



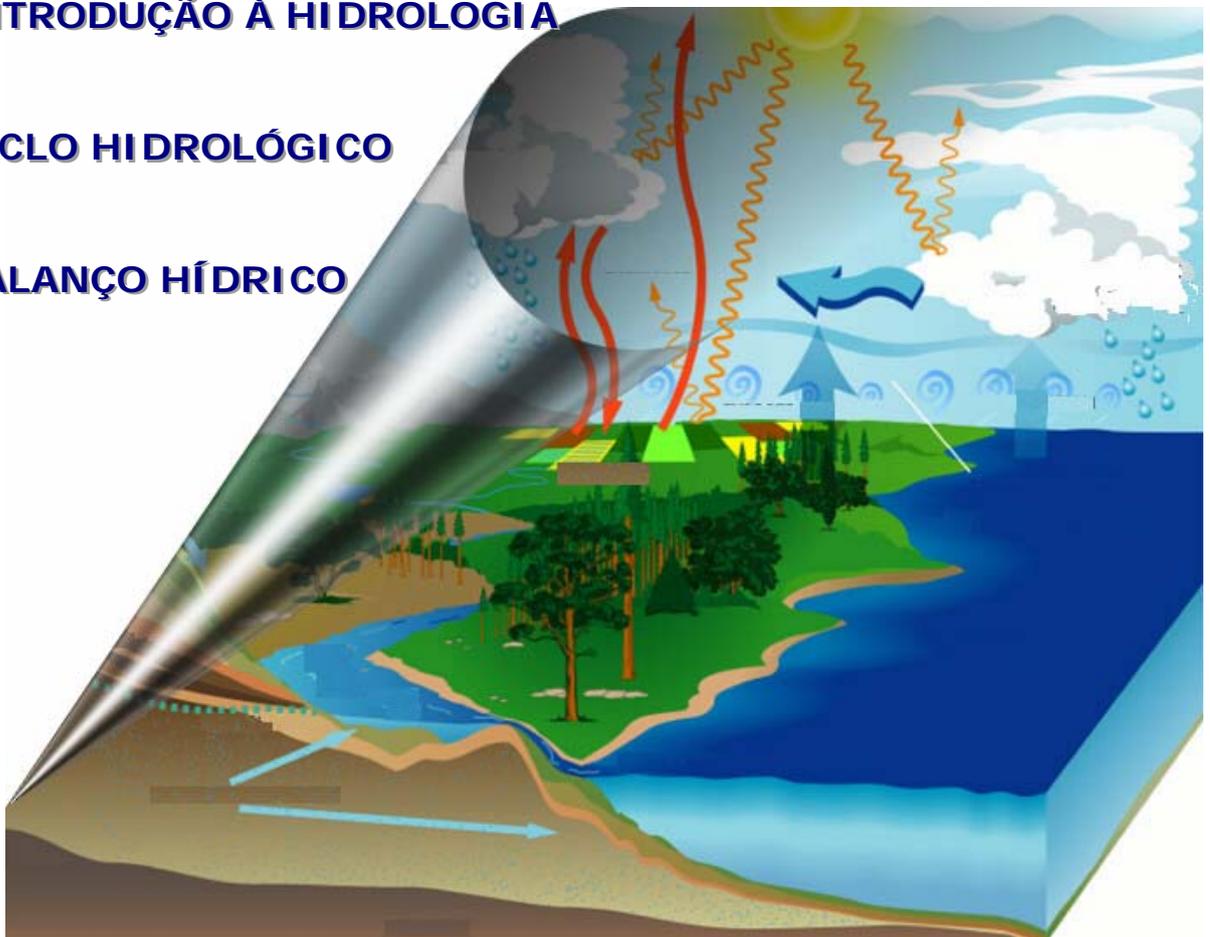
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP  
DEPTO. DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANITÁRIA

# PHD 2307 - HIDROLOGIA APLICADA

**INTRODUÇÃO À HIDROLOGIA**

**CICLO HIDROLÓGICO**

**BALANÇO HÍDRICO**



*Prof. Dr. Rubem La Laina Porto*

*Prof. Dr. Kamel Zahed Filho*

## ÍNDICE

Página

1. Introdução.....	1
2. Campo da Hidrologia.....	4
2.1. Campo de ação da engenharia de recursos hídricos.....	4
2.2. Quantidade de Água.....	5
2.3. Qualidade da água.....	7
3. O Ciclo Hidrológico.....	9
4. Resposta de uma bacia hidrográfica.....	12
5. Balanço Hídrico.....	14
5.1 Generalidades.....	14
5.2 Importância da água, de sua quantidade: Balanço Hídrico Mundial.....	14
5.3. Balanço Hídrico no Estado de São Paulo.....	17
5.4 Balanço Hídrico – Conceitos e Aplicações.....	17
6. Extensões de Séries de Vazões.....	22
6.1 Utilização de fórmulas de correlação.....	22
6.2. Utilização do Balanço Hídrico.....	24
6.3 Utilização de modelos de simulação do ciclo hidrológico.....	29
7. BIBLIOGRAFIA.....	34

## 1. Introdução:

Hidrologia é, em um sentido amplo, a ciência que se relaciona com a água. Como ela se relaciona com a ocorrência primária de água na Terra, é considerada uma ciência natural. Por razões práticas, no entanto, a hidrologia restringe-se a alguns de seus aspectos, por exemplo, ela não cobre todo o estudo sobre oceanos (oceanografia) e também não se preocupa com usos médicos da água (hidrologia médica).

O termo tem sido usado para denotar o estudo da água sobre a superfície da Terra, enquanto que outros termos como hidrografia e hidrometria têm sido usados para denotar o estudo da água na superfície. No entanto, esses termos têm agora significados específicos. Hidrologia se refere à ciência da água. Hidrografia é a ciência que descreve as características físicas e as condições da água na superfície da Terra, principalmente as massas de água para navegação.

A hidrologia não é uma ciência inteiramente pura; ela tem muitas aplicações práticas. Para enfatizar-lhe a importância prática, o termo "hidrologia aplicada" tem sido comumente usado. Como numerosas aplicações dos conhecimentos em hidrologia ocorrem também no campo das engenharias hidráulica, sanitária, agrícola, de recursos hídricos e de outros ramos da engenharia, o termo "engenharia hidrológica" tem sido também empregado.

Várias definições de hidrologia já foram propostas. O Webster's Third New International Dictionary (Merriam Webster, 1961) descreve hidrologia como sendo "a ciência que trata das propriedades, distribuição e circulação da água; especificamente, o estudo da água na superfície da Terra no solo, rochas e na atmosfera, particularmente com respeito à evaporação e precipitação. O Painel Ad Hoc em Hidrologia do Conselho

Federal para Ciência e Tecnologia E.U.A. , 1959) recomendou a seguinte definição: "hidrologia é a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físico-químicas e sua relação com o meio ambiente, incluindo sua relação com a vida. O domínio da hidrologia abraça toda a história da água na Terra."

Entre as definições que enfatizam a importância prática da hidrologia no que concerne aos recursos hídricos na Terra, Wisler e Brater oferecem a seguinte: "hidrologia é a ciência que trata dos processos que governam a depleção e recarga dos recursos hídricos nas superfícies sobre o mar. Trata do transporte de água através do ar, sobre e abaixo da superfície e através da strata da Terra. É a ciência das várias partes do Ciclo Hidrológico."

O conceito do ciclo hidrológico tornou-se tão amplamente aceito que é um pouco difícil voltar na história e acompanhar o seu desenvolvimento e demonstração. Antes da segunda metade do século XVII, pensava-se que as águas provenientes das minas (nascentes) não poderiam ser produto da precipitação em vista de dois postulados:

- a quantidade de água precipitada não era suficiente;
- a superfície da Terra era bastante impermeável, para não permitir a infiltração das águas pluviais.

