertilizantes utilizados e os tipos de flora predominantes que são gerados. Pode, assim, estabelecer-se um processo indirecto de estudar as consequências da poluição dos vários tipos de fertilizantes. Estes estudos são baseados no método da entropia máxima.

4. A PRECIPITAÇÃO ÁCIDA

4.1. Aspectos gerais

A precipitação ácida tornou-se, nos últimos tempos um dos principais problemas ambientais. Não é, apenas, um problema local, que afecta a população de uma qualquer região industrial. É antes um fenómeno nacional ou mesmo internacional que envolve grandes regiões do globo. A sua extensão tem vindo a aumentar de ano para ano e o mesmo se pode dizer quanto ao aumento da actividade verificado com a precipitação ácida.

Tem-se dito tanto sobre a precipitação ácida, que é difícil distinguir factos de meras conjecturas. Que é que se entende por precipitação ácida? Que é que se sabe quanto às suas causas e que é que se sabe dos seus efeitos?

Durante séculos e séculos o homem tem vindo a provocar a alteração da face do Globo e com ela a química da atmosfera. Nas fases de expansão da agricultura originou grandes tempestades de poeiras. Devido à deflorestação e ao uso de queimadas, o homem gerou um forte desequilíbrio no ciclo natural do carbono na Terra. Depois, com o desenvolvimento tecnológico e, principalmente, depois da Revolução Industrial, no século passado, o uso do carvão e

posteriormente o de combustíveis fósseis lançaram na atmosfera substâncias químicas «estranhas», fumos e partículas, que vieram, em conjunto, originar uma forte poluição da atmosfera.

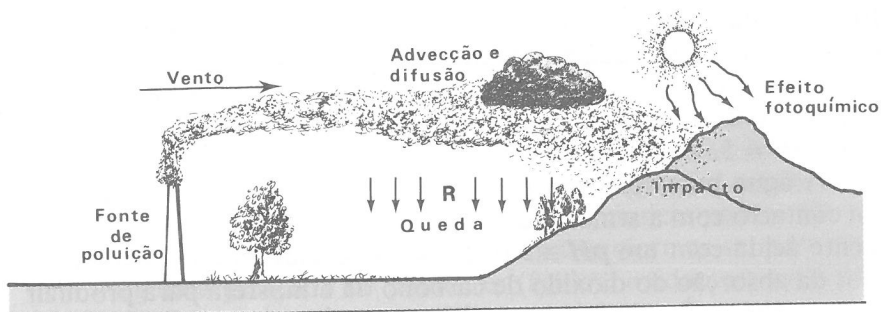


Fig. 8 — A poluição atmosférica e a precipitação ácida.

Ora, a precipitação não é apenas constituída por água pura. Vem acompanhada por materiais químicos estranhos, que resultaram da sua incorporação nas gotas da chuva. Mas a formação e o crescimento das gotículas das nuvens faz-se em torno de partículas que constituem os núcleos de condensação, que podem ser os produtos químicos lançados na atmosfera. A remoção destes produtos químicos da atmosfera pela precipitação chama-se «deposição húmida».

Outro processo de deposição resulta simplesmente do efeito de gravidade. É o que acontece com as partículas muito pequenas e com gases que são lançados na atmosfera e que, depois, vão ser transportados pelos ventos. Por fim, são depositados a grandes distâncias donde foram gerados. É a chamada «deposição seca». Um terceiro processo de limpeza da atmosfera de produtos químicos e de partículas estranhas, é através da formação de nevoeiros e da sua intersecção e posterior deposição sobre obstáculos, tais como a vegetação, casas e a própria superfície do Globo.

*
* *

Os químicos usam uma escala de acidez baseada no conceito do *pH*, para indicar a acidez dum soluto ou a sua basicidade

(base é o composto químico oposto ao ácido). A acidez de uma substância está associada com o número de hidróns livres (H^+) que produz quando em solução aquosa.

Um valor de $pH = 7$ corresponde a uma solução neutra, na fronteira da transição entre ácido e base. Uma diminuição do pH corresponde a um aumento de acidez, mas numa escala não linear (logarítmica). Por exemplo, um soluto com $pH = 3$ é dez vezes mais ácido do que outro cujo $pH = 4$ e cem vezes mais ácido do que fosse $pH = 5$.

A água pura teria um $pH = 7$. No entanto, se a água se deixa em contacto com a atmosfera durante algum tempo, torna-se ligeiramente ácida com um $pH \cong 5,6$. Esta acidez resulta, por exemplo, da absorção do dióxido de carbono da atmosfera para produzir ácido carbónico, o ácido que é adicionado aos refrigerantes para lhes dar certo trazo e um sabor mais «elaborado». É, por isso, que só se considera «ácida» a precipitação, cujo pH é inferior a 5,6. Para valores de pH abaixo de 5, a precipitação ácida tem, potencialmente, efeitos deletérios sobre o ambiente.

