

O
CICLO DA ÁGUA
EM
ESCALA GLOBAL

JOSÉ PINTO PEIXOTO

COMISSÃO NACIONAL DO AMBIENTE



José Fernando
Cunha Alencar
Acampamento de

Y. T. B. S.

O CICLO DA ÁGUA
EM ESCALA GLOBAL

22 out 82

VOLUMES PUBLICADOS

- O CULTO DA NATUREZA por J. Vieira Natividade. 1976
A POLÍTICA DO AMBIENTE E A QUALIDADE DE VIDA por M. Gomes
Guerreiro. 1977
A PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA DA TERRA por Luís S. Barreto. 1977
O CICLO DA ÁGUA EM ESCALA GLOBAL (1.ª edição) por J. Pinto
Peixoto. 1977
O AMBIENTE E A ECONOMIA por Luís S. Barreto. 1977
A ÁGUA. A ESCASSEZ NA ABUNDÂNCIA por Zózimo Rego. 1979
ECOLOGIA DOS RECURSOS DA TERRA por M. Gomes Guerreiro. 1979
A VIDA E O AMBIENTE por Germano da Fonseca Sacarrão. 1979

PRÓXIMOS VOLUMES

- A RADIAÇÃO SOLAR E O AMBIENTE por J. Pinto Peixoto
A ECOLOGIA DA LUZ E DA VIDA por Germano da Fonseca Sacarrão
A METEOROLOGIA E O AMBIENTE por J. Pinto Peixoto e T. Espírito
Santo

O CICLO DA ÁGUA
EM
ESCALA GLOBAL

JOSÉ PINTO PEIXOTO

2.ª Edição

SECRETARIA DE ESTADO DO URBANISMO E AMBIENTE
COMISSÃO NACIONAL DO AMBIENTE
LISBOA 1979

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	
A Problemática da Água	9
O APARECIMENTO E A DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NA TERRA	13
O CICLO DA ÁGUA	18
O PAPEL DA ATMOSFERA	22
Água precipitável	25
O fluxo de vapor de Água na atmosfera	27
CONTROLE DO CICLO DA ÁGUA	41
CONTROLE DO RAMO ATMOSFÉRICO	43
CONTROLE DO RAMO TERRESTRE	45
CONTROLE DOS OCEANOS	48
CONTROLE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	52
ALGUNS COMENTÁRIOS FINAIS	55
EPÍLOGO	
A circulação da Água — O mais espectacular de todos os sistemas de dessalinização	61
APÊNDICE I	66
APÊNDICE II	68
RESUMO	75
SUMMARY	81
RESUME	83
BIBLIOGRAFIA	95

Agradecimentos

O autor agradece ao Dr. José Rocha Faria as sugestões para a orientação deste trabalho e aos Drs. Leonel Neves e Ilídio Martins a colaboração prestada.

INTRODUÇÃO

A Problemática da Água

A água é o combustível da vida! A água e o ar constituem as necessidades mais essenciais ao homem. Sem água a existência da vida na Terra seria impossível. A escassez de água pode levar ao declínio da prosperidade, à queda de civilizações e ao desaparecimento de culturas. De facto, admite-se que a queda do Império Romano, e mais tarde a do Califado Árabe, se poderão em parte atribuir à diminuição da quantidade de água disponível. É devido à falta de água que vastas regiões da África, da Ásia, da Austrália e da América do Sul, que poderiam ser produtivas e prósperas, são inóspitas e quase despovoadas.

Na natureza, em regra, todos os organismos vivem em ambientes com as condições adequadas à sua existência. O espaço em que se dá a permuta e a troca de meio e de energia entre um sistema, constituído por um ser vivo, e o seu universo complementar na natureza, dependendo de matéria orgânica ou mineral, constitui um ecossistema. A água é indispensável à existência e à evolução dos ecossistemas vegetais e animais. Além disso, a água constitui ainda o ambiente natural em que vivem muitas espécies. A água é portanto essencial à vida. O corpo humano tem aproximadamente 65 a 75 por cento de água, e uma perda de 15 por cento conduz irremediavelmente à morte. O homem requer 2,5 a 3 litros de água por dia, incluindo a que está contida nos alimentos. Pode viver sem se alimentar durante 2 a 3 semanas, mas sem beber água não sobrevive 3 a 4 dias.

A água é ainda essencial para o desenvolvimento industrial e agrícola. Por exemplo, a produção de uma tonelada de trigo nas regiões

tropicais necessita de cerca de 8000 toneladas de água. Na indústria, para produzir uma tonelada de aço são necessárias cerca de 200 toneladas de água; e para refinar uma tonelada de gasolina consomem-se 20 toneladas de água. Na tábua junta dão-se alguns números que mostram a importância da água em vários sectores da economia.

Produção de 1 tonelada	Necessidades de água em toneladas
gasolina	20
aço	200
acetato	900
neoperene	2 500
luzerna	760
trigo	8 000
vitela	31 000

Um dos índices mais significativos para avaliar o nível de vida duma sociedade é o consumo de água por habitante. A transição de uma sociedade rural e agrícola para uma sociedade urbana e industrializada é acompanhada por um aumento muito substancial do consumo de água. O crescimento económico de uma sociedade é caracterizado por um consumo de água que aumenta segundo uma lei crescente, não linear.

Há que proceder a uma utilização sucessiva e intensiva da água e provocar a sua policirculação com purificações adequadas. Para isso, a indústria tem que aprender a fazer a reciclagem da água, o que, além de levar a economias consideráveis deste recurso, aumenta a produtividade global. Só assim se evita a degradação da água e se promove a sua indispensável poupança. Sabe-se que a British Steel Corporation, em Scunthorpe (Inglaterra), por meio da reciclagem com policurso adequado da água, consegue na produção de 1 tonelada

de aço gastar apenas 5 toneladas de água, em vez das 200 que consumia em condições normais.

Os cursos de água têm que ser drenados, para evitar alterações fisiográficas, e as águas devem ser limpas por meio de estações de purificação, não só por razões de conservação e de preservação do meio ambiente, como por razões de sobrevivência das formas de vida nas próprias águas e nas suas vizinhanças.

É muito estranho que na indústria e na agricultura se utilize água da mesma qualidade daquela que se consome em usos domésticos. Geralmente a agricultura e a indústria não exigem padrões de qualidade tão elevados.

A problemática levantada pelas necessidades em água, como se vê, surge em todos os sectores da vida humana; e só o estudo cuidado e persistente poderá conduzir a soluções racionais dos pontos de vista económico, social e de saúde pública. É que a água constitui um instrumento impulsionador do progresso, um factor de prosperidade e um agente modelador de civilizações e de culturas.

O conhecimento das propriedades físicas e químicas da água, assim como o do seu movimento e da sua dinâmica, torna-se indispensável para obter a compreensão adequada do comportamento da água em condições naturais. A Ciência que se ocupa deste estudo é a **Hidrologia**. Podemos dizer que a Hidrologia estuda a água da Terra nas suas três fases, sólida, líquida e gasosa, as suas propriedades químicas e físicas, a sua ocorrência, circulação e distribuição, a sua interacção com o ambiente e as suas relações com os seres vivos.

A água é um recurso natural renovável, em circulação constante, acompanhada por transições de fase, e que estabelece a ligação entre a terra, os oceanos e a atmosfera. Em cada ciclo a água do Globo é transferida por evaporação para a atmosfera, onde é transportada e se condensa, formando as nuvens, para voltar à Terra por precipitação; na superfície da Terra a água escoar-se ou fica em parte retida, infiltrando-se e por fim volta a evaporar-se de novo.

A esta sucessão de fenómenos naturais em cadeia fechada chamamos ciclo hidrológico, o qual apresenta dois ramos: o que ocorre na atmosfera e se designa por ramo aéreo e o que se observa na terra e constitui o ramo terrestre. Estes factos agora «tão evidentes» eram desconhecidos pelos antigos. Aristóteles, por exemplo, não aceitava que a precipitação fosse a origem principal da água dos rios. Só no século XVII, é que Pierre Perrault, um engenheiro francês, ao estudar o comportamento do rio Sena foi capaz de estabelecer definitivamente a correlação entre o escoamento e a precipitação.

Começa agora a sentir-se em todo o mundo o perigo do desequilíbrio entre a água necessária e a água disponível. É que, apesar da importância fundamental que a água tem para a sobrevivência e para a prosperidade da humanidade, tem vindo durante séculos e séculos a ser esbanjada e usada de forma extremamente ineficiente. Só recentemente se tem vindo a tomar consciência deste problema e a encarar, de forma um tanto tímida, toda a problemática da água, procurando desenvolver alguns esforços no sentido de aumentar a rentabilidade da sua utilização e de investigar as possibilidades de controlar o ciclo natural da água.

A fim de compreender a razão porque só agora se começa a emprender uma operação de tal envergadura, torna-se necessário passar em revista alguns dos progressos obtidos no estudo da Hidrologia.

Nas últimas décadas o balanço hídrico à superfície da Terra tem vindo a ser objecto de intensa investigação e estudo. Até ao final da década dos trinta, a investigação incidiu em grande parte no ramo terrestre do ciclo da água, através do exame e análise do balanço da precipitação, da evaporação, do escoamento superficial e subterrâneo e das variações da quantidade de água armazenada. Este método tradicional do estudo do balanço hídrico conduziu a resultados nem sempre universalmente aceites, e que quando muito eram representativos de condições regionais ou locais. A dificuldade reside fundamentalmente na avaliação da evaporação. A evaporação à superfície

da Terra não é uniforme. A água libertada sob a forma de vapor é continuamente removida por difusão turbulenta, pelas correntes de convecção devidas à diferença de temperatura e pelos ventos. Todos estes factores condicionam o fenómeno da evaporação. Acresce ainda que, por enquanto, é muito difícil, senão impossível, medir directamente a evaporação natural. A precipitação pode, em parte, ser medida por métodos directos, mas o fenómeno da precipitação ocorre muitas vezes de forma dispersa, o que dificulta a obtenção duma amostragem com significado físico real.

Em face destas dificuldades, estudos recentes têm permitido atacar o problema do balanço da água através do estudo do ramo aéreo do ciclo, em vez do processo tradicional que se baseava no estudo do ramo terrestre. O novo método assenta no princípio da continuidade e conservação da massa de água na atmosfera, em vez da sua conservação à superfície do Globo. Com o aumento da rede de estações aerológicas e a melhoria dos métodos de observação da atmosfera em altitude, tornou-se possível estudar quantitativamente o comportamento do ramo aéreo do ciclo hidrológico. Os resultados assim obtidos permitem avaliar o balanço hídrico à superfície da Terra. Esta nova linha de orientação veio dar novo ímpeto à Hidrologia e alargar o domínio da investigação das relações entre o fluxo do vapor de água na atmosfera e o ciclo hidrológico. E é com base nesta linha de investigação, que começam a emergir esquemas específicos possíveis para o controle do ciclo da água.

O APARECIMENTO E A DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NA TERRA

Aceita-se hoje que a Terra, durante os primeiros 500 milhões de anos da sua existência, teria sido um corpo sólido à temperatura de cerca de 1000°C. A medida que os elementos radioactivos, tais como

o urânio, o tório e outros, de vida média muito mais curta, se foram destacando, o calor libertado na desintegração provocou um aumento considerável da temperatura no interior da Terra, o que por sua vez levou à fusão dos elementos mais densos, como o ferro e o níquel. Com esta fusão e sob o efeito da pressão e da acção da gravidade, os elementos pesados foram-se concentrando na região central da Terra, constituindo o núcleo interno, enquanto que os elementos mais leves ficaram distribuídos nas camadas exteriores superficiais, donde teria resultado a actual estrutura física do Globo terrestre.

Na fase inicial da sua existência, a Terra não teria sido rodeada por qualquer atmosfera. De facto, os elementos leves, tais como o hélio, o hidrogénio, etc., por terem uma densidade muito pequena ter-se-iam escapado, devido aos valores elevados da velocidade molecular, furtando-se ao efeito da gravidade. Na Terra não havia oceanos; e a superfície do Globo teria sido povoada por vulcões em actividade, que lançariam para o exterior lavas, gases (principalmente hidrogénio) e vapores (constituídos principalmente por vapor de água). As moléculas de água lançadas pelas emissões vulcânicas sofriam, por acção da radiação solar, uma forte dissociação, quase imediata, originando hidrogénio e oxigénio. O hidrogénio ter-se-ia escapado e o oxigénio teria reagido com o metano (CH_4) e com o amoníaco (NH_3), para formar o anidrido carbónico (CO_2) e o azoto (N). Por isso, aceita-se que a atmosfera original da Terra teria sido constituída por uma mistura destes dois gases. A transição para uma atmosfera do tipo da actual ter-se-ia dado quando apareceu a vegetação que, ao absorver o anidrido carbónico, libertou o oxigénio. Depois, à medida que a temperatura da Terra foi baixando e os processos iniciais da formação da atmosfera se estabilizaram, deu-se a condensação do vapor de água cujo excesso se depositou nas depressões, dando origem à formação dos oceanos. Por outro lado, com os fenómenos de precipitação intensa que passaram a ocorrer, surgiram os cursos de água, os lagos, etc.

Em princípio, a água é um componente conservativo do sistema Globo-atmosfera. Pode ocorrer nas três fases: sólida, líquida e gasosa, porque os valores da pressão e da temperatura predominantes na Terra, estão aquém dos valores do ponto crítico da água ($p=218$ atmosferas; $T=647^{\circ}\text{C}$).

As temperaturas de transição de fase (fusão, condensação e solidificação) da água são bem definidas. Uma pequena variação de temperatura da atmosfera ou do Globo pode alterar completamente as condições do ciclo hidrológico: retardando-o devido à congelação, por exemplo, ou ao facto de a temperatura descer consideravelmente abaixo do ponto de fusão, provocando mesmo a glaciação; ou acelerando-o, intensificando a evaporação com o aumento da temperatura.

As transições de fase são acompanhadas por transformações de energia sob a forma de calor latente, que são fundamentais no comportamento global do ciclo hidrológico.

Os outros componentes da atmosfera existem exclusivamente na fase gasosa, porque os valores da pressão atmosférica e da temperatura ambiente que predominam no sistema atmosfera-Globo são superiores aos da temperatura e da pressão crítica correspondentes.

Pode aceitar-se que a quantidade de água existente na Terra se tem mantido constante desde o aparecimento do homem. É certo que tem aparecido alguma «água nova», devido a vulcões e à existência de fontes termais. Mas a maior parte do vapor lançado pelos vulcões provém da precipitação que, ao infiltrar-se, provocou a saturação das camadas superiores da crosta; ou da água dos oceanos que ficou retida quando se depositaram sedimentos marinhos. Por outro lado, também se verifica uma certa destruição por fotodissociação do vapor de água, provocada pela radiação solar. Na escala geológica, ambos os efeitos se podem considerar desprezáveis e só se poderiam tornar significativos através dos efeitos acumulados no decurso de muitos milhões de anos.

A água actualmente existente pode considerar-se distribuída por três reservatórios principais que, pela ordem de importância, são: os oceanos, os continentes e a atmosfera. O interior da Terra contém uma quantidade apreciável de água, em dissolução ou combinada quimicamente com as rochas, mas não é fácil fazer uma estimativa fundamentada.

Cerca de 97,3 por cento de toda a água da hidrosfera existe nos oceanos; e, dos restantes 2,7 por cento, 2,15 por cento existem nos glaciares e calotes geladas polares da Ártica e Antártica e os restantes 0,65 por cento nos lagos, rios, mares interiores e na atmosfera. Em princípio, só esta última fracção constitui a reserva dos recursos hídricos disponíveis para o homem.

Em termos de volume, a quantidade total da água existente na hidrosfera é de $1440 \times 10^6 \text{ km}^3$, sendo nos oceanos cerca de $1350 \times 10^6 \text{ km}^3$. A quantidade total de água armazenada na atmosfera, que se mantém praticamente constante, é da ordem de $0,013 \times 10^6 \text{ km}^3$, ou seja 100 000 vezes inferior à quantidade de água dos oceanos. (Fig. 1).

A água depositada nos continentes está distribuída por vários reservatórios, designadamente glaciares ($29 \times 10^6 \text{ km}^3$), água subterrânea ($18,4 \times 10^6 \text{ km}^3$), lagos e rios ($0,2 \times 10^6 \text{ km}^3$) e matéria viva na biosfera ($0,0006 \times 10^6 \text{ km}^3$). A quantidade de água retida nos gelos polares é impressionante, totalizando cerca de 1,8 por cento da água total da hidrosfera. Das águas subterrâneas, as águas vadasas (águas presentes nos solos) perfazem apenas $0,066 \times 10^6 \text{ km}^3$. O restante encontra-se distribuído, de forma quase uniforme, por reservatórios a profundidades abaixo de 800 m.

A distribuição de água na terra, nas várias fases, tem variado no decurso do tempo. Nos últimos milhões de anos, as calotes polares têm aumentado e diminuído periodicamente, acompanhando as grandes flutuações do clima. Se o gelo das calotes fundisse completamente, o nível médio dos oceanos subiria cerca de 60 metros e submergiria

extensas porções do litoral dos continentes. Pelo contrário, durante os períodos de glaciação máxima, o nível médio dos mares poderia ter baixado 140 metros, deixando a descoberto extensas áreas das plataformas continentais. Estas flutuações são acompanhadas de perturbações do ciclo da água.

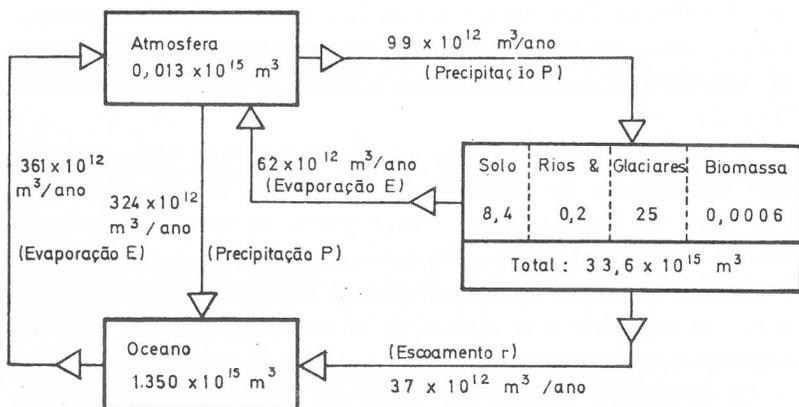


Fig. 1 — O ciclo hidrológico constitui um sistema global fechado, porque a quantidade total de água envolvida no ciclo não varia e tem-se mantido constante no decurso do tempo. É, no entanto, constituído por uma cadeia de subsistemas abertos, porque há permuta de massa e de energia entre eles. Cada um dos subsistemas, com a sua localização geográfica, é caracterizado por um dado armazenamento de água e por fluxos através da parede limitante, como indicam os números que figuram no diagrama. Os subsistemas estão portanto dinamicamente ligados entre si por uma cascata de massa e energia.