Com base nesses dois postulados, alguns filósofos da época (gregos e romanos) passaram a desenvolver, engenhosas teorias, segundo as quais existiriam cavernas subterrâneas, donde surgiam as águas das fontes. Outros, reconhecendo que havia a necessidade de recarga desses reservatórios, lançaram a idéia do ciclo hidrológico, no qual a água que retornava às fontes, provinha do oceano, através de canais subterrâneos, ao invés da atmosfera. A remoção do sal era explicada por processos de filtração ou destilação. A elevação da água era consequência da vaporização e

subseqüente condensação, pressão das rochas, sucção dos ventos, vácuo produzido pela vazão das fontes, ação capilar e pela curvatura dos oceanos, que eventualmente, permitiria que a altura das águas fornecesse a carga necessária para que o líquido fluísse nas nascentes.

Esses conceitos persistiram até o fim do século XVII, porém Leonardo da Vinci (1452-1519) e Bernard Palissy (1509-89), respectivamente na Itália e França, lançaram a semente da teoria da infiltração e o conceito do ciclo hidrológico, como hoje nós o entendemos. Com Pierre Perrault (1608-80) usando um instrumental muito rude, foi feita a primeira constatação de campo do fenômeno da transformação de chuva em vazão. Com medidas de 3 anos de precipitação, ele estimou a vazão do rio Sena (França) como sendo 1/6 da precipitação.

## **2. Campo da Hidrologia**

O aproveitamento dos recursos hídricos requer concepção, planejamento, projeto, construção e operação de meios para o domínio e a utilização das águas. Embora seja, em princípio, função dos engenheiros civis, necessita dos serviços de especialistas de outros campos. Os problemas relativos aos recursos hídricos interessam a economistas, especialistas no campo das ciências políticas, geólogos, engenheiros mecânicos e eletricitas, químicos, biólogos e outros especialistas em ciências sociais e naturais. Cada projeto de aproveitamento hídrico supõe um conjunto específico de condições físicas, as quais deve ser condicionado, razão pela qual dificilmente podem ser aproveitados projetos padronizados que conduzam a soluções simples e estereotipadas. As condições específicas de cada projeto devem ser satisfeitas através da aplicação integrada dos conhecimentos fundamentais de várias disciplinas.

### **2.1. Campo de ação da engenharia de recursos hídricos**

A água deve ser dominada e ter seu uso regulado para satisfazer a uma ampla gama de propósitos. A atenuação dos danos das enchentes, drenagem de terras, disposição de esgotos e projetos de bueiros são aplicações de engenharia de recursos hídricos para o domínio das águas, a fim de que não causem danos excessivos a propriedades, não tragam inconveniências ao público, ou perda de vidas. Abastecimento de água, irrigação, aproveitamento do potencial hidrelétrico e obras hidrovíarias são exemplos do aproveitamento da água para fins úteis. A poluição prejudica a utilização da água e diminui seriamente o valor estético dos rios, portanto o controle da poluição ou a manutenção da qualidade da água passou a ser um setor importante da engenharia de

recursos hídricos. A tabela 2.1 apresenta um resumo dos problemas que podem ser encontrados no campo da engenharia de recursos hídricos.

Tabela 2.1 Campos de atuação da Hidrologia

Planejamento	Projeto	Operação
<ul style="list-style-type: none"><li>- Gerenciamento de bacias</li><li>- Inventário energético</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- navegação</li><li>- irrigação</li><li>- energia</li><li>- drenagem</li><li>- abastecimento</li><li>- controle de cheias</li><li>- poluição</li><li>- erosão</li><li>- recreação</li><li>- piscicultura</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- reservatórios</li><li>- controle de cheias</li><li>- irrigação</li><li>- navegação</li><li>- abastecimento</li><li>- previsão hidrológica</li><li>- geração de energia</li></ul>

## 2.2 Quantidade de Água

Embora com risco de excessiva simplificação, o trabalho dos engenheiros com os recursos hídricos pode ser condensado em um certo número de perguntas essenciais. Como as obras de aproveitamento dos recursos hídricos visam ao controle do uso da água, as primeiras perguntas referem-se naturalmente às quantidades de água. Quando se pensa na utilização da água, a primeira pergunta geralmente é: Que quantidade de água será necessária? Provavelmente é a resposta mais difícil de se obter com precisão, dentre as que se pode propor em um projeto, porque envolve aspectos sociais e econômicos, além dos técnicos. Com base em uma análise econômica, deve ser também tomada uma decisão a respeito da vida útil das obras a serem realizadas.