4.2. A limpeza da atmosfera

Podemos, agora, tentar descrever o que é a «precipitação ácida». A precipitação ácida é a soma de todas as deposições de materiais químicos da atmosfera na superfície do Globo, através dos três processos de deposição referidos, desde que gerem uma condição ácida ($pH < 5,6$) depois de entrarem em contacto com a água da superfície, quer se trate de água da própria precipitação, quer não.

Já sabemos que os poluentes lançados na atmosfera retornarão ao Globo através dos vários mecanismos descritos. Mas o que é que causa a deposição ácida? Os principais agentes que actuam como núcleos de condensação são os óxidos de enxofre (SO_x) e de azoto (NO_x) e alguns hidrocarbonetos e seus derivados. Todos eles de utilização de combustíveis, em complexos industriais, em centrais térmicas, nos transportes, em usos domésticos e em outras actividades humanas.

Há também fontes naturais destes compostos, como os vulcões, e as que resultam do decaimento da matéria orgânica, de fogos de florestas provocados por faíscas eléctricas, etc. Mas, a contribuição

devida à actividade do homem supera, de longe, a contribuição natural.

Com a emissão de produtos susceptíveis de originar substâncias ácidas na atmosfera, ocorrem reacções complexas em meio aquoso nas próprias nuvens, ou reacções de natureza fotoquímica, que originam a sua oxidação e outras transformações. No processo de industrialização tem vindo a consumir-se quantidades sempre crescentes de combustíveis fósseis, libertando na combustão para a atmosfera, como já referimos, produtos secundários, nomeadamente dióxido de enxofre (SO_2), vários óxidos de azoto (NO_x) e outros compostos orgânicos voláteis. Estas substâncias químicas podem não ter efeitos adversos no ambiente, mas podem transformar-se, para criar uma «segunda geração» de poluentes (ácidos, oxidantes; partículas do aerossol) que já podem ter efeitos perniciosos. É, por isso, que certos poluentes que, individualmente, se poderiam considerar inócuos, podem actuar de forma sinérgica para se tornarem potencialmente perigosos (é o caso dos fluorcarbonos, por exemplo).

Tal como os rios, a atmosfera tem vindo a constituir como que um esgoto para o transporte destes poluentes. Muitas vezes, as chaminés lançam os poluentes em níveis suficientemente elevados, para serem dispersos de forma mais eficiente. No entanto, passam, assim, a ser transportados pela circulação geral, que os pode conduzir a grandes distâncias das fontes de geração.

Mas, a atmosfera dispõe de alguns meios que lhe permitem expurgar os poluentes, visto que o que foi lançado na atmosfera retornará, mais cedo ou mais tarde, à superfície do Globo.

Começemos por considerar os vários processos pelos quais a atmosfera pode ser limpa de poluentes. Como se sabe, os meteorologistas definem precipitação como a forma de água sólida (neve) ou líquida (chuva) que cai da atmosfera e que atinge o Globo. As gotas de chuva, os cristais de neve e os grânulos de granizo, ao caírem no solo, depositam todas as substâncias neles dissolvidas ou incorporadas. Numa região em que abundem núcleos de SO_2 , que depois de oxidados originam SO_3 , ou de NO_x , entre outros, os produtos finais das gotas de água passam a ser o ácido sulfúrico e o ácido nítrico, que constituem os principais constituintes para a acidez da precipitação.

No caso da deposição seca, os ácidos ou as substâncias que podem gerar ácidos são lançados directamente na superfície do Globo,

incluindo lagos, florestas, os solos, etc. Todavia, a química da precipitação envolve muito mais do que os ácidos sulfúrico e nítrico. Muitos materiais neutros ou mesmo alcalinos, em suspensão na atmosfera, podem ser incorporados na precipitação, alterando a química da precipitação, levando, mesmo, à neutralização dos ácidos.

4.3. Os efeitos da precipitação ácida no ambiente

Agora, quais são os efeitos da precipitação ácida no ambiente? Ora, há cerca de vinte anos, verificou-se um aumento da acidez das águas e uma diminuição da quantidade de peixes nalguns lagos e rios da Escandinávia. O mesmo se verificou no Canadá e nos Estados Unidos. Estes resultados foram atribuídos, imediatamente, à precipitação ácida. Mas, agora sabemos que nem todos os lagos reagem da mesma forma à mesma deposição por precipitação ácida. Ora, devido à constituição química básica dos solos que rodeiam alguns lagos e ao tipo da vegetação vizinha, as águas dos cursos de água arrastam iões de natureza alcalina que podem neutralizar a acidez da precipitação. No entanto, não há dúvida que este nem sempre é o caso mais frequente e certos lagos e correntes mais sensíveis estão a ser seriamente afectados pela precipitação ácida.

Outra área de preocupações, causadas pela precipitação ácida, é a que se prende com os danos que causa nas florestas. Tem-se vindo a verificar um declínio de certas espécies de vegetação nos últimos vinte anos, quer no Norte da Europa, quer na América do Norte. As árvores podem ser atingidas quer pelo impacte directo da precipitação ácida sobre as folhas e sobre os troncos dos ramos, quer pelas transformações que introduz na constituição química dos solos. Contudo, no que se refere ao declínio das florestas não se podem afastar os efeitos sinérgicos da precipitação ácida com outros factores, como o ozono, as variações do clima e outros, constituindo a precipitação ácida um problema muito preocupante.