A fim de fazer uma ideia das grandezas relativas dos vários reservatórios naturais de água, basta notar que os raios das esferas com volume equivalente seriam de 680 km para os oceanos, 190 km para os glaciares, 130 km para as águas subterrâneas, 36 km para os lagos e rios, 15 km para a atmosfera e 5,2 km para a biosfera.

O CICLO DA ÁGUA

A Terra está a lançar permanentemente vapor de água na atmosfera, através da evaporação à superfície (oceanos, lagos, glaciares, campos de neve, albufeiras, solo, etc.) e através da transpiração da matéria viva que constitui a biosfera. A transferência natural da água da superfície da Terra para a atmosfera é extremamente importante, porque condiciona as características das massas de ar, a energética da atmosfera e o estabelecimento e evolução do ciclo da água. (Fig. 2).

O ciclo hidrológico é o conceito fundamental da Hidrologia. É uma consequência do princípio da conservação da água nas suas três fases na Terra. Descreve uma sequência de fenómenos naturais em que o Globo cede à atmosfera água no estado de vapor, que depois é devolvida em estado líquido ou sólido à Terra, onde é parcialmente retida na superfície e se infiltra ou se escoia, para depois voltar a evaporar-se novamente.

Os fenómenos naturais que constituem o ciclo hidrológico são: (1) transferência de água no estado de vapor, do Globo para a atmosfera, por evaporação da água que existe em estado líquido ou sólido nos mares, lagos, cursos de água, geleiras e campos de neve, ou depositada na superfície, e por transpiração das plantas que existem no solo; (2) transporte de água, nas fases gasosa e sólida ou líquida, pelas circulações locais ou regionais e pela circulação geral da atmosfera; (3) condensação parcial do vapor de água da atmosfera em partículas líquidas e sólidas, que ficam em suspensão no ar, em estado quase coloidal, formando aerossóis, que constituem as nuvens e o nevoeiro; (4) transferência de água, nas fases líquida ou sólida, da atmosfera para o Globo, por precipitação e deposição de hidrometeoros na superfície e nos corpos nela existentes; (5) escoamento e retenção na superfície e infiltração no subsolo da água no estado sólido ou líquido, com absorção pelo sistema radicular das plantas

e formação de cursos de água a caminho do mar ou de lagos e de lençóis friáticos. E eis que o ciclo recomeça de novo.

Há uma constante permuta de energia entre a atmosfera e a superfície da Terra. É esta troca de energia que induz a circulação da água num ciclo contínuo.

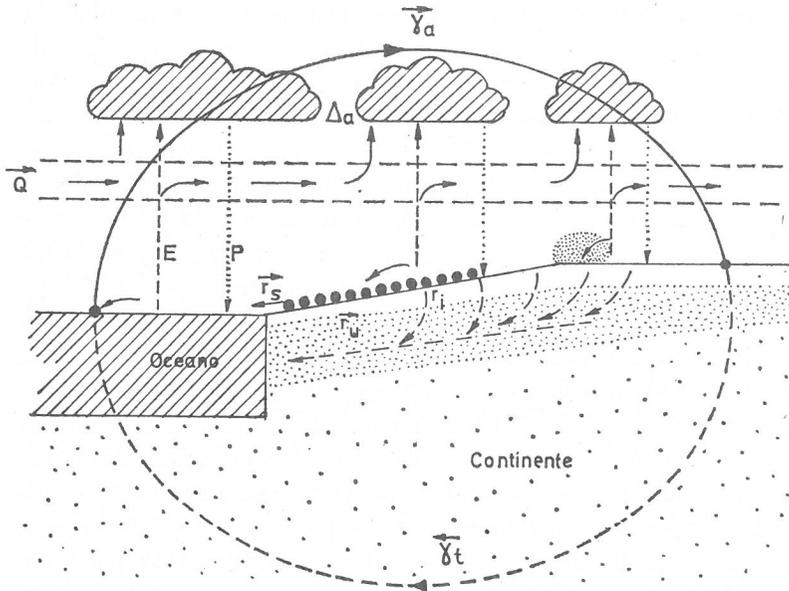


Fig. 2 — O ciclo da água na Terra, ilustrado de forma muito esquemática nesta figura, pode ser encarado como se fosse constituído por duas partes, também designadas muitas vezes por fases ou por ramos: o ramo aéreo (curva a cheio) e um ramo terrestre (curva a tracejado). A Terra lança água para a atmosfera, principalmente através da evaporação dos oceanos. Esta água é transportada pela circulação geral da atmosfera, na fase gasosa (vapor de água) e nas fases condensadas (nuvens). Mais tarde, a água cairá eventualmente sobre a superfície da Terra, por precipitação líquida (chuvas) ou precipitação sólida (neve, granizo). Se cai sobre os continentes, uma parte infiltra-se e outra escoar-se para lagos ou para os rios, que a transportam novamente para os oceanos ou evapora-se directamente para a atmosfera.

Se se exceptuar o fluxo do calor do interior da Terra, que é neste caso desprezável, as energias que fazem mover o ciclo da água são a energia solar e a energia gravítica. A radiação solar que atinge a órbita terrestre é de duas calorias por centímetro quadrado e por minuto, grandeza que se designa por constante solar. A quantidade de energia solar que de facto é recebida pela Terra num minuto é igual ao produto da constante solar pela área da secção eficaz do Globo, ou seja $2,55 \times 10^{18}$ calorias. Isto corresponde a uma média de 0,5 calorias por centímetro quadrado e por minuto, ou seja um quarto da constante solar. Em termos de fluxo de potência, corresponde a cerca de $0,178 \times 10^{18}$ watts. À medida que a radiação solar penetra na atmosfera, a sua componente ultravioleta é fortemente absorvida pelo ozono existente na atmosfera superior, originando um forte aquecimento. Outra parte da radiação é absorvida pelas moléculas do ar e do vapor de água; outra parte ainda é reflectida para o espaço ou simplesmente difundida na baixa atmosfera. No entanto, cerca de 81 por cento da radiação solar incidente no topo da atmosfera atinge a superfície do Globo. Mas um terço desta energia é imediatamente reflectida para o espaço e os dois terços restantes são absorvidos pelos oceanos e pelos continentes. Da energia que é finalmente absorvida, 77 por cento é reemitida através da atmosfera para o espaço, sob a forma de radiação infravermelha. Os restantes 23 por cento são utilizados na evaporação da água.

O factor meteorológico mais importante para o ciclo hidrológico é portanto a radiação solar, a fonte de energia que origina e mantém a circulação da água no ciclo. A temperatura do ar, a humidade relativa e o vento condicionam principalmente o processo de evaporação. Por seu turno, as nuvens, depósitos visíveis da água na atmosfera, condicionam a radiação solar que atinge o Globo.

Como já dissemos, o ciclo hidrológico tem dois ramos distintos: o ramo aéreo atmosférico, em que o fluxo horizontal da água se verifica principalmente na fase vapor, e o ramo terrestre, em que predominam

os fluxos nas fases líquida e sólida. A superfície do Globo — a interface que separa os dois ramos do ciclo — verificam-se processos complexos devido às condições de fronteira. Mesmo em qualquer dos ramos do ciclo os processos físicos que ocorrem não são simples, porque nem a atmosfera nem o Globo são meios homogêneos. Por isso, nos fenómenos do ciclo hidrológico, devem ser tomados em consideração os factores regionais e locais. Vemos portanto que no ciclo hidrológico intervêm processos termodinâmicos e hidrodinâmicos, a que estão associadas várias formas de energia. Assim, a transformação de energia radiante em energia térmica permite a evaporação da água que, ao ser condensada, liberta energia sob a forma de calor latente; e as gotas formadas, ao caírem por acção da gravidade, constituem a precipitação. As causas fundamentais do ciclo hidrológico, que se designam por factores fundamentais do ciclo hidrológico, são portanto: a radiação solar (energia radiante), a gravidade (energia geopotencial) e as transições de fase (variação da entalpia). Como factores secundários podemos então considerar a temperatura, a humidade, o vento, a nebulosidade, a natureza da superfície evaporante e receptora da precipitação.

Consideremos, agora, algumas dificuldades das medições dos elementos do ciclo hidrológico. A precipitação pode ser medida com razoável precisão, num dado local da superfície do Globo, desde que se disponha de um udómetro devidamente exposto. Surgem, no entanto, na medição dois tipos de complicações. Sobre os continentes a precipitação tem um carácter pontual, e a interpolação espacial é, por vezes, delicada. Nos oceanos, as observações efectuadas em navios são pouco numerosas para as vastas regiões a cobrir. Por outro lado, as estações localizadas em ilhas não são representativas das condições características da precipitação das regiões oceânicas adjacentes. Em resumo, podemos dizer que a medição da precipitação em escala planetária é fragmentária e incompleta.

No que se refere à medição da evaporação, a situação é ainda pior. Não existe ainda um instrumento simples, capaz de medir directamente a evaporação natural. Ao usar um evaporímetro tipo tanque ou outro semelhante está a introduzir-se uma incerteza na grandeza a medir, porque a água que se evapora do instrumento altera as condições naturais em que se dá a evaporação. É uma verificação macroscópica do famoso «princípio da incerteza» de Heisenberg. A sua avaliação por via indirecta, através de fórmulas, baseadas nas teorias da turbulência e da difusão vem sempre afectada das limitações inerentes àquelas teorias. Infelizmente, os dados disponíveis para estudos do balanço planetários, são ainda obtidos por processos tradicionais, com todos os seus defeitos.

O PAPEL DA ATMOSFERA

A quantidade de vapor de água na atmosfera apresenta grandes variações no espaço e no tempo, com valores que vão de um mínimo muito pequeno até outros da ordem de 0,6 por cento da massa total de uma coluna de ar. O conteúdo médio anual em vapor de água para toda a atmosfera é bastante pequeno e assume valores de cerca de 0,3 por cento da massa total da atmosfera. Esta quantidade de água é no entanto equivalente à água contida nos lagos da Terra. Portanto a atmosfera constitui um reservatório de água relativamente pequeno: em cada instante apenas contém uma parte ínfima de toda a água que participa no ciclo hidrológico. De facto, se toda a água da atmosfera se condensasse, dela resultaria apenas uma pequena quantidade de precipitação: a água precipitável seria da ordem de 2,5 g por cm². Mas, ainda que a quantidade de água total da atmosfera seja pequena, há um enorme transporte de vapor de água pelas circulações atmosféricas de várias escalas no espaço e no tempo.

A influência e a relevância desta quantidade de vapor de água tão pequena na dinâmica dos climas e nos recursos hidrológicos, é enorme comparada com a sua massa. O vapor de água desempenha um papel decisivo na energética global da Terra e na circulação geral da atmosfera. É o factor mais importante em todos os processos radioactivos da atmosfera, visto que regula o balanço da energia através da absorção e da emissão da radiação. Além disso os processos de evaporação, de condensação e de sublimação determinam e condicionam o balanço de energia e o balanço hídrico que se observam no sistema físico Globo-atmosfera.

Logo que se observa um desequilíbrio entre a evaporação e a precipitação tem geralmente de verificar-se um transporte de vapor de água pelas circulações atmosféricas, a fim de cobrir o défice. Mas poderá esse transporte ser avaliado a partir dos ventos e da distribuição da humidade na atmosfera? No caso afirmativo, passamos a dispôr dum método independente para calcular a diferença precipitação- evaporação. E este método será extremamente útil e permitirá ultrapassar as limitações inerentes à determinação experimental daquelas grandezas separadamente. Devemos acentuar que para calcular o transporte do vapor de água na atmosfera, os valores médios temporais dos ventos e da humidade não são suficientes, porque não se podem desprezar as flutuações dos valores instantâneos em relação aos valores médios. Por isso, o método a seguir deve basear-se na combinação dos valores simultâneos dos ventos e da humidade do ar aos vários níveis (digamos referentes a uma observação por dia) e depois achar os valores médios para um intervalo de tempo suficientemente longo. Este procedimento deve repetir-se para diferentes níveis da atmosfera até uma altitude de cerca de 6 km. Assim, a utilização deste método para as sondagens aerológicas de várias estações conduz a um volume de cálculos enorme. Felizmente que as técnicas actuais de processamento de dados são suficientemente poderosas para permitirem a realização desta grande tarefa.

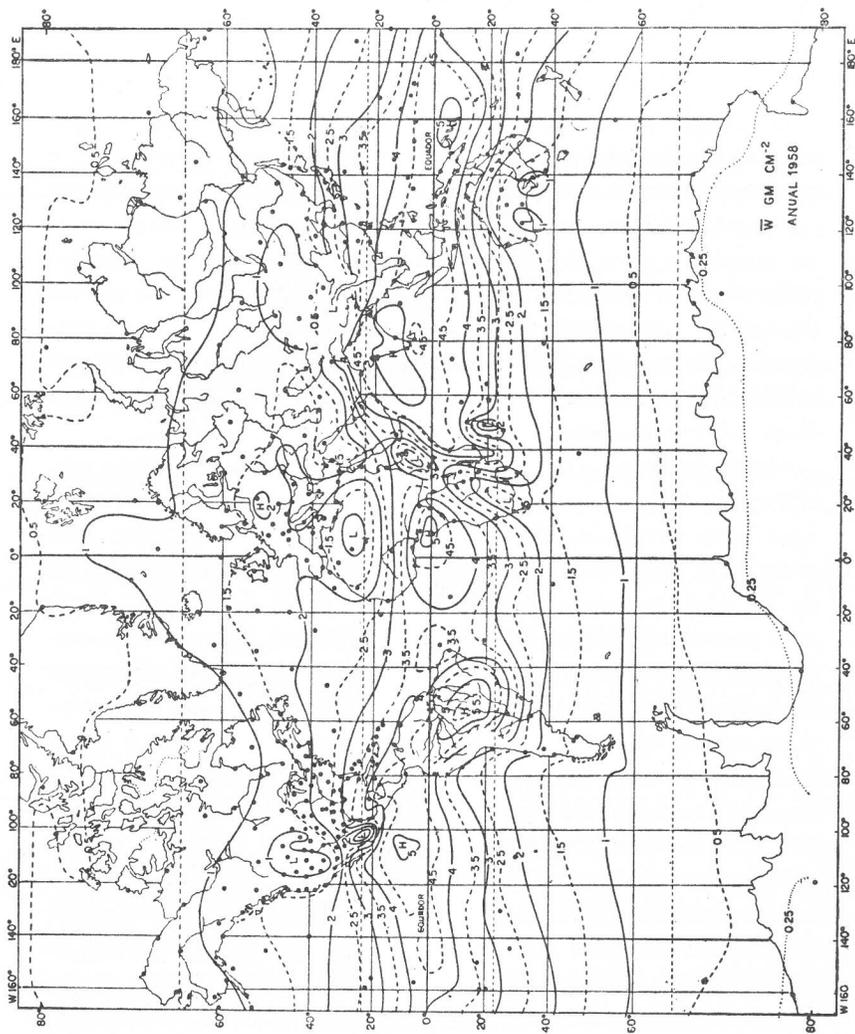


Fig. 3 — Distribuição do vapor de água na atmosfera, através dos valores da quantidade de vapor de água existente numa coluna unitária que se estende da superfície do Globo até ao topo da atmosfera. Esta chama-se água precipitável e representa a altura que atingiria a água que resultaria se todo o vapor de água se condensasse e se depositasse. Avalia-se em gramas por centímetro quadrado (g/cm^2) ou em milímetros (mm). As estações aerológicas que serviram de base ao estudo do ramo atmosférico do ciclo hidrológico estão assinaladas na carta. Os valores máximos encontram-se na região equatorial e diminuem gradualmente para as regiões polares.

Há alguns anos, usando os dados aerológicos de mais de 600 estações com duas sondagens por dia, calculou-se para o Globo a distribuição da água precipitável e o transporte do vapor de água de pólo a pólo para o Ano Geofísico Internacional (1958-59). Este projecto fazia parte do estudo da circulação geral da atmosfera e da sua energética.

Vamos apresentar os resultados deste estudo sob a forma de cartas, por ser mais sugestivo. Começaremos pela análise da água precipitável e depois passaremos ao estudo do fluxo do vapor de água.

Água Precipitável

As linhas foram traçadas (fig. 3) com intervalos de $0,5 \text{ g/cm}^2$. A análise da carta revela imediatamente as características essenciais da distribuição do vapor de água na atmosfera. O seu exame mostra que há um decréscimo contínuo de água precipitável do equador para os polos norte e sul, como era de esperar, porque os campos da humidade específica e da água precipitável são em grande parte revelados pela temperatura do ar. A carta põe em evidência a influência dos continentes e dos oceanos. Em geral, a quantidade de água precipitável é mais elevada sobre os oceanos. Exceptua-se a bacia do Amazonas, em que a água precipitável atinge o máximo absoluto. Os desvios da simetria zonal da distribuição estão relacionados com a fisiografia do Globo, sendo evidentes os efeitos em ambos os hemisférios.

Considerando o hemisfério norte, vê-se que as áreas desérticas do Sara, do Médio Oriente a sul do Mar Cáspio e do norte do Tibete são regiões secas, com uma quantidade de água precipitável muito baixa. Além disso, os efeitos da topografia são também evidentes, pelos valores muito baixos da quantidade de água precipitável (menos de $1,0 \text{ g/cm}^2$) verificados sobre as Montanhas Rochosas nos Estados

Unidos, no México, sobre as Montanhas de Himalaia, sobre os planaltos do Tibete na Ásia Central e sobre as terras altas da Abissínia.

As regiões de maior quantidade de água precipitável são as regiões equatoriais da América do Sul, o Oceano Pacífico o Oceano Índico (Baía de Bengala) e a África Equatorial Ocidental. As regiões mais áridas estão localizadas no Ártico, onde a água precipitável média é inferior a $0,5 \text{ g/cm}^2$, a norte de 80°N . A linha referente a $1,0 \text{ g/cm}^2$ está à latitude média de 60°N , atingindo no entanto nalguns casos latitudes mais a sul. A linha de $0,5 \text{ g/cm}^2$ engloba uma área a norte de 80°N e desce por vezes mais a sul, atingindo a região norte da Sibéria e da Gronelândia.

No hemisfério sul a distribuição é praticamente zonal, o que era de esperar devido á preponderância da extensão dos oceanos. Há algumas excepções, como as que se verificam sobre a África e sobre a América do Sul. Sobre a África há um mínimo sobre a porção central da parte sul do continente (deserto Kalahari). Os efeitos de topografia são evidentes sobre os Andes e as terras altas da Etiópia e do Quénia. Também a Austrália apresenta na região desértica valores muito baixos.

Em geral a água precipitável tem valores mais elevados no hemisfério sul do que no hemisfério norte, e o valor médio total de água precipitável para todo o Globo é da ordem de $2,6 \text{ g/cm}^2$, ou seja $1,3 \times 10^6$ toneladas.

A humidade específica decresce rapidamente com a latitude e com a altitude, sendo o gradiente vertical muito acentuado nas camadas inferiores da atmosfera. Cerca de 50 por cento do conteúdo total do vapor de água na atmosfera está contido entre a superfície e $1,6 \text{ km}$ (850 milibares), ou seja na camada inferior que representa apenas 15 por cento da massa total da atmosfera. Por outro lado, mais de 90 por cento do vapor de água existe na metade inferior da atmosfera (abaixo de 500 milibares $\langle \rangle 6 \text{ km}$).