Quase todos os projetos de aproveitamento dependem da resposta à pergunta : com

quanta água pode-se contar ? Os projetos de um plano para controle de enchentes baseiam-se nos valores de pico do escoamento, ao passo que em plano que vise a utilização da água, o que importa é o volume escoado durante longos períodos de tempo. As respostas à essa pergunta são encontradas pela aplicação da Hidrologia, ou seja, o estudo da ocorrência e distribuição das águas naturais no globo terrestre.

Todos os projetos são feitos para o futuro, e o projetista não pode ter certeza quanto às exatas condições a que estarão sujeitas as obras. Como o exato comportamento dos cursos de água nos anos futuros não pode ser previsto algo precisa ser dito acerca das variações prováveis da vazão, de modo que o projeto possa ser elaborado mediante a admissão de um risco calculado. Lança-se mão, então, de métodos de estimativa de probabilidades relativas aos eventos hidrológicos. Faz-se a utilização dessas probabilidades no estudo de problemas como exemplificados na tabela 2.1. O estudo probabilístico requer como condição prévia a coleta de dados da natureza, na forma de séries históricas. A avaliação de eventos raros requer o estudo de uma função de distribuição de probabilidades que represente o fenômeno. Problemas de reservação de água em barragens requer que se tracem considerações acerca das seqüências de vazões nos cursos d'água que somente séries de dados muito extensas podem fornecer.

Poucos projetos são executados exatamente nas seções onde se fizeram medidas de vazões. Muitas obras são construídas em rios nos quais nunca se mediou vazão. Três métodos alternativos têm sido usados para calcular a vazão na ausência de registros. O primeiro método utiliza fórmulas empíricas, que transformam valores de precipitação em vazão, considerando as características hidrográficas da bacia de contribuição. Uma segunda possibilidade é analisar a série de precipitações (chuvas) e calcular as vazões através da aplicação dos modelos computacionais que simulam o comportamento hidrológico da bacia. A terceira alternativa consiste em estimar as vazões a partir de registros obtidos em postos próximos de outra bacia. As bacias devem ser muito semelhantes para se estabelecer uma correlação aceitável entre ambas.

Os sistemas de abastecimento de água, de irrigação, ou hidrelétricos que contassem somente com as águas captadas diretamente dos cursos d'água, sem nenhuma regularização, não seriam capazes de satisfazer a demanda de sus usuários durante as estiagens, sobretudo se forem intensa. Muitos rios, apesar de em certas épocas do ano terem pouca ou nenhuma água, transformam-se em correntes caudalosas durante e após chuvas intensas, constituindo-se em flagelo no tocante às atividades ao longo de suas margens. A principal função de um reservatório é a de ser um regulador ou volante, visando a regularização das vazões dos cursos d'água ou atendendo às variações de demanda dos usuários.

As diferentes técnicas para a obtenção dos parâmetros a serem utilizados para o planejamento, projeto ou operação dos sistemas de recursos hídricos podem ter seu uso feito isolada ou conjuntamente. Isso se dará, em função da quantidade de dados hidrológicos disponíveis, dos recursos de tempo e financeiro alocados, da importância da obra e dos estágio do estudo ( projeto em nível básico, técnico ou executivo).

O presente curso de hidrologia tem como objetivo discutir sucintamente os problemas apresentados anteriormente, bem como algumas técnicas aplicáveis, tendo em vista sempre o caráter didático e introdutório de um curso de graduação com duração de um semestre.

### **2.3. Qualidade da água**

Além de ser suficiente em quantidade, a água deve satisfazer certas condições quanto à qualidade. Essa é uma preocupação fundamental no aproveitamento dos recursos

hídricos. Por questões didáticas, no entanto, os problemas relativos à qualidade da água são estudados em detalhe na disciplina de Ciências do Meio Ambiente.

### 3. O Ciclo Hidrológico

A água ocorre em vários lugares e em várias fases, na superfície, dentro e sobre a Terra. A transformação de uma fase em outra e o movimento de um a outro local constitui o **ciclo hidrológico**. Este é um sistema fechado, ou seja, sem começo e fim, podendo o mesmo ser representado como na figura 3.1.