Uma terceira área de preocupações da precipitação ácida é a que envolve os danos e as deteriorações que causa em construções e em monumentos. As reacções químicas, causadas pela deposição húmida ou pela deposição seca dos poluentes, foram identificadas como uma das causas principais da deterioração de vários monumentos e estruturas historicamente importantes, na Europa, princi-

palmente aqueles que são construídos com calcário poroso. Mas as estruturas metálicas, quer de ferro, quer de zinco, são também susceptíveis duma deterioração acentuada pela precipitação ácida. O mesmo se pode dizer sobre as pinturas das construções. Ainda que tais efeitos não sejam catastróficos o encurtamento da vida média destas construções tem, necessariamente, implicações económicas.

Não há dúvida que a precipitação ácida, sob várias formas, constitui um problema ambiental importante no Mundo. Mas, a «limpeza» da atmosfera através da precipitação ácida, seca ou húmida, constitui um mecanismo natural que faz parte integrante dos processos que ocorrem na atmosfera. O homem tem vindo a lançar toda a casta de poluentes na atmosfera e tem que aceitar que não poderão ser expurgados, sem contrapartidas e consequências deletérias. Ainda que nos últimos anos se tenha avançado muito na compreensão do problema, as soluções não se afiguram fáceis. Claro que um dos métodos para reduzir a acidez seria a limitação e o banimento das emissões de óxidos de enxofre, e refrear o uso de transporte automóvel, medida esta que além, de ser importante, tem grandes implicações económicas e até políticas. Ora, mas quer economicamente, quer também do ponto de vista logístico, o ambiente é a fonte da vida de todos nós — homem, animais e plantas — e há que tomar decisões rápidas e sérias sobre a precipitação ácida. Os custos para reduzir a emissão de poluentes são elevados, mas impõem-se algumas formas de controlo para evitar consequências potenciais desastrosas no ambiente e principalmente no ambiente aquático.

4.4. A situação em Portugal

Que se passa em Portugal?

Podemos dizer que os estudos sobre a «acidez das chuvas» se iniciou no Instituto Geofísico Infante D. Luís, com os trabalhos do seu segundo director o Doutor Joaquim António da Silva. Esses trabalhos foram publicados pela Academia das Ciências (1859) numa memória intitulada *Chuvas em Lisboa* e, além dos aspectos climatológicos, foi analisada a composição química da água da chuva. Analisou os teores em ácido carbónico e em ácido nítrico. Pode dizer-se que estes trabalhos notáveis foram de certo modo precursores.

Na década dos anos 60 o Prof. Fernando Barreira, da Faculdade de Ciências de Lisboa procedeu, com a colaboração do Instituto Geofísico D. Luís, à análise química da precipitação, ainda que os seus interesses incidissem principalmente sobre a radioactividade das águas da precipitação.

A partir de 1979 o Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG) desencadeou um programa sistemático para a análise da acidez das águas da precipitação em Portugal. Assim, começaram a ser feitas colheitas e análises em Faro e em Bragança e, depois de 1987, a rede de amostragem foi alargada a Viana do Castelo, Penhas Douradas e Castelo Branco. Assim de início fizeram-se amostragens mensais, depois passaram a ser semanais e, actualmente, são diárias, sempre que a precipitação excede 5 mm

Quanto aos valores do *pH* das amostras verifica-se que as amostras mensais são «regularmente alcalinas» ($pH > 5,8$), isto é, com valores médios do *pH* superiores ao valor crítico limite de $pH = 5,6$. O mesmo se verifica nas amostras semanais.

No que se refere à deposição de enxofre em Portugal, verifica-se que só cerca de 50% do total depositado tem origem em emissões nacionais; dos restantes 50%, pode atribuir-se a parte de leão à Espanha (45%) e, em muito menor escala (cerca de 2%), a emissões além-Pirinéus (Reino Unido, França, Alemanha).

A situação em Portugal, no que diz respeito às «chuvas ácidas» não é, por enquanto, preocupante. Podemos atribuir estas condições à circulação dominante de oeste que caracteriza a circulação geral em Portugal. Há, no entanto, situações sinópticas, com ventos de leste que acompanham os anticiclones continentais centrados no Norte da Europa, que podem arrastar na sua circulação materiais poluentes lançados na atmosfera em países da Europa, altamente industrializados. No semestre de Verão, com o desenvolvimento da baixa de origem térmica na Península Ibérica, a circulação pode arrastar poluentes do Norte e Nordeste de Espanha e afectar a natureza da precipitação e a deposição materiais em Portugal.

5. O IMPACTE DA UTILIZAÇÃO DA ÁGUA SOBRE O AMBIENTE

A construção de grandes barragens e a formação de extensas albufeiras começou a gerar uma certa controvérsia. Nem tudo são vantagens, nem tudo são benefícios. Os aproveitamentos dos recursos hídricos pela sua extensão e pela sua instalação tem impactes inevitáveis sobre o ambiente. Algumas das incidências contribuem para a deterioração, por vezes, irreparável do ambiente.