O Fluxo de Vapor de Água na Atmosfera

Na figura 4 está representada a distribuição do transporte médio do vapor de água na atmosfera. Nela se usou a forma tradicional de representação de campos vectoriais; e a legenda da figura é suficientemente esclarecedora.

O exame da carta revela que a componente zonal do transporte é predominante e que a componente meridional tem valores relativamente menores, mas do ponto de vista hidrológico são igualmente importantes. De facto, as componentes do fluxo meridional são suficientemente elevadas para satisfazer às condições do balanço hídrico. A inspecção da carta mostra que na região intertropical o transporte do vapor de água é de leste, verificando-se uma forte convergência na região equatorial, o que explica o regime de precipitação intenso que ali se verifica ao longo da zona intertropical de convergência (ZIC), em que a precipitação dominante é do tipo convectivo. Nas regiões das latitudes médias e elevadas o transporte é geralmente de oeste. Nas regiões das latitudes tropicais de ambos os hemisférios verifica-se uma divergência muito acentuada do transporte. Vê-se ainda que o transporte tem uma intensidade mais elevada sobre os oceanos do que sobre os continentes.

O estudo do transporte do vapor de água aos vários níveis mostra que o seu fluxo é mais intenso na baixa atmosfera, com um máximo nas vizinhanças do nível de 1 km de altitude (900 milibares). Este transporte diminui depois rapidamente com a altitude, de forma que acima de 6 km (500 milibares) o fluxo é quase desprezável. A distribuição dos valores do fluxo meridional médio para as várias latitudes está representada pela curva da fig. 5, cuja inspecção é muito elucidativa. Os valores positivos mais elevados (transporte para norte) ocorrem nas vizinhanças das latitudes de 5°N e 40°S. Estes indicadores são interessantes por si próprios; mas, para os comparar com os resultados convencionais da climatologia, devemos efectuar uma segunda

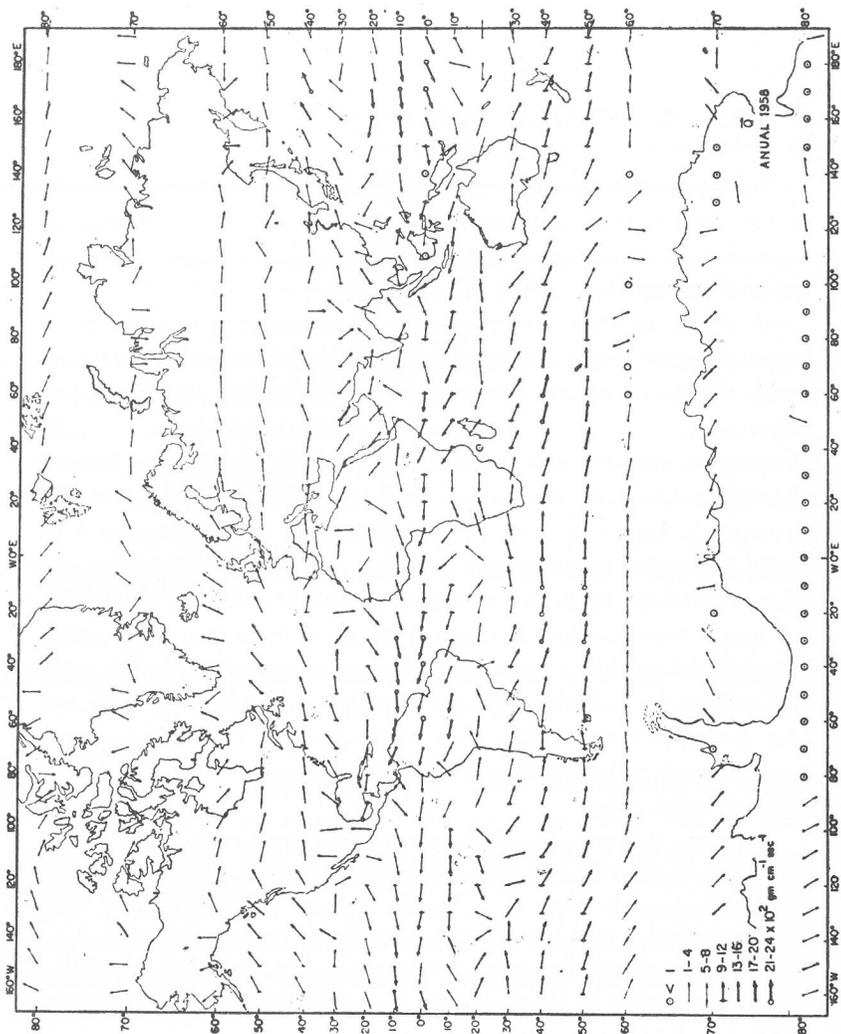


Fig. 4 — O transporte global do vapor de água pelas circulações da atmosfera pode ser calculado a partir das observações dos ventos, da humidade e da temperatura aos vários níveis da atmosfera, por meio de observações feitas com radiossondas. A circulação do vapor de água na atmosfera é representada por um campo de vectores. O fluxo do vapor de água na atmosfera ocorre principalmente nos primeiros 6 km da atmosfera; acima desta altitude a quantidade de vapor de água na atmosfera é desprezável. A configuração do campo de vectores mostra que há assimetria e irregularidades no transporte global da água na atmosfera e que há desigualdades importantes.

operação sobre o campo vectorial. Esta tem por fim avaliar o excesso de vapor de água que atravessa a fronteira da unidade de área da superfície da Terra. Em termos de matemática, esta operação é designada por convergência dum campo de vectores.

Quando há divergência de vapor de água numa dada região da atmosfera, aí existirá uma fonte de humidade. Isto significa que, no mesmo intervalo de tempo, se verifica em média um excesso de evaporação sobre a precipitação. Por outro lado, quando há predomínio de convergência há um sumidouro da humidade e a precipitação excede a evaporação. Por isso o valor numérico da divergência é equivalente à taxa de diferença entre a evaporação e a precipitação. A distribuição da convergência-divergência que corresponde ao campo dos vectores de transporte é representada na carta da fig. 5.

Se se determinarem os valores médios da divergência e da convergência ao longo das várias latitudes, obtém-se a distribuição como se mostra na fig. 6. A inspecção destas figuras mostra que em média há: (1) convergência da zona equatorial, em que se observa uma forte precipitação; (2) convergência nas latitudes médias e elevadas, onde o grande excesso da precipitação sobre a evaporação está associado às depressões migratórias, à frente polar e à alternância das massas de ar; (3) divergência de ambas as regiões subtropicais, em que a evaporação é muito intensa e está associada aos grandes anticlones semipermanentes. Estes resultados estão de acordo com os que se obtêm a partir da diferença dos valores médios da evaporação e da precipitação obtidos pelos métodos climatológicos tradicionais.

Portanto, as fontes primárias e mais importantes da humidade para toda a atmosfera encontram-se nas regiões subtropicais, principalmente sobre os oceanos em que a evaporação ocorre continuamente. A humidade fornecida à atmosfera é transportada pelas circulações atmosféricas das fontes para as regiões em que predomina a convergência, onde se condensa e cai como precipitação. Portanto, a teoria da formação da precipitação a partir da evaporação local não é de

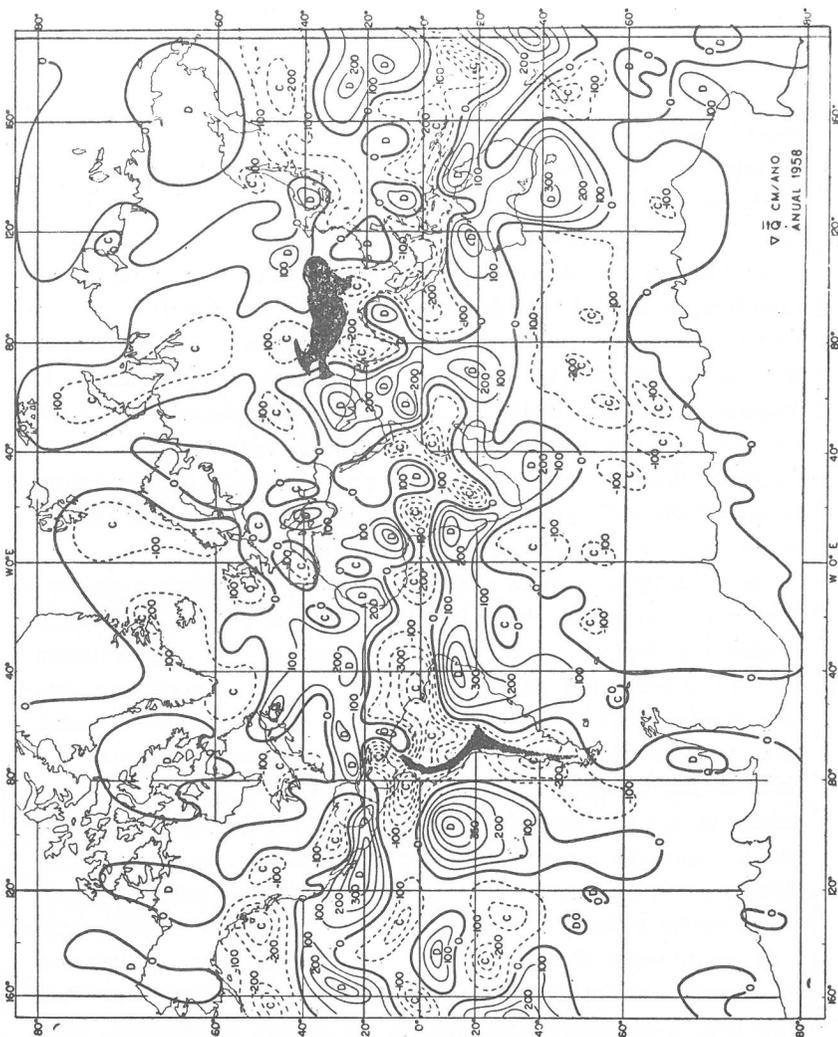


Fig. 5 — Através duma operação matemática sobre o campo de vectores da carta anterior, foi possível obter uma carta que permite comparar os dados aerológicos com resultados climatológicos tradicionais. A carta que assim se obtém mostra as regiões em que há divergência no campo de vectores (linhas a cheio) e que correspondem a fontes de humidade na atmosfera e portanto a zonas em que há um excesso de evaporação sobre a precipitação, enquanto que as regiões em que predomina a convergência (linhas a tracejado) correspondem a sumidouros de vapor de água e portanto a regiões em que a precipitação excede a evaporação. Os valores nas isolinhas indicam a quantidade de água na forma líquida, em centímetros por ano.

aceitar. A julgar pela presente análise, é provável que o percurso do ramo terrestre varie de local para local. Tomando como critério a distância média entre os centros de convergência e divergência, o

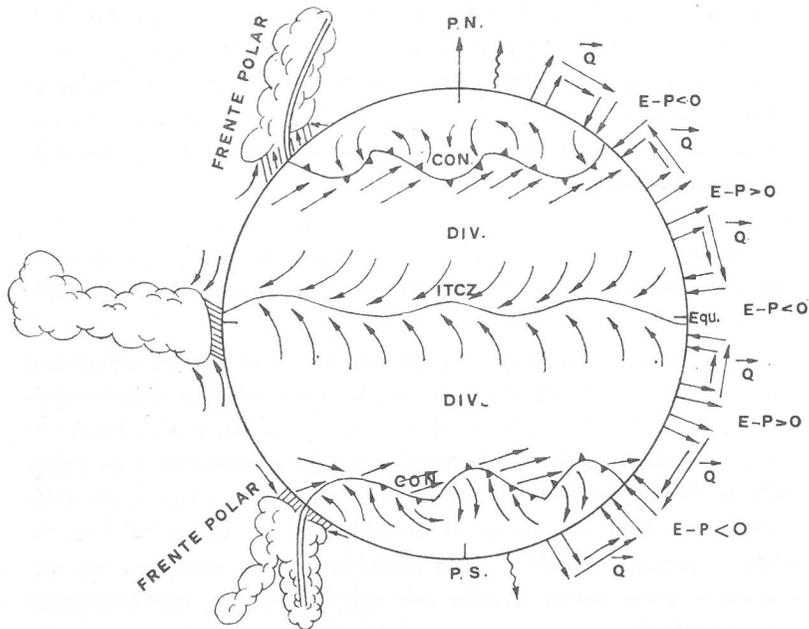


Fig. 6 — A circulação geral da atmosfera condiciona o ciclo hidrológico, através da sua acção sobre o ramo aéreo. As superfícies frontais das latitudes médias e a zona intertropical da convergência (Z.I.T.C.) são zonas em que predomina a precipitação. Estas estão separadas pelas zonas de divergência tropical, em que predominam os grandes anticiclones, onde a evaporação é muito acentuada. Na figura está representada, de forma esquemática, a distribuição dos ventos dominantes à superfície do Globo. Na parte direita estão representados os ramos aéreos do ciclo hidrológico que se podem considerar na atmosfera. Os ramos terrestres são constituídos pelas correntes marítimas e pelo escoamento dos grandes cursos de água. As regiões dos grandes anticiclones subtropicais constituem as fontes primárias mais importantes da humidade da atmosfera, principalmente nas regiões oceânicas, em que a evaporação é contínua.

percurso médio nas latitudes das regiões temperadas é da ordem de 1000 quilómetros.

As regiões em que predomina a convergência têm que possuir um dispositivo natural que permita dispor do excesso da água da precipitação. Nos continentes é constituído pela rede hidrográfica e, portanto, as regiões de convergência devem coincidir com as bacias de alimentação dos grandes rios. Esta conclusão é confirmada pela inspecção da carta de divergência-convergência, o que imprime validade ao método aerológico.

Estes aspectos parecem-nos essenciais para avaliarmos o que a análise da carta actual representa, constituindo até prova decisiva para se apreciar duma forma indirecta o conteúdo de informação da carta.

Os centros de convergência predominam nas regiões equatoriais sobre os oceanos Pacífico, Atlântico e Índico e sobre as regiões equatoriais da América do Sul, da África, da Indonésia, etc. A existência desta cintura de convergência está associado o predomínio da precipitação sobre a evaporação, que de facto caracteriza a região climática chuvosa da zona equatorial. A convergência de vapor de água na região equatorial é devida principalmente ao seu transporte intenso, efectuado pelos ventos alisados dos dois hemisférios, que constituem o ramo inferior das circulações meridionais de estrutura quase-celular e que dominam a circulação geral da atmosfera na região intertropical. Os centros de convergência muito intensos, que se observam na América do Sul, na região norte do Brasil, correspondem à grande bacia do Amazonas. Sobre a África equatorial e central, os centros de convergência cobrem as bacias dos grandes sistemas de rios (v.g. Nilo Branco, Nilo Azul, Ubangi, Congo, Níger, Volta, Senegal, etc.); na região central da parte sul de África, as zonas de convergência abrangem as bacias de drenagem dos grandes rios como o Zambeze, o Orange e o Limpopo; na região da Baía de Bengala, a zona de convergência estende-se para norte até às montanhas de Pamir e Altai,

e é nesta região que se encontram as bacias dos vários rios muito importantes como o Indo, o Ganges, o Mekong, o Yangtze, etc.

As regiões subtropicais em ambos os hemisférios são caracterizadas pela existência duma cintura de divergência, em que portanto a evaporação excede a precipitação. No hemisfério norte os centros mais intensos encontram-se sobre o golfo do México, o oceano Atlântico, o Norte de África, o Mar da Arábia e o Mar da China, e sobre o Oceano Pacífico até ao México. Outras regiões de divergência menos marcadas são as que se encontram sobre o Mediterrâneo, em toda a região que se estende pelas terras da Líbia, Argélia, Síria, Irão, Tibete, etc. No hemisfério sul encontram-se fortes centros de divergência no Oceano Atlântico, estendendo-se desde a região árida do Nordeste Brasileiro até ao deserto de Kalahari, Uganda, África do Sul, etc., por todo o Oceano Índico até à Austrália, sobre o Índico e sobre o Pacífico Sul.

As zonas subtropicais são dominadas pelas circulações associadas aos centros de acção constituídos pelos grandes anticiclones dos Açores e do Pacífico no hemisfério norte, e os anticiclones do Atlântico Sul, do Índico e do Pacífico no hemisfério sul. A forte subsidência associada à divergência, que caracteriza estas circulações, conduz a valores da humidade relativa muito baixos e a forte estabilidade da atmosfera assim originada, a uma nebulosidade muito fraca e confinada a uma camada pouco espessa da atmosfera, abaixo da camada de inversão da temperatura. Estes dois factos associados facilitam a evaporação tão intensa que ali se observa.

Nas regiões das latitudes médias há predominio de convergência, ainda que se observem alguns centros isolados de divergência, como mostra a análise da carta sobre os Estados Unidos, a sul da Terra Nova e sobre a Ásia Central (deserto de Gobi) alongando-se até ao norte da Coreia e ao Japão. No entanto são os centros de convergência que predominam. Os mais intensos encontram-se sobre os oceanos Pacífico e Atlântico; sobre os Estados Unidos (Montanhas Colúmbia,

Missouri, Colorado, Rio Grande, etc.); e sobre a Costa do Pacífico do Continente Americano (Ihas Carlota, Green, Colúmbia Britânica, etc.), região conhecida pela precipitação abundante e regular que nela se observa. Uma vasta zona de convergência estende-se ainda do Canadá à Gronelândia, e outra à Islândia, às Ilhas Britânicas e à Escandinávia. Outra grande área de convergência pode observar-se sobre a Rússia e a Ásia Central, onde existe um vasto complexo hidrográfico (rios Volga, Don, Dnieper, Dniester, Onega, Duna, Ob, Lena, Amur, etc.).

No hemisfério sul as áreas de convergência cobrem grande parte da América do Sul, as quais correspondem às bacias dos grandes rios daquele continente, tais como o Amazonas, o Madalena, o Orinoco, o Paraná, o Uruguai. Outros centros de convergência podem observar-se sobre os oceanos Atlântico, Índico e Pacífico (Nova Zelândia, Ilhas do Pacífico Sul, etc.).

As regiões polares apresentam uma divergência resultante não muito intensa. A existência de grandes áreas cobertas de gelo e de neve não permitem uma evaporação suficientemente forte, ainda que se possa inferir um «desgaste» ou uma diminuição lenta da quantidade de gelo acumulada ao longo de séculos.

É ainda importante referir que há uma coincidência notável, mesmo no pormenor, entre as zonas definidas pela análise do campo da divergência do vapor de água e as grandezas climáticas do Globo terrestre.

Analisando o campo da divergência que se observa sobre as regiões oceânicas, não é difícil de aceitar e de explicar porque há sempre um manancial de água disponível e se dá continuamente a evaporação. De facto, a distribuição do campo da divergência e da convergência, tal como se apresenta na carta, está em excelente acordo com a distribuição de salinidade dos oceanos. As regiões em que predomina a convergência têm uma salinidade muito baixa, devido principalmente à diluição provocada pela água que resulta do excesso de precipitação, enquanto que nas áreas em que a divergência é mais intensa a salini-

dade é muito elevada, como era de esperar devido ao predomínio da evaporação forte que ali se verifica (Pacífico Ocidental, Atlântico Norte, Costa do Brasil).