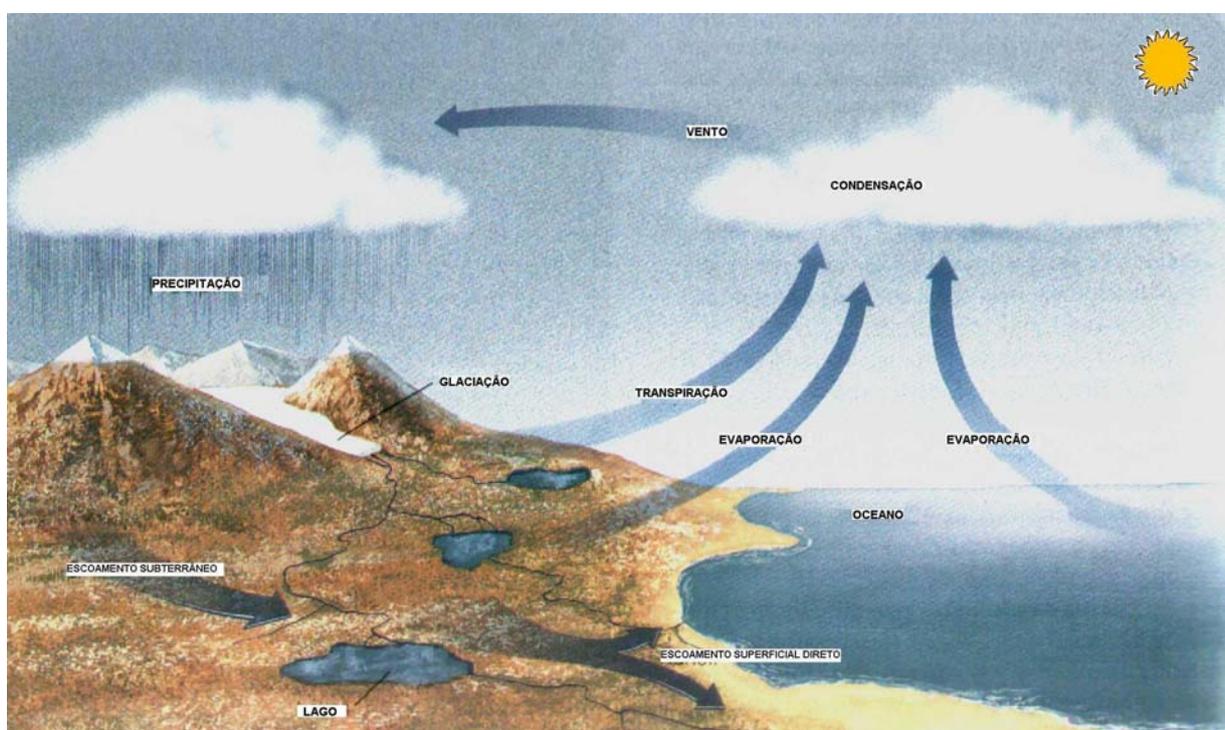


Figura 3.1. Visão pictórica do ciclo hidrológico

A umidade atmosférica volta à superfície da Terra na forma de **chuva, granizo, neve ou orvalho**. Uma parte dela será retida nas construções, árvores, arbustos e plantas. Essa água nunca alcança o solo, e a quantidade assim retida é chamada de perda por **interceptação**. A água que chega até o solo pode formar vários cursos; alguns **evaporarão** e voltarão para a atmosfera; outros **infiltrar-se-ão** na terra. Se a

intensidade de chuva supera a porção de infiltração e evaporação formar-se-á um charco. A água retida em um pântano é dita como **armazenagem em depressão**.

Como os charcos enchem e transbordam, a água começa a se mover através da superfície e é chamada de **chuva excedente**. Entretanto, o escoamento superficial não pode ocorrer até que se forme uma lâmina d'água que cubra a trajetória do movimento. A água contida nessa trajetória é chamada de **armazenamento de detenção**. Uma parte do escoamento pode infiltrar no solo ou evaporar retornando à atmosfera antes de alcançar o rio.