De facto, as grandes barragens constituem como que um «trauma» para o curso de água em que são construídas, porque originam grandes lagos em regiões anteriormente libertas de água, alteram o regime de escoamento do curso de água e, sobretudo, modificam os hábitos de vida das populações vizinhas e provocam deslocações maciças das populações de aldeias que são submersas. Vêm depois as alterações ecológicas da fauna e da flora aquática e, especialmente, da vegetação das regiões vizinhas.

Entre os impactes negativos das grandes albufeiras e barragens podemos ainda referir: a perda de locais e de monumentos históricos, geológicos ou paisagistas, devido às inundações; o assoreamento das albufeiras provocado pelos sedimentos e detritos provocados pela erosão das encostas e dos campos vizinhos e transportados pelos cursos hidrográficos da bacia; a degradação dos leitos dos rios e das suas margens, por causa da retenção de detritos e de sedimentos nas albufeiras, com prejuízo das terras aráveis marginais e da vegetação; a submersão de campos com boa aptidão agrícola, que leva ao empobrecimento das populações das zonas periféricas expoliadas, muitas vezes, dos seus valores culturais e morais; a modificação das faunas aquáticas, dificultando a sua reprodução, com a construção de uma barreira que impede a desova nos pontos habituais; a alteração da qualidade da água dos rios devido às descargas de fundo das águas das albufeiras, com maior salinidade e menor teor em oxigénio; a erosão e o assoreamento dos leitos dos rios a jusante das barragens; a alteração da morfologia das zonas marginais; a alteração dos níveis freáticos e dos regimes das águas subterrâneas; as modificações locais do clima pelas alterações dos factores regionais, que levam a temperaturas e humidades muito diferentes das anterio-

res; a ruptura das barragens que podem causar inundações catastróficas, com a destruição de vidas, de propriedades e bens.

Antes da construção duma grande barragem, impõe-se a realização de estudos científicos aprofundados, sobre o impacte que a criação duma albufeira e a construção duma grande barreira num rio, como é uma barragem, vão ter no ecossistema em que se vão inserir. Estes estudos, pelas incidências dum tal empreendimento, devem ter um carácter eminentemente interdisciplinar, de forma a avaliar os efeitos globais sobre o ambiente e sobre os outros recursos naturais. Há que ter em vista os aspectos ecológicos, tendo presente a conservação das espécies, a preservação da vida silvestre e aspectos fisiográficos, designadamente de carácter hidrológico, como a regularização dos caudais, alterações do nível do manto freático e as prevenções de cheias; de carácter meteorológico, como o das possíveis variações locais do clima, de carácter geológico, como a erosão e a sedimentação. Há, depois, que ter na conta devida o grande impacte económico-social que um complexo destes introduz nas populações, agora transformadas em gentes ribeirinhas, e numa análise cuidada de custos e benefícios. A irrigação de novas terras e a produção de energia barata não se devem fazer à custa do empobrecimento irremediável de populações indefesas que, em nome da utilidade pública, vêm desaparecer, sem compensações justas, as veigas, as hortas, os prados e os lameiros, muitas vezes, as fontes do seu sustento, pela submersão com a criação de grandes lagos nos seus melhores solos.

6. METEOROLOGIA, HIDROLOGIA E CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS

Como acontece com qualquer dos grandes problemas do ambiente, a poluição e a contaminação das águas têm uma índole eminentemente interdisciplinar. Além dos ecologistas, dos arquitectos paisagistas, dos engenheiros e dos químicos, que têm tido a responsabilidade imediata nos estudos da contaminação das águas, torna-se desejável e útil, como Agências Internacionais (UNESCO, OMM, OMS) recomendam, a colaboração efectiva dos meteorologistas e dos hidrologistas.

De facto, parte da poluição das águas provém da atmosfera e é transportada pelos rios.

Os meteorologistas e os hidrologistas podem contribuir para o estudo e o controlo da poluição das águas de uma forma decisiva. Parte da contaminação das águas provém da atmosfera. E não é só a precipitação ácida. Parece que uma percentagem elevada do mercúrio e de outros metais tóxicos que se depositam nos mares e nos lagos são transportados pela atmosfera. Julga-se que se passa o mesmo com os materiais fosfatados ou azotados que entram nos Grandes Lagos do continente Americano.

Por outro lado, existe um intercâmbio de gases muito intenso entre a atmosfera e a superfície da água. É o caso do oxigénio que se dissolve nas águas e contribui para manter a sua qualidade e do anidrido carbónico que, depois de lançado na atmosfera, é em parte absorvido pelos oceanos.

O aquecimento e o arrefecimento de grandes massas de água são condicionados pelas condições meteorológicas. Um Inverno rigoroso seguido dum aquecimento rápido na Primavera pode originar fortes gradientes verticais da temperatura da água nas camadas superiores dos lagos, gerando uma grande estabilidade. Esta pode dificultar a dispersão de águas de esgotos e de outros efluentes que ali são lançados, originando grandes bolsas de contaminação devido às concentrações elevadas que se passam a observar em regiões confinadas de grande estabilidade.