O centro de convergência sobre a Rússia Central constitui a fonte dos rios Volga, Don, Dnieper, Onega e Duna. Este centro está associado com as cadeias de montanhas que se estendem de Moscovo e Leninegrado até ao Mar de Azov; e estas linhas de altura, ainda que tenham altitudes entre 300 e 400 m, são suficientes para causar precipitação orográfica nas massas de ar provenientes do Báltico.

O centro de convergência intenso sobre a parte sul da Gronelândia explica o escoamento dos rios que no verão correm dos glaciares e o transporte de água representado pela exportação de icebergs deles oriundo. Deve mencionar-se aqui que a bacia inteira do Ártico tem uma convergência, quando muito, da ordem de 50 cm/ano.

Sobre o Mar Mediterrâneo predomina a divergência, e o valor médio espacial do excesso de evaporação sobre a precipitação é da ordem de 70 a 100 cm/ano. Esta perda de água tão intensa é compensada em parte pelo escoamento dos rios da Bacia Mediterrânea e em parte pelo afluxo de águas do Oceano Atlântico, como se observa no estreito de Gibraltar.

O centro de divergência situado no vale do Tigre-Eufrates estende-se para sul e leste através do Golfo de Oman, ao longo da costa do Baluquestão, e penetra profundamente nas regiões desérticas da Índia. Nesta região o céu apresenta-se limpo e as temperaturas dominantes são muito elevadas. A precipitação é muito fraca, com valores que vão em média de 10 a 30 cm/ano. A agricultura é praticamente impossível, excepto nos vales isolados em que uma precipitação mais regular torna possível culturas de zona árida.

Se por momentos confinarmos a nossa atenção à porção do Globo que vai do Mar Negro à linha Suez/Basra, vê-se que a divergência varia de um valor muito baixo, cerca de 50 cm/ano no Mar Negro, até um valor da ordem de 250 cm/ano no vale do Tigre-Eufrates.

O valor observado sobre o Mar Negro concorda com a estimativa de Newman e Rosenan (1954), obtida por via independente.

Segundo Karatekin (1953), algum do escoamento que aflui para o Tigre e o Eufrates é subterrâneo, o que explica que o caudal máximo se verifique muito a jusante da região em que se observa a maior quantidade de precipitação.

Os cursos superiores do Tigre e do Eufrates situam-se no vale central do Iraque, cerca de 100 km a norte do Golfo Pérsico. O leito do rio nesta região é muito pouco permeável e, devido ao fraco declive, está muito sujeito a inundações severas. O vale que se estende de Bagdad ao Golfo é polvilhado de lagos pouco profundos e de pântanos, que constituem evaporímetros naturais. Da combinação da impermeabilidade dos solos com a existência duma bacia de alimentação considerável resulta que o vale do Iraque é uma das fontes de vapor de água mais importantes do hemisfério norte.

A oeste do sistema do Tigre-Eufrates estende-se o deserto. A divergência média desta área é da ordem de 100 a 200 cm/ano.

A maior parte do escoamento das regiões montanhosas na Síria e na Jordânia é canalizado numa bacia interna para o Mar Morto, onde a água se evapora.

Sobre a Península da Arábia a divergência é da ordem de 100 cm/ano. No entanto há uma área de convergência sobre a região do Iemen, constituindo a «Arábia Félix» do mundo antigo. Aqui as montanhas têm altitudes que vão acima de 2000 m e, interceptando as massas de ar carregadas de humidade, originam a precipitação suficiente para formar centenas de oedes («wadis») que correm na grande maioria para o interior. Muito deste fluxo é subterrâneo, reaparecendo em fontes e oásis que, nalguns casos, como o oásis al-Aflaj e o al-Kharj, no sul do Nevege, atingem áreas consideráveis. Há mesmo alguns lagos como o Umm al-Jabal, com 5 km² nas regiões montanhosas do sul do Ryad.

O fluxo subterrâneo é por vezes considerável. Na cidade de Dilam existem depósitos de água à profundidade de mais de 100 m. A existência de nascentes de água doce e termal nas costas do Golfo Pérsico (al-Hasa) confirma a profundidade destas correntes subterrâneas.

O vale do Indus é em muitos aspectos semelhante ao vale do Tigre-Eufrates. Com céu geralmente limpo, as grandes massas de água transportadas sofrem perdas consideráveis, devido à evaporação.

A divergência na Índia estende-se sobre a região desértica (Deserto do Thar, etc.), em que a precipitação média observada é da ordem de 20 cm/ano. Como a divergência aqui é de cerca de 100 cm/ano o déficit deve ser compensado por um caudal subterrâneo proveniente do Indus ou das montanhas de Rajputana. Esta hipótese é confirmada por observações directas de Dhir (1953), que verificou que o nível freático na região de Godhpur está baixando com uma intensidade da ordem de 85 cm/ano.

O fluxo do vapor de água sobre o México é predominantemente de leste para oeste. Os ventos alisados, carregados de humidade, movem-se ao longo das montanhas da Serra Oriental e perdem essa humidade por expansão e conseqüente arrefecimento adiabático, sobre um solo cársico, com uma infiltração quase de 100 por cento. Alguma desta água vai desaguar novamente no Golfo, mas outra vai alimentar um grande número de lagos e de pântanos de água bastante salgada, na região centro-norte de Bolsón de Mapimi e no vale do Salado. A divergência do vapor de água e a grande evaporação do Golfo da Califórnia quase escondem os efeitos da convergência devida ao efeito da montanha no campo da divergência.

Os principais centros de divergência na África encontram-se nas regiões desérticas da África Austral e sobre o Sudão ao sul de Timbuktu, estendendo-se até à costa do Atlântico. Aqui encontra-se a região de lagos e pântanos, característica do Alto Níger, que recebe água abundantemente das montanhas da Guiné.

O Níger actual é, na opinião de alguns geólogos (Drouhin, 1954), o remanescente de dois sistemas hidrográficos distintos: um teria existido na região montanhosa da Guiné e desaguaria na bacia interna do Sara Oriental; o outro desenvolver-se-ia pelas regiões de Air e desaguaria no Atlântico. Com a subsidência gradual da bacia do sistema que corria em direcção ao sul e com a subida de nível do lado interior, principalmente devido à acumulação de sedimentos, deu-se a captura do lago pelo rio e o estabelecimento duma drenagem directa das montanhas da Guiné para o Atlântico. À medida que a água do lago se foi escoando, o rio proveniente das terras altas, que se digiria a sul foi diminuindo e degenerou no sistema actual de «wadis».

Ao longo da costa da Mauritânia, sob a influência da divergência que se verifica na carta, observa-se uma forte evaporação de água, que provavelmente cai nas montanhas da Guiné. O escoamento através do principal rio da região, que é o Senegal, não é suficientemente intenso para manter o nível freático durante o verão. E assim verificam-se intrusões de água salgada do mar até distâncias por vezes de 300 km, contaminando os solos.

A divergência que se observa em regiões da superfície da Terra onde a água é abundante (lagos, rios, glaciares, etc.) explica-se facilmente. Mas a carta do campo da divergência mostra que as regiões continentais onde a divergência é mais acentuada se encontram situadas sobre as terras áridas e sobre os desertos. Estes apresentam, de facto, uma evidência de processos de evaporação muito intensos. A ocorrência de evaporites formadas por resíduos de sais são muito comuns nos «chotts» do Sara da Argélia e da Tunísia. O verniz do deserto resulta duma forte evaporação seguida por um processo de oxidação muito intenso nos minerais, principalmente do ferro, que se acumulam na superfície de rochas muito expostas.

Os rios transportam, das regiões em que a precipitação é mais abundante, quantidades de água muito consideráveis. A existência

de vários ramais e «wadis» indica a importância do escoamento para as regiões centrais do deserto, provocado por correntes torrenciais ocasionais. No entanto, estas fontes não são suficientemente intensas e o excesso da evaporação sobre a precipitação tem que ser compensado por escoamentos subterrâneos provenientes de regiões menos áridas, que suprem o déficit em água. O estudo do escoamento subterrâneo nas regiões desérticas é extremamente difícil e complexo ainda que seja de grande importância económica.

A existência de um escoamento subterrâneo foi descrito por Hellstrom (1940), ao estudar o Sara nas vizinhanças do Nilo. Parece que, por evidência histórica e arqueológica, o oásis de Kharga no deserto da Líbia já teria tido um abastecimento natural de água muito mais abundante do que o que se observa actualmente. O declínio deve ter sido rápido e tem sido atribuído aos efeitos da erosão nas camadas estratificadas do leito do Nilo, que permitiram a fuga de água através dos estratos inferiores, muito mais porosos, que constituem um aquífero gigantesco e se supõe ocuparem a região do interior da parte leste do Sara. Houve ainda uma diminuição da pressão hidrostática das águas subterrâneas na região, com a inevitável redução do caudal das nascentes do oásis de Kharga.

Espera-se que a construção da barragem de Assuan, a montante da região em que se verifica a fuga subterrânea das águas do Nilo, não só evite a perda de água em escoamento de superfície, mas também conduza, com água armazenada, a pressão hidrostática a um valor próximo do que teria tido em tempos passados e portanto provoque um rejuvenescimento de muitos dos oásis vizinhos.

Os núcleos de convergência das terras altas da Etiópia e do Quênia coincidem com a bacia de alimentação do sistema do Nilo; e os valores do excesso de precipitação sobre a evaporação que se verificam (262 a 3000 cm/ano) conduziriam a valores de caudal do Nilo muito superiores aos que se observam no Delta em que desagua (32,2 biliões de m³/ano no braço de Demietta e 16 biliões no braço de Rosetta).

Sabe-se no entanto que em Uadi Halfa o caudal é muito superior e da ordem de 80 bilhões de m³/ano. Estes elementos vêm confirmar a existência dum Nilo subterrâneo com a extensão de 560 milhas, com origem aproximada a 80 milhas a sul de Luxor e com um declive muito pequeno, indo de 100 m de profundidade na origem até 300 m na região do Delta. Calcula-se que o tempo de percurso será da ordem de 100 anos.

Outro exemplo de um possível escoamento subterrâneo tem sido sugerido para explicar o comportamento da bacia do Chad. Sabe-se que o lago Chad recebe bastante água do sistema de rios Lagone-Chari. No entanto, a área do lago e a sua salinidade mantêm-se praticamente constantes. Sem uma alimentação subterrânea considerável, a salinidade resultante da evaporação intensa e contínua que se verifica e da acumulação dos sais transportados pelos rios teria que aumentar. Observações hidrológicas parecem indicar que há um escoamento para nor-nordeste, num aquífero que se estende sob a região do Lago. A existência duma corrente subterrânea passando sob vários oásis e que se supõe ligada ao rio Nilo, foi também corroborada pelo Dr. F. Ali (Nairobi, 1960).

Num estudo mais recente ainda, baseado em considerações geológicas, arqueológicas e hidrológicas, Ambroggi (1966) chegou à conclusão de que há várias bacias internas subterrâneas no Sara. Esta mesma conclusão obteve Malhorta (1969) num estudo do ciclo hidrológico do Continente Norte-Americano. De facto, há indicação da existência de grandes fontes de água subterrâneas nas regiões dos desertos dos Estados Unidos.

A comparação objectiva dos resultados obtidos pelo método aerológico na avaliação da diferença entre valores médios da evaporação E e da precipitação P , $\langle \overline{E - P} \rangle$, com os que se obtêm a partir dos dados climatológicos normais mostra uma concordância excelente, o que confirma a base física sólida em que assenta o método aerológico para fins hidrológicos.

CONTROLE DO CICLO DA ÁGUA

A fim de decidir em que medida é que o ciclo hidrológico deve ser controlado, torna-se necessário determinar em primeiro lugar quais são as necessidades humanas em água.

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 e com as taxas de produção e de consumo.

A necessidade em água por pessoa varia de 900 m³ por ano, numa sociedade rural, a 2700 m³ por ano, numa sociedade altamente industrializada como a dos Estados Unidos. Destes 2700 m³ um americano «médio» consome 0,5 m³ em alimentação, 200 m³ em usos domésticos, 230 m³ em refrigeração industrial e o resto em actividades agrícolas e industriais. Nas regiões tropicais, devido à forte evapotranspiração, só para a agricultura são necessários pelo menos 3 m³ por ano e por m².

Admitindo que o consumo médio é da ordem de 1500 m³ por ano e por pessoa, o consumo de água para toda a população do mundo seria de $4,5 \times 10^{12}$ m³ por ano. Para esta capitação e tomando em consideração o aumento da população do mundo, a procura de água aumentará cerca de 10^{11} m³ por ano (3200 m³ por segundo). Ora como a quantidade de água envolvida no ciclo hidrológico é limitada (cerca de 10^{14} m³ por ano em precipitação), tem que buscar-se uma solução para os problemas que advêm das necessidades de consumo, antes que seja demasiado tarde.

Para já impõe-se uma racionalização do uso da água, quer por policiclagem, quer por um aumento da quantidade de água que participa em cada ciclo, tentando aumentar a sua velocidade e melhorar a sua eficiência e evitar perdas desnecessárias.

O que entendemos por necessidades em água? As moléculas de água no ciclo hidrológico, tal como os electrões num circuito eléctrico (Fig. 7), realizam trabalho ao atravessar um sistema. Por exemplo,

a água que se bebe não é destruída: passa através do organismo, realizando trabalho no processo, e volta a juntar-se ao ciclo hidrológico. Assim o organismo humano actua como uma carga ou resistência do circuito, enquanto que a água actua como uma corrente de electrões.

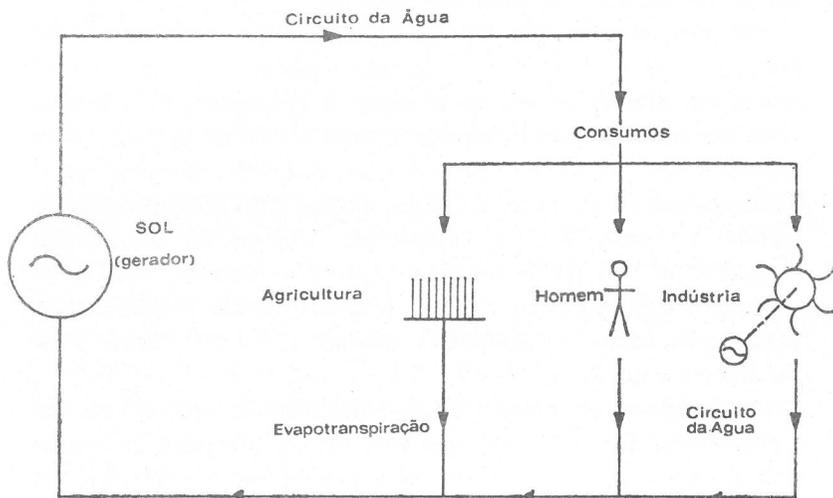


Fig. 7 — Pode estabelecer-se uma analogia entre o ciclo hidrológico e um circuito eléctrico. A força motriz será correspondente à acção do Sol e a carga do circuito representada pelos diferentes usos da água pelo homem, na agricultura e na indústria. Os condutores correspondem à atmosfera, aos continentes e aos oceanos, enquanto que o fluxo electrónico (intensidade da corrente eléctrica) é representado pelo fluxo das moléculas de água que constitui o transporte da água.

De uma forma análoga, a água utilizada na rega realiza trabalho ao passar através das plantas, antes de se juntar ao ciclo hidrológico através da evapotranspiração. Fundamentalmente, o Sol é equivalente a um gerador no circuito eléctrico.

Prosseguindo com a analogia do circuito eléctrico, se se pretende aumentar o trabalho realizado pela água, deparam-se-nos três possibilidades: (1) aumentar a quantidade de água em cada ciclo, melhorando a eficiência do ciclo na carga ou no gerador; (2) aumentar o número de ciclos; (3) acelerar o ciclo, aumentando as velocidades tanto da evaporação como da precipitação.

Põem-se, no entanto, alguns problemas à nossa consideração, ao discutir o controle do ciclo da água. Em primeiro lugar a água, como um agente de transporte, só pode realizar trabalho quando está no estado puro ou quase puro. Depois, como o homem vive sobre os continentes, a água que usa é a água terrestre, e a precipitação caída nos oceanos resulta em pura perda para os fins humanos. Finalmente, a água é utilizada principalmente na fase líquida. Nestas condições podem estabelecer-se três princípios para o controle do ciclo da água: (1) deve minimizar-se tanto quanto possível a evaporação de água doce das superfícies dos continentes e dos aquíferos subterrâneos; (2) deve acelerar-se ao máximo a evaporação das águas dos oceanos, visto estas não serem utilizáveis directamente; (3) e não se deve permitir que a água prossiga no ciclo escoando-se nos oceanos ou evaporando-se antes de ter realizado o máximo trabalho possível. A dessalinização da água do mar por meios não naturais constitui um processo de obter água doce fora do ciclo natural, através do uso concentrado de várias formas de energia (nuclear, fóssil, eólica, solar, etc.).

CONTROLE DO RAMO ATMOSFÉRICO

Um dos processos de atacar o problema da carência de água nas regiões áridas e semi-áridas do Globo seria o de acelerar o ciclo hidrológico no ramo aéreo, por provocação artificial da precipitação. De facto, a atmosfera constitui um recurso para a obtenção da água por processos artificiais. Tem havido várias tentativas neste sentido,

através da inseminação de nuvens com partículas de neve carbónica, iodeto de prata e outras substâncias. Estas partículas actuam como núcleos de condensação, capturando as moléculas da água e formando gotículas. Estas, por colisões sucessivas, por coalescência e por destilação, vão crescendo até atingirem as dimensões críticas de queda, originando a precipitação. No entanto, os núcleos só actuam quando a atmosfera se encontra suficientemente arrefecida.

Devemos acentuar que se escolhem as nuvens, não pelo seu conteúdo em água líquida ou sólida, mas por se encontrarem nos locais que reúnem as condições dinâmicas para se dar a condensação. Com efeito, o conteúdo em água líquida ou em cristais de gelo numa nuvem é tão pequeno que não tem valor significativo para a precipitação; todavia as nuvens funcionam como «fábricas» de precipitação possível, em que a matéria prima é o vapor de água.

Se em princípio o raciocínio parece bem fundamentado, o certo é que, apesar de alguns bons resultados obtidos em certas condições, a técnica da inseminação não deve ser usada por enquanto, porque a precipitação provocada não se justifica em termos económicos nem constitui um problema totalmente resolvido do ponto de vista físico. Tem de aceitar-se que o sucesso dos métodos da formação e do controle da precipitação provocada dependerá da aquisição dum conhecimento muito mais profundo da física das nuvens, designadamente no que se refere aos mecanismos da nucleação e aos conhecimentos dos processos naturais que levam à formação da chuva e da neve. Sem isso será praticamente «estar a disparar no escuro». Eis porque, nas condições presentes, se devem tomar sob reserva as promessas dos «fazedores de chuva» e se deve encarar de forma muito cautelosa qualquer projecto para a obtenção de precipitação por processos artificiais. É no entanto indispensável que a investigação neste domínio prossiga sem desfalecimento.