A água que infiltra no solo entra primeiramente na zona do solo que contém as raízes das plantas. Essa água pode retornar para a atmosfera através da evaporação, a partir da superfície do solo ou transpiração das plantas. Essa parte superior do solo pode reter uma quantidade limitada de água, essa quantidade é conhecida como **capacidade de campo**. Se mais água for adicionada à zona quando ela estiver na capacidade de campo, a água passa para uma zona mais baixa ( zona de saturação ou zona de escoamento subterrâneo). A água deixa a zona da água subterrânea pela ação da capilaridade dentro da zona da raiz, ou pela infiltração nas correntes. Poços são perfurados na zona de água subterrânea para a extração da água aí retida.

A figura 3.1 mostra um esquema do ciclo hidrológico, mas isso não é idealizado suficientemente para a análise quantitativa requerida em engenharia, com vistas a determinação de parâmetros de projeto. Para tanto, um sistema de tubos e reservatórios ( um modelo conceitual ) está representando o ciclo hidrológico na figura 3.2.. A descrição da figura 3.1. se aplica da mesma maneira à figura 3.2. Essa figura, entretanto, presta-se melhor ao entendimento do desenvolvimento de um modelo matemático.

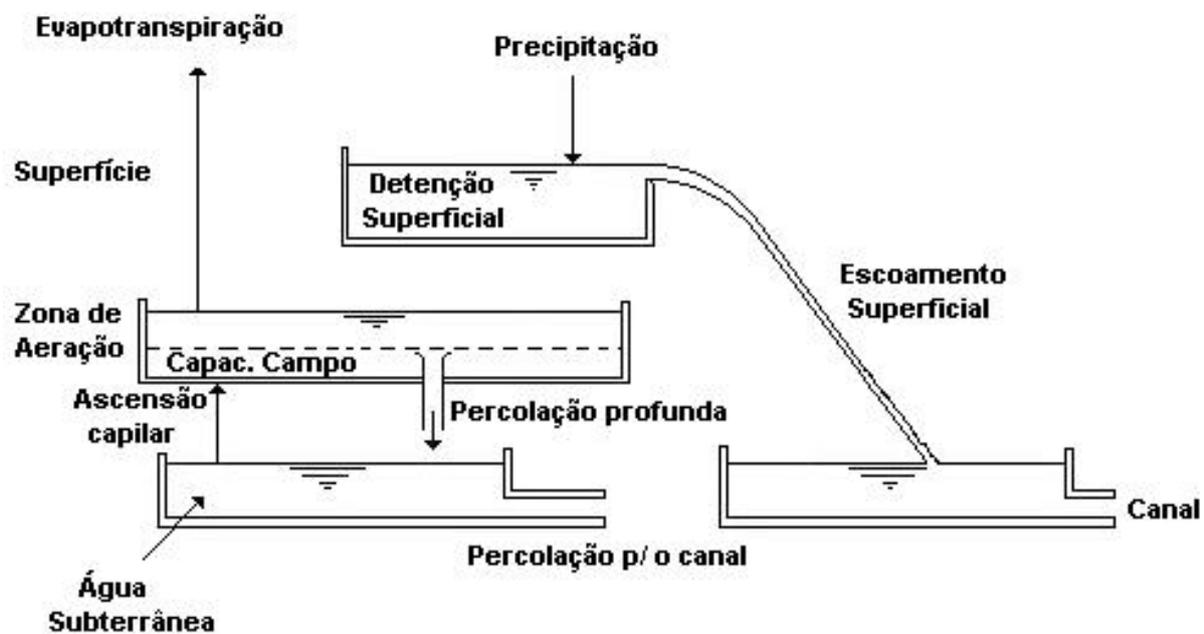


Figura 3.2. Ciclo hidrológico representado como uma seqüência de armazenamentos

#### 4. Resposta de uma bacia hidrográfica

O estudo do ciclo hidrológico nos mostra que a água que passa por uma seção qualquer de um curso de água tem sua origem na água precipitada. Denomina-se **bacia hidrográfica** à área de drenagem a montante de uma determinada seção no curso de água da qual aquela água é tributária. Essa área é limitada por um divisor de águas que a separa das bacias adjacentes e que pode ser determinado nas cartas topográficas. As águas superficiais, originárias de qualquer ponto da área delimitada pelo divisor, saem da bacia passando pela seção definida e a água que precipita fora da área da bacia não contribui para o escoamento na seção considerada.