A permuta de calor entre uma massa de água e o ar adjacente é fundamental para diminuir a poluição térmica. O combate à poluição, proveniente do derrame de petróleo nas águas, só se pode fazer eficientemente com o conhecimento dos ventos, da agitação marítima e das correntes marítimas dominantes.

CAPÍTULO IX

**EPÍLOGO: A ÁGUA, A VIDA,
E AS CIVILIZAÇÕES**

1. A ENERGIA: A ÁGUA, O HOMEM E O ECOSISTEMA

O homem é parte integrante dum grande sistema dinâmico, o ecossistema, que compreende materiais vivos e inertes em constante mutação devido aos processos físicos e químicos que ali ocorrem. O sistema está constantemente a variar e a ajustar-se ao seu universo complementar e a ser permanentemente percorrido por um fluxo de massa e um fluxo de energia.

A energia solar constitui, de longe, a maior fonte fornecedora de energia ao sistema. O resto provém de energia do interior da Terra, ou das marés e correntes dos oceanos. Parte da energia solar é captada pelas plantas, que através da fotossíntese a transformam em energia química dos alimentos. Outra parte vai fazer accionar o ciclo hidrológico, cujo ramo aéreo realiza o transporte permanente de água doce (dessalinização) dos oceanos para os continentes, e sem a qual não poderiam existir nem animais, nem plantas. Outra parte, ainda, mantém a temperatura do globo e da baixa atmosfera suficientemente elevada para que a vida possa existir. A energia química das plantas é a fonte principal dos alimentos dos animais vivos à superfície da Terra. Há, depois, uma fracção desta que é concertida em calor, quando arde, ou que é soterrada e armazenada como energia fúsil (petróleo, carvão, gás natural, etc.).

A energia da alimentação pode passar através dos animais que se alimentam de plantas (herbívoros) para animais carnívoros ao longo das várias fases duma «cadeia de alimentos». Estas são, na realidade, canais de energia em que esta se transforma e se dissipa.

O ecossistema é um reservatório de energia e de massa armazenadas nas plantas, nos animais e noutros materiais inorgânicos e inertes. Os processos naturais, quase em regime estacionário, trans-

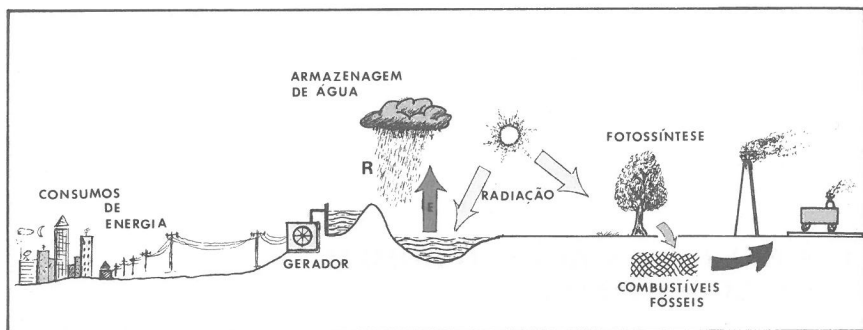


Fig. 9 — A água, a energia e o homem.

formam a massa e a energia, gerando um mínimo de entropia, atrasando, portanto, a degradação da energia.

Como a energia não pode ser transformada em trabalho, sem que alguma se perca, sob a forma de calor, eventualmente toda a energia disponível se dissipará. No início de cada fase da cadeia de alimentação há sempre uma perda enorme de energia.

A energia é multiforme e variada. Para nós, hoje, significa eletricidade, gasolina, carvão, gás e hidrogénio que operam frigoríficos, aquecem as casas e fazem mover os automóveis, os aviões e os foguetões. No século XIX significava carvão, coque, máquina a vapor, ferro, aço, caminhos de ferro, navios a vapor. Na Renascença significaria quedas de água, rodas hidráulicas, vento e animais de tiro. No Império Romano significava canais, moinhos, escravos, bestas de carga. No entanto, nenhuma destas formas é das mais fundamentais. Para o homem estas são, na realidade, a radiação solar e a energia química dos alimentos, que são interdependentes.

De entre o complexo de todos os recursos materiais explorados pelo homem, no grande ecossistema que é o mundo, a água tem uma importância particular. A água é indispensável à existência e evolução de ecossistemas, de animais e de plantas.

A água é um factor determinante das condições do clima e da fertilidade dos solos, por constituir, principalmente na fase líquida, um dos meios indispensáveis para a nutrição das plantas.

A precipitação, o mais importante manancial de água doce no globo é um dos factores fundamentais da agricultura, importante

não só pela quantidade total acumulada, como pela sua distribuição no tempo. Na fase vapor, a água condiciona a humidade do ar e o conforto humano. Além disso, regula a evaporação e a evapotranspiração das plantas à superfície. A água sob a forma de gelo e de neve protege a vegetação das geadas e, ao derreter, contribui para a recarga da humidade do solo e com o degelo vai alimentar o caudal dos rios.