Outra forma de extracção da humidade da atmosfera é a formação de orvalho. Desde os tempos da Idade Média que se usa o

orvalho como recurso hídrico (nos famosos «poços aéreos»), mas só recentemente se está a encarar a utilização deste processo em larga escala. Em Gibraltar o depósito de orvalho constitui por vezes uma fonte de água para alguns usos humanos. A captura de água através da intersecção das gotículas do nevoeiro tem também sido utilizada com algum sucesso.

Uma linha de ataque completamente diferente do problema do controle do ramo atmosférico do ciclo da água foi proposto pelo Prof. Victor Starr, do M.I.T., através da duplicação em regime forçado do mecanismo da convecção do ar húmido. Este regime forçado seria realizado em dispositivo constituído por um tubo de 3 km de altitude e 100 metros de diâmetro, no qual se dava a convecção depois de inicialmente se fazer o arranque do movimento vertical. O processo actuaria, uma vez iniciado, por si mesmo, visto que seria auto-suficiente do ponto de vista da energia necessária para a convecção. Passa então a utilizar-se a energia latente libertada com a condensação resultante da expansão adiabática. Admitindo uma velocidade de 20 m/s e que se condensa 1 g de água por cada quilograma de ar húmido, poderia obter-se água suficiente para irrigar vários quilómetros quadrados com valores da ordem de 30 cm por ano. Este dispositivo constituiria um «acelerador aerológico».

Existem protótipos destes aceleradores, que são as chaminés de ventilação das minas de ouro de grande profundidade da África do Sul. Uma só chaminé pode produzir 33 000 metros cúbicos de água por ano. A água assim obtida está já a ser utilizada na agricultura.

CONTROLE DO RAMO TERRESTRE

As regiões áridas do Globo ocupam uma fracção muito apreciável dos continentes. Muitas destas regiões estão localizadas em zonas litorais e próximas dos oceanos, onde a água é abundante. Poderia

pois ter-se tentado a procura de uma solução para o problema da água com projectos de dessalinização. Acontece porém que actualmente a obtenção de água doce por dessalinização da água dos mares é pouco eficiente e portanto pouco rentável do ponto de vista económico. Além disso, os volumes disponíveis são por enquanto muito pequenos. Por exemplo, a maior estação de dessalinização de água do mar, em Key West (Florida), produz quantidades da ordem de $3,6 \times 10^9$ m³ por ano, o suficiente para satisfazer às necessidades de uma população de 3 600 habitantes. Na Rússia espera-se instalar uma estação cuja produção será de 55×10^9 m³ por ano, ou seja o suficiente para prover as necessidades de uma população de 55 000 indivíduos.

Mas o que representam estes números, dadas as perdas enormes de água utilizável por descarga dos rios nos oceanos? Por exemplo a descarga do Amazonas ($6,8 \times 10^{12}$ m³/ano) é mais do que o suficiente para satisfazer as necessidades de toda a população do mundo. O Zaire lança no mar água suficiente ($1,35 \times 10^{12}$ m³ por ano) para satisfazer 4 vezes a população de toda a África. O Mississipi, por si só, descarrega no oceano a água que supriria as necessidades de consumo dos Estados Unidos (560 biliões de metros cúbicos por ano). Até mesmo no Médio Oriente o Tigre e o Eufrates descarregam no Golfo Pérsico água que seria suficiente para as necessidades da actual população do Irão. Vejamos o caso do Nilo e o papel que este rio tem desempenhado: a civilização egípcia foi uma dádiva do Nilo. O Egipto tem uma população de 34 milhões de habitantes, dos quais dois terços vivem numa área de 25 000 quilómetros quadrados do Delta do Nilo; o terço restante ocupa uma área de 14 000 quilómetros quadrados ao longo dos bancos do Nilo; assim, num país com cerca de um milhão de quilómetros quadrados a população está concentrada numa área de 39 000 quilómetros quadrados. O caudal do Nilo, em Assuão, é da ordem de 92×10^9 m³ por ano, o que, para as taxas

de consumo normais, seria suficiente para manter uma população de 100 milhões de habitantes, se o caudal fosse suficientemente aproveitado. As águas do Nilo provêm da Etiópia (84%) e das terras altas da África (16%). Note-se que a construção da barragem do Assuão reduziu muito a perda em água para o Mediterrâneo e permitiu a recuperação de muito solo e a produção elevada de energia. Contudo, o lago artificial criado a montante introduz algumas perdas por evaporação. Admitindo que esta é de 3 m por ano, a quantidade de água perdida é da ordem de $24 \times 10^9 \text{ m}^3$ (a superfície do lago é de 1800 km^2), ou seja 25 % do caudal em Assuão. É claro que seria extremamente desejável que, principalmente nas regiões tropicais áridas, se pudessem evitar reservatórios com superfícies livres tão extensas, a fim de reduzir as perdas por evaporação. Têm sido feitas algumas tentativas nesse sentido, espalhando à superfície substâncias químicas como o hexadecanol que, formando uma camada monomolecular, impedem a evaporação. Mas por enquanto os processos utilizados não se apresentam com viabilidade económica.

A depressão de Qattara, 60 km a sul do Mediterrâneo, tem desde há longos anos fascinado cientistas, engenheiros e grandes projectistas. A depressão ocupa uma área de 20 000 quilómetros quadrados e o seu ponto mais profundo está 134 metros abaixo do nível do mar. Têm sido propostos vários projectos para inundar a depressão com água do Mar Mediterrâneo, a fim de produzir energia e de aumentar a precipitação no Egipto, usando água que se evaporaria. Esta última hipótese deve ser posta de parte, visto que a teoria da evaporação-precipitação *quasi in situ* não se verifica de facto. Parece que o projecto mais realista seria o de proceder à irrigação da depressão através duma derivação do Nilo que, com cerca de 1/9 do caudal, permitiria a instalação de uma população de cerca de 10 milhões de habitantes.

CONTROLE DOS OCEANOS

Têm-se feito algumas tentativas de controlar o ciclo hidrológico sobre os oceanos. Basta citar a dessalinização da água do mar, principalmente por destilação, aproveitando a radiação solar, como fonte de energia. Os oceanos constituem a maior fonte de vapor de água para a atmosfera, não só por nunca haver carência de água, mas também por armazenarem a energia solar incidente muito mais eficientemente do que quaisquer outros materiais da crosta terrestre. Por isso o processo natural da evaporação decorre de forma contínua no decurso de todo o ano. A quantidade de água transferida dos oceanos para a atmosfera é elevadíssima, cerca de 16 milhões de toneladas por segundo.

Acontece, porém, que a atmosfera tem uma capacidade limitada de retenção do vapor de água, por ser condicionada pela temperatura do ar e pelo seu conteúdo de humidade. Mesmo assim junto aos oceanos, a atmosfera raramente fica saturada, porque parte das moléculas de água evaporadas, se difundem e se dispersam e outras são arrastadas pelas circulações dos ventos dominantes.

Muitas outras formas de controle possível têm sido propostas. Entre estas, destacam-se as que envolvem grandes projectos de verdadeira «cirurgia planetária», como a separação do Oceano Ártico e do Oceano Pacífico através da construção de um complexo de barragens ao longo do estreito de Behring, como fechar o Mar Mediterrâneo, etc..

Vamos considerar este último caso em pormenor, e analisar a natureza de alguns dos problemas que podem surgir.

O Mar Mediterrâneo é constituído por uma massa de água, rodeada por terra quase completamente, e comunicando com o Oceano Atlântico através do estreito de Gibraltar, e com o Mar Negro através dos Dardanelos, do Mar da Marmora e do Bósforo. No Mediterrâneo a evaporação é muito superior à precipitação. A perda de água

é tão grande que, apesar do fluxo proveniente do Rio Nilo e doutros cursos de água, que ali desaguam, se verifica um fluxo de água do Atlântico, através do Estreito de Gibraltar, para manter o nível médio de água do Mediterrâneo. Mas, surge a complicação da água importada ser salgada, enquanto que a água evaporada é praticamente pura. Estará então a aumentar o teor em sal do Mediterrâneo? Se assim fosse, poderíamos concluir, até certo ponto precipitadamente, que o «mar do vinho-negro» de Homero era menos salgado do que o Mediterrâneo contemporâneo. Mas, muito provavelmente, a verdade é outra. Os oceanógrafos dizem-nos que o fluxo de água através do Estreito de Gibraltar não é assim um fenómeno tão simples. Embora o transporte resultante seja de leste, existe abaixo desta corrente proveniente do Atlântico uma contra-corrente de água, muito mais salgada, do Mediterrâneo para o Atlântico, que quase elimina o excesso de salinidade. No entanto, a concentração em sal no Mediterrâneo é um pouco mais elevada do que no Atlântico.

O Estreito de Gibraltar na região mais estreita tem uma largura de cerca de 10 milhas. Com a tecnologia moderna seria viável a construção dum dique, para fechar esta abertura, projecto que já tem sido várias vezes proposto. Analizemos então quais as consequências deste projecto. É evidente que tudo aquilo que vamos fazer é dar apenas uma resposta racional com base nos conhecimentos que dispomos. A veracidade do nosso raciocínio só se poderia verificar em face da realização respectiva do projecto. Mesmo assim, a resposta será como veremos incompleta. Para começar, suponhamos que o Mar Mediterrâneo, agora completamente cercado de terra, perde 50 cm de água por ano. Os limites da costa avançariam para além das presentes posições reduzindo-se a área da superfície das águas, com um aumento de salinidade. Mas a diminuição da área líquida livre e o aumento de salinidade levavam para já um decréscimo da evaporação. E quais seriam as implicações resultantes para o clima naquelas regiões?

Estas só dificilmente se poderão avaliar. Ao fim dum certo número de anos, digamos da ordem de alguns milhares, estabelecer-se-ia um estado de equilíbrio entre a evaporação, o escoamento e a precipitação, com um mar de muito menores dimensões. Supunhamos que quando se atinge esse estado de equilíbrio o nível médio das águas estaria cerca de 1 km abaixo do nível actual. Vejamos agora as implicações deste projecto em escala global. Como vimos, a atmosfera contém cerca de 10^{13} toneladas de água, principalmente na fase vapor. O Mar Mediterrâneo, nas condições indicadas, teria perdido cerca de 400 vezes aquela quantidade de água. Por outro lado, a atmosfera cuja capacidade de retenção para o vapor de água depende da sua temperatura, não pode armazenar aquela quantidade de vapor de água tão elevada. Logo, a maior parte do vapor de água teria que se condensar e precipitar, donde resultaria, um aumento de cerca de 7 metros do nível dos principais oceanos. É difícil avaliar as alterações e os ajustamentos geológicos, isostáticos e geodésicos, resultantes da nova distribuição do peso da água transferida do Mediterrâneo. Não há dúvida, no entanto, que as regiões do litoral dos grandes oceanos seriam inundadas.

Se não se verificassem alterações apreciáveis do actual leito do Mediterrâneo, este ficaria dividido em dois grandes lagos interiores, com um extenso istmo ligando a Itália à Sicília e à Tunísia, como sucedeu durante a era quaternária. A superfície da água ficaria reduzida em cerca de 45 por cento. A Córsega e a Sardenha formariam uma península que partiria da Toscana, perto do Elba, o qual seria também absorvido. A parte Norte do Mar Adriático desapareceria completamente, e ficava reduzido apenas a um lago.

Relativamente à modificação do clima, pouco se pode dizer. Possivelmente, o Deserto do Sara tornar-se-ia mais extenso e mais árido ainda, ficando ligado à Europa Meridional. Há razões para supor que a maior continentalidade devida à diminuição da área do Mediterrâneo,

provocaria um aumento da temperatura do ar, e poderia alterar o regime climático de toda a Europa Meridional e Central.

Não é possível avaliar os reajustamentos isostáticos nem a forma da superfície do novo geóide. Parece no entanto que as transformações resultantes desta experiência conceptual seriam altamente irreversíveis. Seria difícil restabelecer o *status quo ante*. Surgia digamos, a possibilidade de alterações das rochas, da composição da crosta terrestre, designadamente em toda a região litoral do Mar Mediterrâneo na parte meridional da Península Ibérica, de Marrocos e de todas as regiões ribeirinhas. Quais seriam as consequências do insucesso do projecto, se houvesse alguma falha accidental, como por exemplo, a inundação, não prevista, do Istmo do Suez pelo Mar Vermelho? Esta região é plana e existem canais artificiais desde os tempos dos faraós. Outra possibilidade perigosa seria o alargamento do Bósforo, com todas as consequências resultantes.

Pelo que fica dito, é evidente que o projecto descrito não pode ser recomendado para um futuro próximo, mesmo que fosse possível vencer as implicações políticas e outras. No entanto, serve para indicar a ordem de problemas que podem surgir, ao tentar controlar o ciclo hidrológico em projectos de grande escala.

Pode dizer-se que o maior manancial de água doce é constituído pela calote de gelos da Antártica. Pois, últimamente tem vindo a considerar-se a hipótese de transportar grandes blocos de gelo da Antártida para as regiões áridas da América, da África, da Austrália e mesmo da Ásia. Seria possível, por exemplo, rebocar um comboio de dez «icebergs» com um total de 10 biliões de metros cúbicos de gelo para a Califórnia do Sul; as perdas por fusão e evaporação seriam da ordem de 10 por cento e o tempo de percurso cerca de 10 meses. Em princípio os «icebergs» ficariam atracados, em depósito nos locais de destino, esquadrejados de acordo com as necessidades humanas.

CONTROLE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A precipitação constitui, para grandes intervalos de tempo, a única fonte real de água na Terra. No entanto, devem considerar-se os reservatórios, mais ou menos temporários e variáveis, de água armazenada à superfície do Globo ou a várias profundidades. Estas últimas são designadas genericamente por águas subterrâneas, que constituem uma das fontes mais importantes de recursos hídricos. Nas camadas inferiores da crosta terrestre há zonas em que interstícios, fissuras e regiões porosas estão saturadas de água, constituindo as águas subterrâneas ou freáticas. A camada superior — manto freático — pode surgir à superfície, como acontece por vezes com alguns lagos, fontes, etc., ou estar a algumas centenas de metros de profundidade.

As águas subterrâneas movem-se muito lentamente, como se constituíssem um grande rio com curso heterogêneo, com a presença de muitos materiais estranhos, cujo tempo de percurso, 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 toda uma zona não saturada de água em quantidade considerável, sob várias formas e que genericamente se designa 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 por capilaridade, etc..

Devido à acção da gravidade as águas vadasas vão-se escoando por percolação para níveis inferiores, até atingirem um manto freático e serem incorporadas nas águas subterrâneas.

As águas vadasas não podem ser consideradas um recurso hídrico directo, ainda que sejam essenciais para a realimentação e o restabelecimento das águas subterrâneas.

A quantidade de água subterrânea é muito elevada: 3 000 vezes a da que num dado instante circula em todos os rios. Mas a sua utilização é difícil. Por vezes, em regiões da crosta terrestre pouco porosas ou pouco permeáveis, o restabelecimento de poços é tão lento que não é possível sequer a utilização das reservas subterrâneas por este processo. A possibilidade da sua utilização exige um aquífero conveniente, que simultaneamente constitua um «transportador» adequado de água. A realimentação dos aquíferos é difícil e lenta, porque a maior parte da água precipitada — a fonte de água primária e mais importante — se evapora ou se escoia para os oceanos pelos rios. Calcula-se que é de 150 anos o tempo necessário para a realimentação de um aquífero médio, a 600/800 m de profundidade, se a água for removida completamente. Ao usar a água de um manancial por bombagem ou por outro qualquer processo, com uma velocidade de consumo superior à da realimentação, está-se de facto a transformar a exploração da água subterrânea numa «exploração mineira», com todos os inconvenientes inerentes. Em regiões acidentadas, com um declive acentuado, a quantidade da água precipitada que se infiltra é da ordem de 20 por cento, mas por vezes aumenta até 80 por cento em terrenos planos. Esta água vai abastecer aquíferos e compensar as perdas devidas à evapotranspiração e ainda alimentar as fontes naturais.

Em várias regiões áridas, como o Irão, a Península da Arábia e o Sara, têm-se vindo a descobrir verdadeiros mares subterrâneos. Os antigos já tinham mesmo conhecimento destes aquíferos. No Irão, por exemplo, há aproximadamente 3000 anos, estabeleceu-se um sistema de «qanat» (canais em árabe) para captar a água subterrânea.

Este sistema foi depois estendido a todo o Médio Oriente e ao Norte de África, durante os Califados Islâmicos («qattarahs»). O sistema de «qanat» é constituído por uma rede de canais subterrâneos, transportando água, por gravidade, de aquíferos a níveis mais elevados

para regiões a níveis mais baixos. Este sistema fornece ainda hoje cerca de 75 por cento da água consumida no Irão.

A água subterrânea na Arábia e no Norte de África foi descoberta em resultado da exploração de petróleo, e actualmente na Arábia Saudita estão a desenvolver-se grandes esforços para explorar sete grandes aquíferos (estratos cenozóicos e mesozóicos) que por sua vez se estendem a profundidades de 1000 metros.

As potencialidades em águas subterrâneas do deserto do Sara parecem ser muito vastas (ver «O campo da divergência do vapor de água», 1959, por Peixoto, e «Water under the Sahara», em *Scientific American*, pág. 21, Maio 1966, por Ambroggi). O Sara, com uma área total de 8 milhões de quilómetros quadrados, é o maior deserto do mundo. No entanto, no seu subsolo há uma quantidade enorme de água. Há sete bacias de armazenamento subterrâneo, que cobrem uma área total de 4,5 milhões de km² e têm uma capacidade de armazenamento de água da ordem de $15,3 \times 10^{12}$ m³. As maiores bacias são as que correspondem ao Grande Erg Ocidental; ao Grande Erg Oriental; a de Fannezrouft, na Argélia; a bacia do Níger, no Mali; a de Fezzan, na Líbia; a bacia do Chade; e finalmente a do Deserto Ocidental Egípcio, que se estende aos vários países da África (julga-se ter uma capacidade da ordem 6×10^{12} m³). Por exemplo na região do Grande Erg Oriental da Argélia, onde se desenvolve a indústria da exploração do petróleo, julga-se que a maior parte da água existente é de natureza fóssil. Ela deveria ter-se infiltrado há cerca de 8000 anos, depois da última glaciação quando o Sara teria tido um clima tropical com precipitação muito abundante. O aquífero é realimentado pela precipitação caída das montanhas de Tell no Norte; e a realimentação deve ser da ordem de $0,9 \times 10^9$ m³/ano. Como as disponibilidades do aquífero não têm variado de forma apreciável, aceita-se que há perdas e que estas são devidas à evaporação que ocorre principalmente na grande depressão do «Chott» Melrihr. Este «Chott», cujo ponto mais profundo está 31 m abaixo

do nível médio do mar, estende-se pela Tunísia, está separado do Mediterrâneo por uma faixa de terreno arenoso com 20 km de largura e é árido excepto na estação chuvosa. O «Chott» Melrihr, propriamente dito, com uma área de 10 000 km² está todo abaixo do nível médio do mar. Se este «Chott» fosse inundado com água do Mediterrâneo, poderiam evitar-se as grandes perdas verificadas no Grande Erg Oriental devido à evaporação. Poderiam aproveitar-se assim $0,9 \times 10^9$ m³ para usos humanos. Supondo que a água era explorada durante 500 anos, poderiam utilizar-se na irrigação cerca de $4,5 \times 10^9$ m³/ano, o que seria suficiente para suportar uma população da ordem de 5 milhões de habitantes, em vez dos 200 000 actuais.