A maneira pela qual se dão as variações de vazão em uma seção em relação à chuva precipitada é denominada **resposta de uma bacia**. Uma bacia responderá diferentemente à tempestades de intensidade e duração diferentes, assim como com chuvas idênticas, se a condição antecedente variar. Pode-se observar o comportamento da bacia em relação a uma chuva específica, analisando o hidrograma no período, ou seja, o gráfico da vazão versus o tempo. A figura 4.1 mostra um exemplo de um hidrograma típico de cheia.

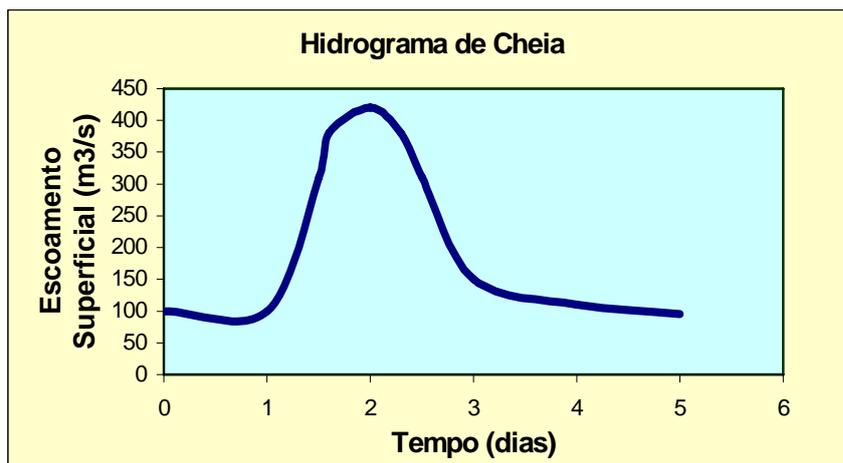


Figura 4.1 Hidrograma de Cheia

Ele representa a variação da vazão em uma seção de um curso d'água para um evento isolado de chuva. Note-se que geralmente pode-se traçar o hidrograma de uma bacia mesmo para nenhuma precipitação, devido à perenidade dos rios. Esta perenidade é causada pelo abastecimento de água feito a partir do escoamento subterrâneo (deflúvio básico), onde o nível do rio está abaixo da superfície freática. Portanto, o pico do hidrograma de cheia será mais acentuado quanto maior for a contribuição do escoamento superficial direto, resultante da chuva em relação ao deflúvio básico. Isto se dará para solos com pouca capacidade de infiltração, para bacias com declividade acentuada, com influência de sua forma e do tipo de vegetação e também da distribuição espacial da chuva na bacia. É interessante observar que a forma de um hidrograma vai depender tanto das características físicas da bacia como também das características da precipitação. Os estudos baseados na análise do hidrograma compreendem um dos métodos conceituais usados na determinação de parâmetros de projeto, na transformação da chuva em vazão.

## **5. Balanço Hídrico**

### **5.1 Generalidades**

Quando se consideram as condições disponíveis no meio ambiente, torna-se evidente que a humanidade, a civilização e a tecnologia estão sendo rapidamente ameaçadas em seus limites de desenvolvimento. Os limites resultam das reservas naturais de matérias-primas, produção de alimentos e energia e o suprimento de água potável. Em um planejamento sistemático para o futuro, o suprimento e a demanda de água devem ser consideradas conjuntamente de forma a se equilibrar esse balanço, com a ajuda da qual será possível o desenvolvimento do homem e do mundo.

### **5.2 Importância da água, de sua quantidade: Balanço Hídrico Mundial**

Um dos recursos mais importantes da Terra é a água. Ela ocorre em três estados da matéria: na forma sólida, como o gelo; na forma líquida, como a água; na forma gasosa, como o vapor.