2. A ÁGUA, A ENERGIA E A CULTURA

A vida existe na Terra devido à energia radiante proveniente do Sol. É a causa determinante das temperaturas em que os seres vivos podem viver; gera a circulação geral da atmosfera e os vários regimes de ventos regionais e locais; origina e mantém o ciclo hidrológico. Fornece a energia que leva ao crescimento das plantas e dá-nos a luz do dia. Sem plantas não haveria animais nem homens.

O desenvolvimento cultural e social do homem e a sua diferenciação de outros animais só foram possíveis porque explorou e controlou fontes de energia exteriores a si próprio, indo muito além das energias provenientes das plantas selvagens ou do calor natural do ambiente. Descobriu o fogo e aprendeu a controlá-lo. Faz a agricultura e domesticou animais. Inventou ferramentas e é capaz de raciocinar em termos abstractos.

O homem distingue-se dos outros animais, principalmente, pela sua cultura. Pode dizer-se que engloba: a língua, a história, a criação de estruturas, o uso de instrumentos e invenção de máquinas, a sua organização social. A evolução cultural do homem é a história do seu controlo crescente das fontes de energia e das tecnologias que resultam da sua utilização. Além da energia, a água é outro elemento decisivo para a vida na Terra. A água e a energia andam de mãos dadas na evolução da vida do homem, nas suas civilizações, nas suas culturas e na sua história. Mas a água é ainda muito mais: é o elemento predominante em toda a matéria viva. Mais de 60% em peso da matéria viva é constituída por água.

A tecnologia da energia começou com o cajado, com a alavanca e com o atirar duma pedra. Mas estas tecnologias não correspon-

dem a um aumento de energia. Na sua procura de controlar a energia, o homem passou a utilizar os animais de carga, que domesticou, e os escravos. Com a descoberta de sistemas inanimados de concentração e de recolha de energia, passou do emprego de utensílios primitivos ponteados para a construção de ferramentas sofisticadas.

A água constitui uma dávida da natureza, que permite a vida. Os rios foram a força motriz das grandes civilizações da antiguidade e foram as grandes vias de acesso a regiões desconhecidas. Foi um meio de transporte indispensável para o progresso do homem. Foram os rios os grandes mananciais de água que contribuíram para a descoberta da agricultura.

A evolução da agricultura e a sua expansão, desde os montes da Ásia Menor até às planuras áridas do Tigre e do Eufrates, levaram à irrigação e ao desenvolvimento das cidades há 5 ou 6 mil anos. Foi por essa altura que o homem, pela primeira vez, foi capaz de recolher energia da roda hidráulica e das quedas de água.

A água é usada pelo homem para fins domésticos; para a produção agrícola e industrial; para as pescas; para a produção de energia; para fins recreativos e para a navegação fluvial e marítima.

Recorrendo uma vez mais à Carta Europeia da Água diremos: «A água é um património comum, cujo valor deve ser reconhecido por todos. Cada um tem o dever de a economizar e de a utilizar com cuidado.»

3. A ÁGUA, AS CIVILIZAÇÕES E A HISTÓRIA

3.1. O homem e a água

A história da água é a história da humanidade. A água modelou as suas actividades fundamentais e tem ditado os padrões de crescimento de civilizações. As situações extremas de cheias frequentes e de secas prolongadas, acabaram com organizações sociais e com civilizações, enquanto que situações mais equilibradas e generosas têm permitido o desenvolvimento e florescimento doutras. E, assim, se explica que uma região temperada do hemisfério Norte tenha tido um papel predominante nas civilizações actuais, enquanto

que outras afortunadas com o clima e com a disponibilidade em água continuem com civilizações menos desenvolvidas.

O melhor conhecimento da distribuição da água disponível na Terra e a compreensão da dinâmica da sua circulação representam um grande passo para entender melhor a história da vida do homem na Terra.

A água tem constituído, através dos tempos, um repositório inesgotável de histórias fascinantes, de lendas, de mitos e de crenças dos nossos antepassados e continua a constituir uma fonte perene de inspiração de poetas e de artistas. A água é, simultaneamente, uma força motriz e um espelho da Ciência! É uma força motriz, porque o homem sentiu a necessidade de explicar o que observa na Natureza e em tudo vê a água: são as nuvens e a chuva; os travões, os relâmpagos e os arco-íris; os rios e os lagos; as fontes e os animais; as cheias e as secas; a prosperidade e as fomes. O homem teve de perceber porque é que a água congela e se evapora; porque dissolve tantas substâncias e porque é que custa tanto a ferver.

É um espelho da Ciência, porque nela se reflectem e miram com os seus progressos a Química e a Física; a Meteorologia e a Hidrologia; a Geofísica e a Oceanografia; a Biologia e a Agronomia; a Geografia e a Ecologia; a Economia e a Sociologia; a Engenharia e a Arquitectura.