Este é apenas um exemplo das possibilidades que se podem aproveitar em muitas regiões áridas, se as águas subterrâneas forem exploradas de forma eficiente.

ALGUNS COMENTÁRIOS FINAIS

1. Na fase inicial, a falta duma perspectiva global adequada sobre a hidrologia como ciência, muitas vezes tornada como uma disciplina subsidiária quase tecnológica, conduziu a ideias superficiais, pouco precisas e sem fundamento científico. A empirologia das regras de carácter quase sempre casuístico sobrepôs-se à elaboração das leis fundamentais e de carácter mais geral, podendo dizer-se que o apoio quantitativo tradicional não ultrapassava a utilização, nem sempre de forma correcta, da conhecida equação clássica da Hidrologia. Esta, por ser uma equação de condição, tem apenas uma função de «aceitar o balanço» das parcelas que se supõe constituírem as contribuições dos vários elementos hidrológicos. E é pouco!

Não constitui uma equação de evolução, contendo a dinâmica do ciclo hidrológico. E é neste sentido que se tem vindo a evoluir nos

últimos tempos, ao considerar o ciclo hidrológico *in toto* e os factores que o condicionam.

Toma-se como ponto de partida a precipitação, que se reconhece ser a fonte real mais importante dos recursos hídricos possíveis e utilizáveis, sem se notar que ela é apenas o elo de ligação entre as fases aérea e terrestre do ciclo hidrológico. Parece portanto indispensável penetrar nos mecanismos naturais que conduzem à sua formação e nos processos que implicam o seu comportamento e a sua dinâmica. E estes inserem-se no problema geral da energética e da circulação planetária do sistema físico oceano-atmosfera.

2. Talvez por falta de observações adequadas e de determinações quantitativas da água precipitável da atmosfera e do fluxo do vapor de água, não se tomou na devida conta a existência duma hidrosfera atmosférica nem dum sistema motor — a circulação geral — que condiciona e modela todo o ciclo hidrológico.

Ao ignorar o papel da atmosfera como manancial de água, agente de transporte e fábrica de precipitação, os hidrologistas eram levados a uma concepção parcial do ciclo da água. Assim, admitiam que a maior parte da precipitação caída sobre os continentes provinha directamente da humidade resultante da evapotranspiração *in situ*. Minimizava-se, portanto, o fluxo do componente água na atmosfera e, essencialmente, restringia-se esse fluxo à compensação do escoamento da água dos continentes, como resulta da análise da equação clássica da hidrologia.

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

Apesar de ter chegado a estar firmemente estabelecida (Horton, 1943) em muitos domínios da literatura científica, a teoria da evaporação-precipitação quase *in situ*, deve ser abandonada.

A sua aceitação leva a concluir que, para aumentar a precipitação *in situ*, bastava aumentar a evaporação e a evapotranspiração em

detrimento do escoamento total, por meio de barragens, lagos artificiais, irrigação, plantação de florestas, etc.. Infelizmente, tal não é de esperar, visto que o fluxo do vapor de água não tem que ser compensado exactamente pelo escoamento e reciprocamente. Humphrey (1937), por exemplo, concluiu que a principal fonte de água caída sobre os continentes era proveniente da evaporação da água dos 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 assim desta interacção uma reacção em cadeia, que se manteria até que o escoamento não compensado pelo fluxo do vapor de água extinguisse essa cadeia.

3. As teorias da evaporação-precipitação quase *in situ* baseavam-se fundamentalmente nas seguintes hipóteses: a) a mobilidade da atmosfera era pequena; b) o fluxo do vapor de água corresponderia a um regime quase estacionário, condicionando apenas o escoamento total.

Quanto à primeira hipótese, resultados recentes mostram claramente que há 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 do vapor de água que se movem dos oceanos para os continentes e reciprocamente são enormes, e que a quantidade de água da evapotranspiração utilizada localmente na precipitação parece ser pequena. Quanto à segunda hipótese tanto na escala hemisférica como na continental ou regional os mapas do fluxo total do vapor de água referentes ao verão, por exemplo, têm valores mais elevados do que os do inverno, ao contrário do que sucede com o escoamento.

4. Cabe ainda fazer um comentário que se relaciona com o mecanismo da precipitação no aspecto sinóptico. Como se sabe, a precipitação é condicionada por factores termodinâmicos e dinâmicos. Entre estes, o mais importante é o campo da velocidade vertical do ar asso-

ciado 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, o que era a ideia básica da teoria da precipitação quase *in situ*.

Mas, como se conclui da análise das cartas dos campos da divergência, também não se pode aceitar a ideia precisamente oposta de que a fonte da unidade 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 devido a evaporação, 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, como se depreende da inspecção dos mapas do fluxo do vapor de água em várias regiões do Globo.

5. Outro argumento em favor da precipitação-evaporação quase *in situ* era baseado nas determinações das concentrações em cloro das águas de escoamento e de precipitação, a que se procedeu em vários pontos dos Estados Unidos (Horton, 1943). Como os valores das concentrações decrescem muito rapidamente do litoral para o interior, 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 quando se provasse que os núcleos de condensação eram constituídos apenas por partículas de cloreto de sódio e que, por sua vez, a quantidade de «clorião» encontrada nas águas de escoamento era proveniente exclusivamente dos núcleos de condensação.

Sabe-se hoje que só uma pequena fracção dos núcleos de condensação é constituída por partículas de cloreto de sódio. Além disso, não se pode admitir que o conteúdo em cloro das águas de escoamento

possa ser proveniente dessa fracção dos núcleos de condensação: uma cuidada análise química das águas da precipitação mostrou que o seu conteúdo em cloro é até muito inferior ao da água que se escoia nas regiões do litoral. A forte concentração em sal das águas de escoamento deve ser atribuída à existência de partículas de dimensões muito variadas espalhadas pelos ventos e que caem devido ao seu peso, arrastadas pela precipitação ou ainda como núcleos de precipitação. Só no último caso podem ser transportadas até grandes distâncias das costas. Vai-se dando assim uma posição selectiva, com as de maiores dimensões mais junto à costa, donde resulta o decréscimo da concentração das águas de escoamento, em que se dissolvem as partículas caídas, à medida que se avança para o interior.

6. Parece que a melhor forma de estudar as regiões das fontes e sumidoiros da humidade na atmosfera e, portanto, o papel da atmosfera do ciclo hidrológico, é através da análise do campo da divergência do fluxo do vapor de água. Evidentemente que, para o estudo do balanço duma região de área geográfica limitada, tem que se aumentar consideravelmente a densidade das estações aerológicas e o cálculo do campo da divergência deve buscar-se num *discretum* com um dimensionamento adequado. É possível determinar quantitativamente por este método a percentagem de precipitação atribuída a fontes exteriores (fluxo) e a fontes locais (evapotranspiração).

Estudos circunscritos a regiões de área pequena são por isso muito importantes, mas a actual rede aerológica só em casos excepcionais os torna possíveis (Estados Unidos, Canadá, Europa Ocidental, etc.).

7. Como a percentagem da precipitação actual devida à evaporação é pequena, segue-se que um aumento da evapotranspiração devida a modificações artificiais numa região vai ter pequena repercussão no clima das regiões circunvizinhas. Ainda que a precipitação varie de ano para ano, esta depende fundamentalmente da intensidade das circulações, na escala planetária ou sinóptica, e a percentagem

de água de escoamento cedida aos oceanos e a obtida pela atmosfera por evapotranspiração serão de importância secundária na determinação da quantidade anual da precipitação. Todavia, deve existir uma correlação entre a configuração do campo médio da divergência e as isoietas relativas ao mesmo intervalo de tempo. É de facto o que resulta comparando os mapas do campo da divergência do fluxo do vapor de água com as cartas de precipitação anual, verificando-se que as isolinhas da divergência são quase isoietas.

É claro que não tem que haver uma correlação elevada entre os valores do transporte total do vapor de água e a quantidade de precipitação, visto que esta depende da convergência do transporte do vapor de água. Para que esta divergência seja utilizável, é necessário que ocorra qualquer mecanismo físico (dinâmico ou termodinâmico) que estabeleça os movimentos verticais da atmosfera, sem os quais se não verifica a condensação nem portanto a precipitação.

Sabe-se no entanto que valores baixos do fluxo do vapor de água nunca apareceram associados a valores elevados da quantidade de precipitação; e a existência dum valor elevado do fluxo do vapor de água pode constituir uma condição necessária, mas não suficiente, para que se observe precipitação numa região.

O fluxo elevado, associado à existência de depressões em que se verificam fortes movimentos verticais, constitui o *quantum satis* para que se observe a precipitação. O cálculo do campo da convergência do fluxo das perturbações pode ser localmente muito importante para o estudo do regime da precipitação numa região.

8. As implicações dos vários aspectos do problema da precipitação que temos estado a tratar são muito importantes, quando se considera a possibilidade de numa dada região, provocar a precipitação por processos artificiais. Ainda mesmo que seja possível precipitar toda a água contida numa massa nublada, como o conteúdo em água nas fases líquida e sólida é muito pequeno, o processo não se pode manter se não houver fluxo de vapor de água suficientemente

intenso para garantir a sua continuidade. Este fluxo não é condicionado por factores locais ou regionais, mas sim pela circulação geral.

Quaisquer modificações nos factores do clima correspondem essencialmente a uma modificação das características da circulação geral da atmosfera.

9. Em média, a quantidade total de água precipitada é da ordem de 100 cm por ano. Por outro lado a quantidade de água precipitável existente na atmosfera é da ordem de 2,8 cm. Logo pode concluir-se que, se cessasse a evaporação, a água retida na atmosfera podia ser completamente removida num período de cerca de 10 dias.

EPÍLOGO

A Circulação da Água — O mais Espectacular de Todos os Sistemas de Dessalinização

Numa abordagem sistémica do problema, pode dizer-se que o Sol, o mar e a atmosfera constituem um macrossistema natural de destilação gigantesco, com um subsistema de distribuição planetária extremamente bem organizado. A energia é fornecida pelo Sol e faz mover a «roda da água» de tal forma que ela circula em movimento perpétuo dos oceanos para a atmosfera, da atmosfera para os continentes e dos continentes novamente para o mar, fechando o ciclo!

Assim a água está em movimento contínuo, nunca desaparece. A água que hoje circula é a mesma que circulava nos dias do Imperador César Augusto...

A energia solar evapora dos oceanos cerca de 361 000 quilómetros cúbicos de água por ano. Destes caem novamente nos oceanos cerca de 324 000 quilómetros cúbicos. Os restantes 37 000 quilómetros

cúbicos são transportados para os continentes, sob a forma de vapor, pelas circulações atmosféricas. Este vapor de água condensa-se e caem por ano cerca de 99 000 quilómetros cúbicos sob a forma de precipitação que depois se escoia e se infiltra de várias maneiras. A maior parte desta água, ou seja cerca de 62 000 quilómetros cúbicos por ano, retorna à atmosfera por evaporação das águas superficiais, do solo e por transpiração da vegetação. Os restantes 37 000 quilómetros cúbicos por ano retornam aos oceanos através dos grandes rios e do fluxo das águas subterrâneas, fechando assim o ciclo. As variações da precipitação no decurso do tempo e a evaporação mais ou menos regular originam variações sasonais do escoamento, que ficam quase estabilizadas quando a água circulante é armazenada nos continentes, nos lagos, nas neves, no solo e no subsolo. O escoamento de base é da ordem de 11 000 quilómetros cúbicos enquanto que a parte restante se espraia sob a forma de cheias através das regiões vizinhas dos cursos de água. A utilização pelo homem dos recursos em água pode ser dos seguintes dois tipos: a utilização de grandes massas de água como se apresentam na natureza (emprego *in situ*) e a utilização da água que implica o seu transporte das fontes naturais. Estão no primeiro caso a utilização da água em centrais hidroeléctricas e barragens, na pesca, no recreio, etc.; e, no segundo, o abastecimento de água às populações, à indústria e para rega.

A expressão «consumo de água» refere-se ao consumo para fins específicos, visto que a água nunca desaparece; pode mudar de localização ou de fase, mas conserva-se na totalidade e reentra sempre no sistema geral de circulação da água. O consumo de água para os vários fins e usos representa apenas um circuito de derivação da água que circula através do sistema do ciclo hidrológico.

Os recursos em água disponíveis para o consumo não são constituídos, pelo menos directamente, pela água armazenada nos oceanos ou nas grandes calotes polares. São constituídos principalmente pela água em circulação nos continentes, designadamente nos grandes rios,

nos lagos e nos cursos de água com escoamento subterrâneo. São portanto 37 000 quilómetros cúbicos de água por ano — escoamento global dos continentes — que constituem os recursos reais em água disponível para a humanidade.

Nenhuma água dos rios, dos lagos ou dos aquíferos subterrâneos, captada para ser utilizada na agricultura, na indústria ou no abastecimento de água às populações, se perde do ciclo hidrológico. Os efeitos gerais da captação, das perdas para a atmosfera por evaporação e evapotranspiração e do escoamento para os rios constituem apenas derivações do ciclo hidrológico global natural. Com o alargamento das áreas irrigadas aumentará a perda de água por evapotranspiração e, como esta água é subtraída ao escoamento total, o afluxo de água para os oceanos tenderá a diminuir. Por isso, de futuro, a água retornada para os oceanos e proveniente dos continentes será cada vez menor o que a longo prazo pode conduzir a uma flutuação do equilíbrio do balanço de água dos oceanos.

Um decréscimo de dois por cento na quantidade de água caída nos continentes e transportada para os oceanos (presentemente é 37 por cento) conduziria, nas condições actuais do clima, ao fim de 40 000 anos, a um abaixamento de 250 metros do nível do mar. O problema é no entanto muito mais complexo, devido às inter-relações dos vários processos hidrológicos, à interacção oceano-atmosfera e aos efeitos de realimentação do sistema global do ciclo hidrológico.

A exposição, até agora feita, parte da premissa de que se mantém o grau de pureza original da água disponível. Ora sabemos bem que não é assim: às limitações expostas sobre a utilização dos recursos hídricos vem agora sobrepor-se o perigo real da sua poluição. Esta reduz substancialmente as disponibilidades em água e pode levar até à sua quase extinção como recurso natural e renovável, indispensável para 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 deteriorização da água

já usada como ainda a dos rios ou dos lagos em que é lançada. Uma porção relativamente pequena de água poluída pode destruir e tornar portanto não-utilizáveis mananciais consideráveis de recursos hídricos. O crescimento da população e o seu progresso, com a necessidade constante de maiores consumos em água, que constitui um dos índices mais seguros do desenvolvimento económico, social e até cultural, origina grandes preocupações para a sociedade. A incapacidade de controlar todos os factores que conduzem à degradação dos recursos hídricos pode levar a situações extremamente críticas, por serem irreversíveis, que urge evitar.

O ciclo hidrológico, numa escala planetária, pode ser encarado como um processo gigantesco de destilação da substância água sobre toda a Terra. O aquecimento das regiões subtropicais pela radiação solar leva a uma evaporação contínua de água salgada nos oceanos que é lançada na atmosfera sob a forma de vapor. Depois é removida e transportada pelas circulações de várias escalas (circulação geral da atmosfera) para as regiões equatoriais e para as regiões das latitudes médias e elevadas, principalmente na fase vapor. Com o arrefecimento devido à expansão adiabática, uma grande parte do vapor de água condensa-se, formando nuvens, que finalmente conduzem à precipitação da água doce sob a forma de chuva ou neve, com máximos na região equatorial e nas zonas das latitudes médias e elevadas. Por fim, a acção combinada das correntes marítimas, dos rios, dos glaciares, dos lagos e das correntes subterrâneas leva a um transporte da água na fase líquida ou sólida para as regiões em que se gera o vapor de água, de forma a compensar a perda por evaporação, assim se fechando a sequência de fenómenos naturais envolvidos nas transições de fase da água e nos transportes correspondentes. E assim a água — «dom divino da natureza» — fica uma vez mais pronta a reiniciar nova jornada no ciclo hidrológico.

Em face do papel desempenhado pela atmosfera no processo de destilação e no transporte da água, diremos que «o sol, o ar, a terra

e o mar se dão as mãos» para manter o sistema espectacular e natural de dessalinização, ao mesmo tempo que

«Quando as nuvens estiverem carregadas,
derramarão chuva sobre a Terra»,

e

«Os rios correm para o mar, contudo o
mar nunca se enche. Os rios vão desaguar
ao lugar donde saíram, para voltarem a
correr»

Ecclesiastes (11:3;1:7)

APÊNDICE I

A Equação Clássica da Hidrologia

O cálculo do balanço hídrico numa região pode fazer-se a partir da equação fundamental da Hidrologia. É uma equação que resulta do princípio da conservação da água no ramo terrestre e exprime o balanço das grandezas que representam quantitativamente os fenómenos que ocorrem no ciclo hidrológico. A equação de balanço, para um certo intervalo de tempo Δt , pode escrever-se na forma:

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

em que os símbolos têm os seguintes significados:

R , N e D — quantidades de água recebidas no Globo por precipitação, por intercepção do nevoeiro e por deposição de outros hidrometeoros (orvalho, geada, etc.), respectivamente.

ΔS_p , ΔS , ΔS_u — variações das quantidades de água correspondentes ao armazenamento superficial, do solo e das águas subterrâneas;

r_i e r_s — quantidades da água que se infiltra no terreno e da que se escoia na superfície e no subsolo.

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

Esta equação é fundamentalmente uma equação de balanço, que não envolve nenhuma relação de causalidade. É uma equação de con-

dição e não constitui portanto uma equação da dinâmica do ciclo hidrológico.

A importância de cada um destes elementos nos vários estudos hidrológicos depende evidentemente da natureza do problema específico que se considera. Na generalidade dos casos, os mais importantes são a precipitação R , a variação de armazenamento superficial e no solo ($\Delta S + \Delta S_u$), o escoamento na secção final dos cursos de água r e a evaporação E . Nestes casos a equação fundamental reduz-se a:

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

em que

$$r = r_s + r_u \text{ e}$$

$$\Delta = \Delta S + \Delta S_u$$

Para um intervalo de tempo Δt suficientemente longo, as variações dos diferentes tipos de armazenamento podem desprezar-se quando comparadas com os outros termos da equação que assim se reduz à forma usual nas aplicações:

$$R = r + E$$

A diferença entre a precipitação e o escoamento, para intervalos de tempo suficientemente extensos, é, em primeira aproximação, compensada pela evaporação.