No decurso da história do homem, os rios têm tido um papel predominante no desenvolvimento e no progresso de culturas e de civilizações. E não é por mero acaso que os rios têm tido um tratamento privilegiado, quando comparado com a atenção dispensada aos outros elementos do ciclo hidrológico.

Desde os primórdios da sua história que o homem se estabeleceu perto dos rios, se deslocou ao longo dos rios em busca do desconhecido, bebeu a sua água, e se alimentou dos peixes que neles pescava.

À medida que as forças produtivas se foram desenvolvendo, o homem começou a alargar o uso das águas dos rios para a irrigação. Mais tarde foi capaz de utilizar os cursos de água como fontes de energia, descobrindo as noras e as primeiras rodas hidráulicas primitivas para moer o pão, depois aperfeiçoadas nos rodízios e engrenagens que fizeram progredir a indústria dos têxteis e dos metais. Depois foi a máquina a vapor. Por fim, as centrais hidroeléctricas dos nossos tempos que produzem biliões de quilowatts hora de energia,

que nos alumiam e aquecem e levam a energia às grandes cidades e aos lugarejos mais recônditos.

3.2. A água nas grandes civilizações

As grandes civilizações do passado estão indissolúvelmente ligadas aos grandes rios: a egípcia ao Nilo; a assíria e caldaica ao Tigre e ao Eufrates; a indiana ao Indus e ao Ganges. Não é por acaso que as velhas cidades da Europa e da Ásia tiveram a sua origem, cresceram e floresceram ao longo dos grandes rios. Outro tanto se observa com a implantação das grandes cidades do Novo Mundo.

Depois da era dos descobrimentos, os rios continuaram a ser as grandes vias para a descoberta, conhecimento e exploração dos grandes continentes e do Novo Mundo. Os rios de São Lourenço e do Mississipi, assim como os Grandes Lagos, tiveram um papel decisivo na exploração do continente Norte Americano. O mesmo se pode dizer do Amazonas e do Paraguai para o conhecimento e exploração da América do Sul. Já quase nos nossos dias, foi a exploração das vias abertas pelos grandes rios da África, como o Nilo, o Niger, o Congo, o Zambeze e o Orange que permitiu o reconhecimento definitivo do grande continente africano.

A vida do homem tem dependido das vicissitudes dos rios e do seu regime: tem sofrido com as cheias e, ao mesmo tempo, aproveitando com o seu excesso de caudal na irrigação. Mas o homem de tudo recebeu ensinamentos. As dificuldades que os rios lhe depararam serviram como desafios e incentivos para o progresso: aprendeu a fazer pontes, a construir embarcações, a erigir diques. Depois, o homem atreveu-se a rectificar os leitos dos rios, a regularizar o seu caudal, a construir canais, a edificar barragens e, até, a desviar os seus cursos, criando uma nova geografia da água.

*
* *

Depois da última glaciação, há cerca de dezoito mil anos, o clima melhorou substancialmente. Em consequência do degelo, o nível médio do mar subiu apreciavelmente. A temperatura do ar aumentou e o clima tornou-se mais chuvoso, com a flora e a fauna

estendendo-se muito mais a norte. Na época glacial os gelos teriam coberto quase toda a Europa Central e estendiam-se até aos Alpes, aos Pirinéus e aos Cárpatos. Surgiu a cultura do Neolítico e o homem aprendeu a semear, a escolher e a armazenar; o homem começou a domesticar animais, que utilizava no transporte ou na alimentação. O homem deixou de ser um angariador furtivo de frutos e de plantas que a Natureza lhe oferecia, ou um caçador inseguro de uma fauna que surgia de forma irregular e furtiva. Foi com o ressurgir da «idade do clima ótimo», que se verificou um clima verde e chuvoso no Sara, com grandes lagos de que o lago Chade é apenas uma reminiscência. A desertificação do Sara ter-se-á intensificado a partir de 2500 anos a. C. Foi no período de «clima ótimo», entre 4000 anos e 3000 anos a. C., que começaram a desenvolver-se as grandes civilizações da Antiguidade: a egípcia, a assiro-caldaica, a persa, a indiana, a chinesa, etc.

Entretanto, desenvolveu-se a Civilização Grega, em que as artes atingiram um nível ainda não ultrapassado e o pensamento um desenvolvimento tal que se estende até aos nossos dias. Surgiu, depois, o Império Romano, que herdou a tradição cultural helenística e levou o progresso material, a organização administrativa e o direito romano a todo o mundo então conhecido.

Os Romanos estenderam a sua civilização até à Península Ibérica, à Inglaterra, à Alemanha e ao Mar Negro. Introduziram novas plantas e novas práticas agrícolas, construíram estradas, pontes e canais. Ensinaram a utilizar a água em grandes obras hidráulicas e, através dos grandes aquedutos, contribuíram para a formação de novas cidades e com os moinhos e a roda hidráulica promoveram a industrialização.

Durante a idade áurea do Império Romano toda a orla do Mediterrâneo teria tido um clima mais chuvoso e mais frio. Foram tempos de grande fertilidade na Grécia e no Norte de África, com uma agricultura muito próspera. Foi, por isso, possível surgir e atingir grande pujança a Civilização Cartaginesa.

A escassez ou a abundância de água podem levar ao declínio da prosperidade, à queda de civilizações e ao apagamento de culturas. Assim, admite-se hoje que a queda do Império Romano e, mais tarde, a do Califado Árabe de Córdova podem, em parte, atribuir-se à diminuição da água disponível.

Numa obra célebre e de certo modo polémica *Discontinuidade*

na *Civilização Grega*, o Prof. Rhys Carpenter da Universidade de Cambridge explica o colapso da Civilização Micénia no século XII a. C., o abandono da Ásia Menor pelos Hititas, assim como o declínio da Civilização Bizantina no século VIII (d. C.) com base na dissecação progressiva, resultante da diminuição acentuada da precipitação, associada às variações do clima. Ainda mais tarde, já no século XVI, a Gronelândia teve que ser abandonada pelo excesso de neve. O mesmo esteve para acontecer com a Islândia também no século XVI.

É devido à escassez de água que vastas regiões da África, da Ásia, da Austrália e da América do Sul, que poderiam ser férteis, são inóspitas e quase despovoadas. Na procura da água o homem tem aguçado a sua argúcia e a sua criatividade. No mundo árabe a gestão da água atingiu progressos surpreendentes e que ainda hoje subsistem. É o caso dos grandes sistemas de canais subterrâneos (*khanat*) em que a água que se infiltra é recolhida e depois transportada por gravidade dos aquíferos mais elevados para regiões a níveis mais baixos. Este transporte, por vezes até grandes distâncias, vai alimentar as populações. O sistema que dura há mais de 2000 anos fornece ainda hoje cerca de 75% da água consumida no Irão. O sistema estendeu-se a todo o mundo árabe com a expansão islâmica dos séculos VIII e IX.

Na «Pequena Idade do Gelo», que se seguiu à Alta Idade Média e durou até meados do século XIX, o clima arrefeceu e o tempo passou a ser muito mais rigoroso e chuvoso. Mesmo na Europa do Sul, os Verões eram muito mais chuvosos e frios e os rios gelavam com frequência. Foram as condições meteorológicas adversas que, no Verão de 1588, destruíram a Invencível Armada. Foi o Inverno Russo de 1810, então mais inclemente do que agora, que derrotou os exércitos de Napoleão.

Todos temos ainda presente as secas do Sahel e as fomes da Etiópia dos nossos dias. A desertificação continua a alastrar de forma avassaladora, não apenas por efeitos naturais, mas também, e muito, pela má gestão dos recursos naturais e das distorções que o homem introduz no ciclo hidrológico à escala local e regional.

E agora, ao encerrar estas considerações, vamos transcrever da obra famosa *History of Civilization* do historiador Will Durant, uma das grandes autoridades na história do homem, o seguinte passo:

«Certain factors condition civilization and may encourage or impede it [...] civilization is an interlude between Ice Ages; at any time current of glaciation may rise again, cover with ice and stone the works of man, and reduce life to some narrow segment of the earth [...].

The heat of the tropics [...] are hostile to civilization, rain is necessary [...]; the unintelligible whim of the elements may condemn to dissection regions that once flourished empires, like Ninevah and Babylon».

Agora, à guisa de epílogo, bem podemos juntar que a água além de ser um factor essencial da vida é também um agente modelador da cultura e mãe de civilizações, porque:

«[...] a chuva e a neve descem do céu e não voltam mais para lá, sem terem regado e fecundado a Terra e feito germinar, dando o grão para semear e o pão para comer [...].»

Livro do Profeta Isaías, 55:II

BIBLIOGRAFIA

- Alguns Aspectos da Termodinâmica e da Energética dos Seres Vivos*, José Pinto Peixoto, Ed. da Universidade do Algarve, Faro, 1985.
- Ciclo (O) a Água em Escala Global* (2.^a edição) José Pinto Peixoto, Ed. da Comissão Nacional do Ambiente, 1980, Lisboa.
- Climate History and the Modern World*, H. Lamb, Ed. Methucen, Londres e Nova Iorque, 1982.
- Discontinuity in Greek Civilization*, Rhys Carpenter, Cambridge University Press, 1966.
- Dynamic Hydrology*, P. S. Eagleson, Mac Graw-Hill, Nova Iorque, 1972.
- Ecosistema (O) e o Meio-Físico*, Germano Sacarrão, Ed. da Comissão Nacional do Ambiente, Lisboa, 1982.
- Gestão (A) da Água, Princípios Fundamentais e Sua Aplicação em Portugal*, L. Veiga da Cunha, A. Santos Gonçalves, V. Alves de Figueiredo, Mário Lino, Fundação Gulbenkian, Lisboa, 1980.
- Sistema (O) Climático e as Bases Físicas do Clima*, José Pinto Peixoto Ed. Secretaria de Estado do Ambiente e dos Recursos Naturais, Lisboa, 1987.
- World Hydrology*, R. L. Nace, Intern. Ass. Scient. Hydrology, n.º 92, 1972.