Nestas equações, R pode calcular-se a partir das observações meteorológicas e r pode determinar-se a partir da análise do *campo de corrente* do escoamento dos rios. A evapotranspiração E da superfície é a grandeza mais difícil de medir. Há uma literatura muito extensa com estimativas de E baseadas em fórmulas empíricas que pretendem tomar em linha de conta os valores das observações meteo-

rológicas, a natureza e densidade da vegetação e a natureza do solo. Os métodos de Thornthwaite, Penman e Turc, por exemplo, têm sido largamente utilizados.

A variação da capacidade de retenção de água do solo, $\Delta S + \Delta S_u$, pode determinar-se desde que se conheçam as outras três grandezas que figuram na equação da Hidrologia. Mas há ainda outros factores que fazem variar $\Delta S + \Delta S_u$, entre os quais a circulação das águas subterrâneas, a remoção de água para fins industriais e irrigação, etc.. O fluxo das águas subterrâneas é principalmente comandado pelas forças da gravidade e depende das características do meio aquífero e da natureza geológica das superfícies das camadas impermeáveis que o limitam. A lei que rege o movimento das águas do manto freático foi estabelecida por Darcy em 1856.

APÊNDICE II

O Fluxo do Vapor de Água e a Hidrologia

As descrições quantitativas do balanço hídrico numa dada região do Globo têm-se baseado no estudo do ramo terrestre do ciclo hidrológico, usando fundamentalmente a equação clássica da Hidrologia. Contudo, a dificuldade ou mesmo a impossibilidade de obter valores significativos da evapotranspiração, da evaporação e até certo ponto da precipitação, da infiltração e da retenção da água no solo, têm limitado o uso desta equação.

Investigações recentes, com uma orientação completamente diferente, permitiram contornar ou mesmo eliminar algumas destas dificuldades e levantar a indeterminação a partir do estudo dos campos

de distribuição dos parâmetros que caracterizam o comportamento do vapor de água na atmosfera. Assim, devido à indestrutibilidade do componente água, quando se consideram as suas três possíveis fases, pode calcular-se o balanço hídrico numa região a partir do estudo do ramo aéreo do ciclo hidrológico.

O conceito de *ciclo hidrológico* é, fundamentalmente, uma consequência do princípio geral da conservação do componente água nas suas três fases na Terra (Globo e atmosfera). Esta indestrutibilidade traduz-se por uma equação do tipo da equação da continuidade da massa. Para um circuito fechado, $[\gamma]$, essa equação traduz-se:

$$\oint_{[\gamma]} \vec{Q}_T \cdot d\vec{\gamma} = 0$$

em que \vec{Q}_T é o campo total do transporte do componente água em qualquer das três fases possíveis.

Consideremos dois pontos P_1 e P_2 do ciclo hidrológico, à superfície do Globo. O integral curvilíneo ao longo do circuito fechado $[\gamma]$ pode decompor-se nos integrais curvilíneos ao longo dos troços superior e inferior, γ_s e γ_i :

$$\int_{\vec{\gamma}_s} \vec{Q}_T \cdot d\vec{\gamma} + \int_{\vec{\gamma}_i} \vec{Q}_T \cdot d\vec{\gamma} = 0$$

No troço superior, relativo à atmosfera, predomina o transporte na fase gasosa e o campo geral \vec{Q}_T reduz-se ao campo do fluxo do vapor de água \vec{Q} . No troço inferior (hidrosfera e litosfera), predomina

minam os transportes na fase líquida e, em menor escala, na fase sólida, e o campo geral \vec{Q}_T reduz-se ao escoamento geral \vec{r} (à superfície e subterrâneo). Portanto, notando que os valores de E e de R são os mesmos na superfície de separação Globo-atmosfera, tem-se:

$$\int_{\vec{\gamma}_s} \vec{Q} \cdot d\vec{\gamma} = \int_{\vec{\gamma}_i} \vec{r} \cdot d\vec{\gamma}$$

isto é, o escoamento aéreo é compensado exactamente pelo escoamento terrestre.

Na atmosfera, pode aceitar-se que a variação local da quantidade de água precipitável é desprezável, isto é, $\frac{\delta W}{\delta t} = 0$, para qualquer intervalo de tempo. Pelo contrário, a retenção da água na litosfera é muito variável no tempo e só se tem $\Delta S = 0$ quando o intervalo de tempo é cuidadosamente escolhido (um ano hidrológico, por exemplo), o que mostra a vantagem em substituir o cálculo do troço inferior do ciclo hidrológico pelo troço superior.

A equação clássica nem sempre é suficiente para especificar e determinar o balanço hídrico duma região. Ainda mesmo admitindo que se podem obter boas estimativas quantitativas das grandezas R e r , a evapotranspiração E só pode ser calculada a partir de fórmulas empíricas de fundamento físico precário. De facto, na melhor das hipóteses, estamos em presença duma equação a duas incógnitas, ΔS e E . Os conceitos de evapotranspiração potencial e de capacidade de campo foram introduzidos para levantar esta indeterminação.

A equação anterior mostra matematicamente que, no estudo do ciclo hidrológico, os ramos aéreo e terrestre são equivalentes, o que mostra imediatamente a importância que têm no estudo do ciclo hidrológico os campos de distribuição e do fluxo do vapor de água na

atmosfera, designadamente a água precipitável W e o campo de transporte total \vec{Q} .

W representa a quantidade de vapor de água que existe numa coluna unitária da atmosfera e se estende da superfície do Globo até ao topo da atmosfera; avalia-se em g/cm^2 ou em mm e indica a altura que atingiria se todo o vapor de água se condensasse e se depositasse na base da coluna.

\vec{Q}_T representa a quantidade de água que, na unidade de tempo, atravessa uma parede conceptual com a largura de 1 cm e que se estende até ao topo da atmosfera, colocada perpendicularmente ao campo \vec{Q} . Avalia-se em $g/(cm.s)$.

A quantidade de água precipitável W e o campo \vec{Q} do vapor de água, num local duma região (*escoamento aéreo*), são definidos pelas equações:

$$W = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} q \cdot dp$$

$$\vec{Q} = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} q \vec{v} dp$$

em que g é a aceleração da gravidade, p_0 a pressão atmosférica na superfície do Globo, q a humidade específica do ar e $\vec{v} = (\vec{u}i + \vec{v}j)$ a velocidade do vento.

Os elementos fundamentais necessários para calcular estas expressões são obtidos directamente das observações aerológicas, executadas em geral duas vezes por dia nas estações de radiossondagem. As grandezas usadas são a humidade específica q , e as componentes zonal

e meridional da velocidade do vento u e v , observadas nos seguintes níveis: superfície, 900, 850, 800, 700, 500, 300 e 200 mb. O processamento e o tratamento matemático pode ser feito utilizando computadores.

Notando que as fontes e os sumidouros do componente água na fase vapor na atmosfera só podem ser devidos a evaporação e a precipitação, a equação de balanço do componente água na atmosfera pode escrever-se, como se sabe, sob a forma de uma equação de continuidade com fontes e sumidouros:

$$\frac{\delta W}{\delta t} + \text{div } \vec{Q} = E - R$$

Como a variação da capacidade de retenção da atmosfera para o vapor de água é muito pequena, pode aceitar-se que $\delta W/\delta t = 0$; e a equação anterior permite determinar E , conhecidos o valor da precipitação R e o campo de divergência $\text{div } \vec{Q}$ do transporte do vapor de água.

Para uma região de área A limitada pelo contorno c (bacia hidrográfica de um rio ou lago, etc), a equação anterior pode escrever-se, pelo teorema da divergência de Ostrogradsky-Gauss, com a forma:

$$\frac{\delta W}{\delta t} + \frac{1}{A} \oint_c (\vec{Q} \cdot \vec{n}) \cdot dc = E - R$$

em que \vec{n} é a normal exterior ao contorno c da região considerada. Esta expressão permite determinar o valor médio espacial de E na região considerada, porque o valor de R se determina por qualquer dos processos conhecidos (Thiessen, Horton, etc.).

As equações anteriores permitem avaliar quantitativamente $E - R$, sem recurso a qualquer hipótese restritiva. Portanto, a equação de balanço do vapor de água na atmosfera pode considerar-se, fundamentalmente, uma equação de Hidrologia, baseada em princípios mais bem estruturados fisicamente do que a equação clássica. Parece até constituir o melhor processo para determinar a evapotranspiração E , visto que assim se podem medir directamente os valores de R e do campo \vec{Q} ; e será, sem dúvida, o melhor meio de verificar a validade das expressões empíricas até agora estabelecidas para o cálculo de E (Thornthwaite, Penman, etc.), como já mencionámos.

RESUMO

A água constitui um recurso natural insubstituível sem o qual não seria possível a vida na Terra, tal como a concebemos. A água, por ser um dos componentes mais importantes do ambiente natural, desempenha um papel único na vida, na actividade e na cultura do homem, papel que tem sido decisivo na evolução das civilizações através da história da humanidade e que tem uma importância sempre crescente à medida que a sociedade evolui.

Conseguir água suficiente para satisfazer as necessidades futuras do homem constitui um dos problemas de maior envergadura científica e técnica dos nossos dias. A solução deste problema reside em parte no desenvolvimento da hidrologia como Ciência na sua estrutura global, baseado num melhor conhecimento do ciclo da água *oceano-continente-atmosfera-oceano* e na melhor compreensão dos fenómenos físicos e químicos da nucleação, da formação de nuvens e dos mecanismos da precipitação.

Apesar da importância da água não só para a vida, como para a prosperidade do homem, tem continuado a verificar-se a utilização ineficiente da água e só recentemente se têm vindo a desenvolver esforços no sentido de controlar o seu uso e a procurar manter a sua qualidade.

Durante as últimas décadas tem-se intensificado a investigação do balanço hídrico. Estudos recentes têm vindo a considerar o ciclo da água com uma circulação fechada, incluindo os ramos terrestres e atmosférico. É dentro desta concepção que começam a emergir esquemas específicos que permitem o controlo do ciclo hidrológico.

Na fase inicial da sua existência, a Terra não teria qualquer atmosfera, visto que os elementos mais leves como o hélio e o hidrogénio se teriam escapado à acção da gravidade da Terra. O nosso planeta não teria oceanos e a superfície do globo teria sido coberta por vulcões muito activos lançando lava e gases como o hidrogénio e derivados ricos do hidrogénio, e vapores, principalmente vapor de água. As moléculas da água lançadas pelas emissões vulcânicas sofriam uma forte dissociação originando oxigénio e hidrogénio. Enquanto que o hidrogénio se escapou, o oxigénio reagindo com o amoníaco e com os metais originou azoto e dióxido de carbono, cuja mistura teria constituído uma atmosfera intermédia. A composição desta mais tarde evoluiu, a partir da altura em que começavam a aparecer as plantas que com a fotossíntese absorviam o dióxido de carbono e libertavam o oxigénio. Atingida a estabilização, o excesso de água condensou-se e depositou-se nas depressões da superfície do globo formando os oceanos. De facto, a maior parte do vapor lançado pelos vulcões excedia o que correspondia à saturação da atmosfera, conduzindo à formação de precipitação na forma líquida ou sólida.

A quantidade de água existente na Terra pode considerar-se constante no decurso da história do homem. A água actualmente existente pode considerar-se distribuída por três reservatórios principais, que pela ordem da sua importância são os oceanos, os continentes e a atmosfera. A Terra contém no seu interior uma quantidade muito apreciável de água dissolvida ou combinada quimicamente, ainda que não seja fácil fazer qualquer estimativa adequada da sua quantidade.

Cerca de 97,3 por cento de toda a água da hidrosfera está contida nos oceanos; os restantes 2,7 por cento existem nos continentes, principalmente nas calotes polares, nos lagos, rios e mares interiores. A atmosfera contém apenas uma pequeníssima parte, cerca de 100 000 vezes menos, de toda a água da hidrosfera.

O ciclo hidrológico é o conceito fundamental da hidrologia. É uma consequência do princípio da conservação da água nas suas três fases. Descreve uma sequência fechada de fenómenos naturais pelos quais a água é lançada na atmosfera através da evaporação à superfície e retorna novamente à superfície por precipitação sólida ou líquida. A superfície retém uma parte, outra infiltra-se e finalmente outra parte escoar-se pelos rios ou evapora-se novamente para a atmosfera.

O ciclo hidrológico apresenta dois ramos distintos: o ramo atmosférico em que predomina o fluxo da água na fase vapor e o ramo terrestre em que o fluxo se verifica nas fases líquida ou sólida, como os glaciares.

O factor meteorológico mais importante para o ciclo hidrológico é a radiação solar que fornece a energia que origina e mantém a circulação da água no ciclo. A temperatura e a humidade do ar e os ventos condicionam o processo da evaporação. Por seu turno, a radiação solar que atinge a superfície da terra é condicionada pelas nuvens que constituem depósitos visíveis de água nas fases condensadas.

A quantidade média total do vapor de água para toda a atmosfera é muitíssimo pequena atingindo apenas 0,3 por cento da atmosfera e é da mesma ordem de grandeza da água contida nos vários lagos do Globo.

A quantidade de humidade da atmosfera decresce rapidamente com a altitude, com cerca de 50 por cento confinada à camada de 1,6 km e de 90 por cento nos primeiros 6 km da atmosfera.

A quantidade total de água existente em média em toda a atmosfera é da ordem de $1,3 \times 10^6$ toneladas.

Ainda que a quantidade de água da atmosfera seja muito pequena verifica-se um transporte muitíssimo considerável de vapor pela circulação geral da atmosfera.

A influência desta quantidade de água precipitável tão diminuta é muito desproporcionada com as consequências que tem para o clima e para os recursos hídricos da Terra. De facto, o vapor de água é o factor mais importante em todos os processos radiativos da atmosfera, regulando toda a energética da Terra através da absorção e da emissão de radiação. Além disso a atmosfera e a sua circulação geral estabelecem o elo de ligação entre a evaporação, a condensação e a precipitação, permitindo assim o fecho do ciclo hidrológico.

Sempre que se verifica um desequilíbrio entre a evaporação e a precipitação numa da da região da superfície do Globo tem que se observar um transporte de vapor de água para as regiões em que se verifica um défice da diferença evaporação - precipitação.

Este transporte pode determinar-se a partir da observação dos ventos em altitude e da distribuição da humidade específica, mostrando assim o papel decisivo que a atmosfera tem no ciclo hidrológico.

Este tipo de estudos permite demonstrar que as fontes da humidade para toda a atmosfera estão localizadas principalmente nas regiões subtropicais dos oceanos em ambos os hemisférios e permite ainda explicar algumas das características do clima da Terra.

As necessidades de água variam numa gama muito considerável entre uma sociedade rural agrícola e uma sociedade altamente industrializada. Mas as necessidades em água estão sempre a aumentar. Torna-se, por isso, necessário utilizar os nossos recursos hídricos de uma forma racional, o que nos leva à necessidade de controlar o ciclo da água, tentando minimizar a evaporação dos lagos e das albufeiras e evitar que as águas se lancem nos oceanos sem se ter tirado delas todo o partido possível. A dessalinização das águas dos oceanos constitui uma forma de obter água doce fora

do quadro do ciclo hidrológico natural, recorrendo a várias formas de energia, incluindo a concentração da energia solar.

Uma forma de controlar o ciclo hidrológico é acelerar a circulação do ramo aéreo, através da precipitação provocada artificialmente pela inseminação das nuvens em iodeto de prata, dióxido de carbono e outras substâncias convenientes. No entanto, por enquanto esta técnica não se pode utilizar porque não se justifica economicamente a provocação de precipitação artificial e não se conhecem suficientemente bem os mecanismos da nucleação e os condicionalismos naturais que levam à precipitação. É, por isso, importante guardar uma atitude de prudência e de reserva em todos os esquemas propostos por «fazedores de chuva».

A extracção de humidade da atmosfera pela formação e recolha de orvalho é um processo que já era utilizado na Idade Média, mas as quantidades recolhidas são em geral muito pequenas. Recentemente foi sugerido um processo baseado na convecção forçada e controlada em massas de ar quentes e húmidas.

O controle do ramo terrestre tem-se processado através do controle do escoamento à superfície desde tempos imemoriais através da construção de barragens e de lagos artificiais, desvios de cursos de água. O controle das águas subterrâneas tem vindo a realizar-se há mais de 5000 anos e todos sabemos da existência de sistemas de canais subterrâneos para esse fim que no Irão tomam o nome de Qanats. As águas subterrâneas constituem hoje grande parte dos mananciais de água doce para prover às necessidades dos grandes aglomerados urbanos e outros.

Têm-se feito algumas tentativas de controlar o ciclo hidrológico nos oceanos. Já nos referimos à dessalinização da água dos mares. Ultimamente, porém, tem vindo a considerar-se a hipótese de transportar *icebergs* da Antártida para as regiões áridas da África, América, Ásia e Austrália. Seria possível rebocar um comboio de dez *icebergs* com um total de 10 biliões de metros cúbicos de gelo

para a Califórnia com perdas por fusão e evaporação da ordem de 10 por cento apenas. Os *icebergs* poderiam ficar «atracados» e irem sendo consumidos de acordo com as necessidades humanas.

O ciclo hidrológico em escala planetária pode ser encarado como o resultado dum sistema gigantesco de destilação que se estende a todo o Globo. O aquecimento das regiões tropicais pela radiação solar leva a uma evaporação contínua que lança a água na atmosfera e é removida e transportada pela circulação geral da atmosfera, principalmente sob a forma de vapor de água para latitudes a norte e a sul das regiões de excesso de evaporação. Durante a transferência, devido ao arrefecimento associado à expansão adiabática, parte do vapor de água condensa-se e forma nuvens que depois originam a precipitação. A acção combinada das correntes marítimas, dos escoamentos dos rios e subterrâneo fornece a circulação de retorno e de compensação para as regiões de origem.

Dada a importância da *hidrosfera gasosa* e a existência dum *sistema motor* que é a circulação geral da atmosfera, podemos dizer que «o sol, a terra e o ar se dão as mãos» de tal forma que:

«Todos os rios correm para os mares; contudo este nunca se enche». (Ecclesiastes)

SUMMARY

Water is an irreplaceable natural resource without which the life as we conceive it would be impossible on Earth. The water being among the more important components of the natural environment plays a unique part in the life, activity and culture of man, a part that has been decisive in the evolution of civilizations throughout the history of mankind and that is becoming increasingly important as society continues to grow and develop.

Finding enough water to satisfy the needs of man is one of the most important and challenging scientific and technical problems of our times. Its solution lies in part in the development of hydrology as a science on its global nature based on a better understanding and on the knowledge of physical and chemical phenomena involved in the nucleation, cloud formation and the precipitation mechanisms.

In spite of the importance of water to the life and prosperity of mankind, the inefficient and wasteful ways of using it have been going on. It is only recently that efforts have been done to control its use and keep its quality.

During the past few decades the water balance has been the subject of intensive research. Recent studies take the water cycle as a closed circulation including both the terrestrial and the aerological branches. It is within this framework that possible specific schemes for the control of the water cycle started to emerge.

In the initial phase of its existence the Earth must have been devoid of any atmosphere since elements like the helium and the

hydrogen were too light to be kept by the earth's gravity. Our planet had no oceans and its surface was covered by active volcanoes pouring lava, gases, such as hydrogen and hydrogen rich compounds and vapours, mainly water vapour. Through the solar radiation and the photodissociation water molecules were split into hydrogen and oxygen. While the hydrogen escaped from the Earth the oxygen reacting with ammonia and methane to form nitrogen and carbon dioxide, whose mixture constituted an intermediate atmosphere. Its composition later changed to the present state when plants appeared and photosynthesis started to work absorbing carbon dioxide and liberating oxygen. After the stabilization the excess water condensed and accumulated in surface depressions forming the oceans. In fact, most of the steam ejected by volcanoes and accumulated at this stage was more than enough to saturate the atmosphere, leading then to the precipitation as rain or as snow.

The amount of water existing on Earth can be considered constant during the history of mankind. At present the water is distributed in three main reservoirs, which by order of its importance are the oceans, the continents and the atmosphere. The interior of the Earth contains an appreciable amount of water dissolved or chemically combined but it is not easy to make any adequate evaluation.

About 97.3 per cent of all the water in the hydrosphere is in the oceans; the remaining 2.7 per cent is on the continents, mostly (2.65 per cent) in the polar glaciers and in the lakes, rivers, interior seas. The atmosphere contains a mere hundred thousand of the total water present on the Earth: 0.013×10^5 cubic meters as compared with $1440 \times 10^6 \text{ Km}^3$ the total water content of the hydrosphere.

The water cycle is the fundamental concept of hydrology. It is a consequence of the principle of water conservation in its three phases. It describes a closed sequence of natural phenomena by

which water enters the atmosphere through evaporation and returns to the surface by precipitation in liquid or solid phase. At the surface it is partially retained or runs off to evaporate again into the atmosphere.

The hydrologic cycle has two distinct branches: the atmospheric branch in which the horizontal flux of water is mainly in the gaseous phase and the terrestrial branch in which the flux of water in the liquid phase and the solid phase predominates.

The most important meteorological factor in the hydrologic cycle is the solar radiation which supplies the energy that originates and maintains the circulation of water in the cycle. Air temperature, humidity and wind mainly condition the evapotranspiration process. Clouds, the visible deposits of condensed water in the atmosphere in turn condition the solar radiation that reaches the Earth.

The annual mean water vapour content averaged for the entire atmosphere is rather small amounting to about 0.3 per cent of the total mass of the atmosphere, and it is of the same order as the water contained in fresh water lakes.

The moisture content of the atmosphere decreases rapidly with the height, with about 50 per cent of the total precipitable water vapour confined to the layer up to 1.5 km and more than 90 per cent to the first 6 km of the atmosphere. The total amount for all the atmosphere is of the order of 1.3×10^6 tons.

Although the total amount of water in the atmosphere is small, there is however a huge transport of water vapour by the general circulation of the atmosphere. The influence of such a small amount of water on the climate of the Earth and on hydric resources is far out of proportion to its mass. The water vapour is the most important factor in all radiative processes of the atmosphere and it regulates the energetics of the Earth through the absorption and transmission of radiation. Furthermore, the atmosphere and its general circulation

establishes the link between the evaporation, condensation and precipitation closing the hydrologic cycle.

Whenever there is an imbalance between precipitation and evaporation there is a need for a net transport of water vapour to or from the locality by atmospheric circulation. Such water vapour transport can be assessed from observations of the winds and the moisture content throughout the atmosphere, showing how decisive is the role played by the atmosphere in all the hydrologic cycle.

This type of studies shows that the main sources of water vapour for the atmosphere are localised over the subtropical oceans in both hemispheres, and explains also some of the features of the climate observed at the Earth's surface.

The water needs vary widely from an agricultural society to a highly industrial society. But the water required by the mankind is always increasing. It is thus necessary to use our water resources in a rational way. This leads to the necessity of controlling the water cycle, trying to avoid that the waters run into the seas until they have been used to the largest useful extent.

The desalting of seawater is a way to obtain fresh water outside the natural cycle using nuclear, fossil-fuel energy or concentrated solar energy.

One way of controlling the water cycle would be to speed it up in the atmosphere branch by the artificial inducement of precipitation through the seeding of clouds with silver iodine, «dry ice» (carbon dioxide) and other substances. The technique cannot be used at present because artificially induced precipitation is not yet economically justified or even physically defined. It is necessary to obtain a much deeper knowledge of cloud physics and the way in which nature produces rain and snow. Present attempts at rainmaking must be undertaken with cautions.

The extraction of moisture from the atmosphere through the

formation of dew has been used since the Middle Ages, but the amounts obtained are very small. Recently some other attempts have been suggested for the extraction of water vapour from the atmosphere through the controlled and forced moist connection process.

The control of the terrestrial branch has been made mainly through the control of the surface run off from immemorial times by manmade lakes, dams and the change of river beds. The underground water control has already been accomplished some 3000 years ago by using a canal-system such as the Qanats of Iran. Ground-water is today one of the largest water supplies for some important urban agglomerates and others.

Some attempts have been made to control the water cycle over the oceans. The already mentioned desalting process is only an example of such attempts.

The feasible towing Antarctic icebergs to arid areas in Africa, America, Asia and Australia has been considered. It is suggested that it would be possible to tow a train of 10 icebergs containing a total of about 10 billion cubic meters to Southern California in 10 months with a loss of only 10 per cent of water content. The icebergs could be moored at their destination and used according to the man needs.

The hydrological cycle on a planetary scale can be regarded as the result of a gigantic distillation scheme extending over the entire globe. The heating of subtropical regions by solar radiation leads to a continuous evaporation of water, which is released into the atmosphere and is removed by the general circulation and transported northward and southward into other latitudes.

During the transfer in the gaseous phase because of cooling due to expansion some water vapour condenses to form clouds which lead to precipitation. The combined action of oceans currents of the

rivers and underground flows provides the compensation return of water to the source regions.

In view of the importance of the gaseous hydrosphere and the existence of a «motor system» which is the general circulation of the atmosphere we may say that «the sun, the air and the land go hand by hand» in such a way that:

«All the rivers run into the sea; yet the sea is not full»
(Ecclesiastes).

RESUME

L'eau constitue une ressource naturelle irremplaçable sans laquelle la vie sur la Terre, telle que nous la concevons, ne serait pas possible. L'eau étant un des composants les plus importants de l'environnement naturel, joue un rôle unique dans la vie, dans l'activité et dans la culture de l'homme, rôle qui a été décisif dans l'évolution des civilisations à travers l'histoire de l'humanité et qui prend une importance plus grande au fur et à mesure que la société évolue.

Obtenir l'eau suffisante pour satisfaire les besoins futurs de l'homme est un des problèmes de la plus ample envergure scientifique et technique de nos jours. La solution de ce problème dépend, en partie, du développement de l'hydrologie comme Science dans sa structure globale, basée sur une meilleure connaissance du cycle de l'eau «océan-continent-atmosphère-océan», et sur une meilleure compréhension des phénomènes physiques et chimiques de la nucléation, de la formation des nuages et des mécanismes de la précipitation.

Malgré l'importance de l'eau aussi bien pour la vie que pour la prospérité de l'homme, on continue à constater une utilisation inefficace et ce n'est que récemment que l'on a déployé des efforts pour contrôler son usage et essayer de maintenir sa qualité.

La recherche sur le bilan hydrique a été intensifiée au long de la dernière décennie. Des études récentes considèrent le cycle de l'eau comme une circulation fermée comprenant les branches terrestre et atmosphérique. C'est selon cette conception que des schémas spécifiques commencent à surgir permettant ainsi le contrôle du cycle hydrologique.

Dans la phase initiale de son existence, la Terre n'aurait guère d'atmosphère, puisque ses éléments les plus légers, tels que l'hélium et l'hydrogène, auraient échappé à l'action de la gravité de la Terre. Notre planète n'aurait pas d'océans et la surface du Globe aurait été couverte par des volcans très actifs qui émettaient des coulées de lave et des gaz, tels que l'hydrogène et ses dérivés riches et des vapeurs, principalement la vapeur d'eau. Les molécules d'eau lancées par les émissions volcaniques subissaient une forte dissociation due à l'action de la radiation solaire, formant l'oxygène et l'hydrogène. En même temps que l'hydrogène s'est échappé, l'oxygène, en réagissant avec l'ammoniac et les métaux, forma l'azote et le dioxyde de carbone dont le mélange aurait constitué une atmosphère intercalaire. La composition de cette dernière a plus tard évolué, à partir du moment où les plantes ont commencé à apparaître, lesquelles à travers la photosynthèse absorbaient le dioxyde de carbone et libéraient l'oxygène. Une fois atteinte la stabilisation, l'excès d'eau se condense et dépose dans les dépressions de la surface du Globe originant les océans. En effet, la plus grande partie de la vapeur émise par les volcans dépassait ce qui correspondait à la saturation de l'atmosphère, menant à la formation de la précipitation liquide ou solide.

On peut considérer constante la quantité d'eau existante sur la Terre au long de l'histoire de l'homme. Elle est répartie par trois réservoirs principaux par ordre de leur importance: les océans, les continents et l'atmosphère.

La quantité d'eau contenue à l'intérieur de la Terre est fort considérable, dissoute ou combinée chimiquement. Toutefois, l'évaluation de sa quantité n'est pas facile.

Les océans contiennent près de 97,3 % de toute l'eau de l'hydrosphère; les 2,7 % restants existent dans les continents, principalement dans les calottes polaires, dans les lacs, fleuves et mers

intérieures. L'atmosphère ne contient qu'une fraction minime, environ 100.000 fois moins que toute l'eau de l'hydrosphère.

Le cycle hydrologique est le concept fondamental de l'hydrologie. C'est une conséquence du principe de la conservation de l'eau dans ses trois phases. Il décrit une suite fermée de phénomènes naturels, par lesquels l'eau est lancée dans l'atmosphère à travers l'évaporation de surface et y retourne par précipitation solide ou liquide. La surface retient une partie, une autre s'infiltré et finalement l'autre partie est écoulée par les fleuves ou s'évapore à nouveau dans l'atmosphère.

Le cycle hydrologique présente deux branches distinctes: la branche atmosphérique où prédomine le flux de l'eau dans la phase de vapeur et la branche terrestre dont le flux est constaté dans les phases liquide ou solide — les glaciaires.

Le facteur le plus important pour le cycle hydrologique est la radiation solaire, laquelle fournit l'énergie qui origine et maintient la circulation de l'eau dans le cycle. La température et l'humidité de l'air ainsi que les vents conditionnent le procès d'évaporation. À son tour, la radiation solaire qui atteint la surface de la Terre est conditionnée par les nuages qui constituent des dépôts d'eau visibles dans leurs phases condensées.

La quantité moyenne totale de la vapeur d'eau dans toute l'atmosphère est très petite, n'atteignant que 0,5 % de sa masse totale. Son ordre de grandeur est égal à l'eau contenue dans les lacs du Globe.

La quantité d'humidité de l'atmosphère décroît rapidement avec l'altitude: 50 % environ dans la couche de 1,6 km et 90 % dans les premiers 6 km de l'atmosphère.

La quantité moyenne totale d'eau contenue dans toute l'atmosphère est de l'ordre de $1,3 \times 10^6$ tonnes.

On constate un transport fort considérable de vapeur d'eau par la circulation générale de l'atmosphère, bien que la quantité d'eau y soit très petite.

L'influence de cette si menue quantité d'eau précipitable est en disproportion avec les conséquences produites sur le climat et sur les ressources hydriques de la Terre. En effet, la vapeur d'eau est le facteur le plus important de tous les procès radio-actifs de l'atmosphère, réglant toute l'énergetique de la Terre à travers l'absorption et l'émission de radiations. En plus, l'atmosphère et sa circulation générale établissent un lien entre l'évaporation, la condensation et la précipitation, permettant ainsi de fermer le cycle hydrologique.

Toutes les fois que l'on constate un déséquilibre entre l'évaporation et la précipitation dans une certaine région de la surface du Globe, on doit observer un transport de vapeur vers les régions où se produit un déficit de la différence évaporation-précipitation. Ce transport peut être déterminé à partir de l'observation des vents en altitude et de la distribution de l'humidité spécifique, montrant ainsi le rôle décisif de l'atmosphère dans le cycle hydrologique.

Ce type d'études permet de démontrer que les sources de l'humidité pour toute l'atmosphère sont principalement localisées dans les régions sub-tropicales des océans des deux hémisphères et permet encore d'expliquer certaines caractéristiques du climat de la Terre.

La gamme des besoins en eau varie considérablement selon qu'il s'agit d'une société rurale agricole ou d'une société hautement industrialisée. Mais les besoins en eau augmentent toujours. Il faut, en conséquence, utiliser nos ressources hydriques d'une façon rationnelle par le contrôle du cycle de l'eau, cherchant à minimiser l'évaporation des lacs et des réservoirs et à éviter que les eaux déversent dans les océans sans que l'on en ait tiré tout le profit possible. Le dessalement des eaux des océans est une forme d'obtenir de l'eau douce hors du cadre du cycle hydrologique naturel, au moyen de diverses formes d'énergie, y comprise la concentration de l'énergie solaire.

Une des formes de contrôle du cycle hydrologique est l'accélération de la circulation de la branche aérienne par la précipitation provoquée artificiellement au moyen de l'insémination des nuages avec l'iodure d'argent, le dioxyde de carbone et autres substances adéquates. Toutefois, pour le moment cette technique ne peut être utilisée, car elle ne se justifie pas économiquement et parce qu'on ne connaît suffisamment bien ni les mécanismes de la nucléation ni les conditionalismes naturels qui conduisent à la précipitation. Il faut, donc, maintenir une attitude de prudence et de réserve devant tous les schémas proposés para les «faiseurs de pluie».

L'extraction de l'humidité de l'atmosphère par la formation et l'emmagasinement de la rosée était un procès déjà utilisé au Moyen Âge, mais les quantités retenues sont en général minimales. Récemment, on a suggéré un procès basé sur la convection forcée et contrôlée en des masses d'air chaudes et humides.

En ce qui concerne la branche terrestre, son contrôle a été effectué, depuis des temps immémoriaux, par la construction de barrages et de lacs artificiels, par la déviation de cours d'eau. Le contrôle des eaux souterraines est fait depuis plus de 3000 ans et nous avons tous connaissance de l'existence de systèmes de canaux souterrains à cette fin, qui prennent, en Iran, le nom de Qanats. Les eaux souterraines constituent aujourd'hui la plupart des sources d'eau douce pour pourvoir aux besoins des grandes agglomérations urbaines et autres.

Des tentatives ont été effectuées dans le but de contrôler le cycle hydrologique dans les océans. Nous avons déjà mentionné le dessalement de l'eau de mer. Néanmoins, on a considéré dernièrement l'hypothèse de transporter des icebergs de l'Antarctide vers des régions arides de l'Afrique, l'Amérique, de l'Asie et de l'Australie. Il serait possible de remorquer un convoi de dix icebergs, d'un total de 10 milliards de mètres cubiques de glace, vers la Californie avec des pertes par fusion et évaporation de l'ordre de 10 %

à peine. Les icebergs pourraient rester «accostés» et être consommés selon les besoins humains.

Le cycle hydrologique à l'échelle planétaire peut être envisagé comme le résultat d'un système gigantesque de distillation s'étendant à tout le Globe. L'échauffement des régions tropicales par la radiation solaire mène à l'évaporation continue qui lance l'eau dans l'atmosphère où elle circule et est transportée par la circulation générale, principalement sous la forme de vapeur, vers les latitudes au nord et au sud des régions ayant un excès d'évaporation. Pendant le transfert et dû au refroidissement associé à l'expansion adiabatique, une partie de la vapeur d'eau se condense et forme les nuages qui originent ensuite la précipitation. L'action combinée des courants maritimes, des écoulements des fleuves et souterrains fournit la circulation de retour et de compensation dans les régions d'origine.

Étant donnée l'importance de «l'hydrosphère gazeuse» et l'existence d'un «système à moteur» qu'est la circulation générale de l'atmosphère, nous pouvons dire que «le soleil, la terre et l'air se donnent les mains» de telle façon que:

«Tous les fleuves coulent vers la mer; toutefois elle n'est jamais remplie» (Ecclésiaste).

BIBLIOGRAFIA

- AMBROGGI, R. P. — *Water under the Sahara*. «Scientific American», New York, 214 (5) 1966, p. 21-29.
- CAMP, T. R. — *Water and its impurities*. New York, Reinhold, 1963.
- EAGLESON, P. S. — *Dynamic hydrology*. New York, McGraw-Hill, 1970.
- PEIXOTO, J. P. — *O campo da divergência do vapor de água na atmosfera*. «Rev. Fac. Ciênc.», Lisboa, sér. 7, vol. 29, 1959, p. 25-56.
- PEIXOTO, J. P. — *Pole-to-pole water balance for the IGY from aerological data*. «Nordic Hydrology», Copenhagen, vol. 3, 1972, p. 22-43.
- PEIXOTO, J. P. — *Atmospheric vapour computations for hydrological purposes*. Reports on WMO/IHD Projects. Geneva, Organização Meteorológica Mundial, 1973.
- PEIXOTO, J. P.; ALI KETTANI — *The control of the water cycle*. «Scientific American», New York, 228 (4) 1973, p. 49-61.
- PENMAN, H. L. — *The water cycle*. «Scientific American», New York, 223 (3) 1970, p. 98-108.
- STARR, V. P.; PEIXOTO, J. P. — *On the global balance of water vapour and the hydrology of deserts*. «Tellus», Stockholm, 10 (2) 1958, p. 189-194.
- STARR, V. P.; PEIXOTO, J. P.; MCKEAN, R. — *Pole-to-pole moisture conditions for the IGY*. «Pure and appl. Geophysics», Basel, vol. 75, 1969/IV, p. 300-331.
- WULFF, H. H. — *The Qanats of Iram*. «Scientific American», New York, 220 (4) 1968, p. 94-105.



JOSÉ PINTO PEIXOTO é professor catedrático da Universidade de Lisboa e exerce, actualmente, as funções de Director do Instituto Geofísico do Infante D. Luís. Além das suas funções de professor de Física na Faculdade de Ciências é colaborador do Departamento de Meteorologia do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (M.I.T.) desde 1956.

É sócio da Academia das Ciências de Lisboa e vogal do Programa Hidrológico Internacional. Perito de renome internacional nos domínios da meteorologia, em particular no que diz respeito ao ciclo da água, tem participado em diversas conferências e congressos internacionais sobre hidrologia.

Publicou numerosos trabalhos em revistas científicas nacionais e estrangeiras e elaborou, a convite da Organização Meteorológica Mundial e da UNESCO, a monografia «Atmospheric Vapour Flux Computations for Hydrological Purposes» (Publicação WMO/IND, n.º 20, Genebra 1973).

Colabora, desde há anos com os organismos da Secretaria de Estado do Urbanismo e Ambiente.