A água tem uma função crítica em quase todas as esferas da vida. Sua importância pode ser ilustrada por meio de alguns exemplos:

- ❖ A água é um elemento construtivo na fotossíntese das plantas e é um constituinte dos organismos;
- ❖ A água é um solvente para os nutrientes do solo;

- ❖ A água é de necessidade vital: o ar seco extrai de 1 a 2 kg de água diariamente do corpo humano;
- ❖ A água é um condutor de energia (utilizada na geração de energia, causadora de danos por enchentes);
- ❖ A água é um meio de transporte (águas residuárias, canais de drenagem, navegação);
- ❖ A água é o mais importante regularizador de energia no balanço energético da Terra; sem a evaporação, a vida na Terra na sua forma atual seria impossível;

Nas zonas úmidas da Terra há um superávit de água, sendo que seu valor foi subestimado por muito tempo. As zonas áridas da Terra, onde há sempre (ou por longos períodos no ano) escassez de água, esta é considerada por seus habitantes como uma preciosidade.

A tabela 5.1 apresenta uma estimativa feita por N. Meinardus (1928) e H. Hoinkes (1968) da quantidade de água disponível no planeta Terra. O volume total da água como uma fração do volume da Terra ( $1,082 \times 10^{12} \text{ km}^3$ ) é de cerca de 1: 777,2 ou 0,00129.

Uma parte da reserva de água está em circulação contínua e compõe uma transferência, pois evapora das superfícies líquidas e do solo e após a condensação na atmosfera é depositada novamente nas superfícies como precipitação líquida ou sólida. Pela precipitação, a evaporação e o escoamento superficial são sempre repostos como água potável. O vapor de água em circulação na atmosfera formaria com sua completa condensação e precipitação uma camada de água de somente 2 a 3 cm de profundidade na superfície da Terra. Comparando-se com a média de precipitação anual na Terra (97cm), deduz-se que a vida média de uma molécula de água na atmosfera é de cerca de 10 dias.

Tabela 5.1 Volumes de água na Terra

<b>Fonte</b>	<b>Volume (km<sup>3</sup>)</b>	<b>Porcentagem(%)</b>
Oceanos	1.348.000.000	97,39
Gelo polar, geleiras, icebergs	227.000.000	2,01
Água subterrânea, umidade do solo	8.062.000	0,58
Lagos e rios	225.000	0,02
Atmosfera	13.000	0,001
<b>Soma</b>	<b>1.384.120.000</b>	<b>100,00</b>
<b>Água potável</b>	<b>36.020.000</b>	<b>2,60</b>

Tabela 5.2 Água potável como porcentagem do seu total

<b>Fonte</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
Capa de gelo polar, icebergs, geleiras	77,23
Água subterrânea (até 800m de profundidade)	9,86
Água subterrânea (800 a 4000m)	12,35
Umidade do solo	0,17
Lagos (água potável)	0,35
Rios	0,003
Minerais hidratados	0,001
Plantas, animais, seres humanos	0,003
Atmosfera	0,04
<b>Soma</b>	<b>100,00</b>

A água disponível para uso na superfície da terra, da qual a humanidade, a economia e a indústria dependem, constitui apenas uma fração da água total da terra e é renovada pelo ciclo hidrológico.

### 5.3. Balanço Hídrico no Estado de São Paulo

Em termos gerais o Estado de São Paulo dispõe de aproximadamente 100 bilhões de m<sup>3</sup>/ano, dos quais estima-se que 55 bilhões de m<sup>3</sup>/ano são devidos aos escoamentos de superfície e de subsuperfície e os restantes 45 bilhões de m<sup>3</sup>/ano ao escoamento básico, este representando grande importância como regularizador das vazões dos rios. A tabela 5.3. apresenta os resultados do balanço hídrico estadual, sendo que as unidades estão em mm/ano e l/sxkm<sup>2</sup>.

Tabela 5.3. Balanço hídrico no Estado de São Paulo

<b>Resultados</b>	<b>mm/ano</b>	<b>L/s x km<sup>2</sup></b>
Escoamento de superfície	220	7,0
Escoamento básico	180	5,7
Evapotranspiração real	980	31,1
Escoamento total	400	12,7
Precipitação média	1380	43,8

### 5.4 Balanço Hídrico – Conceitos e Aplicações

Devido ao fato de que a quantidade total de água disponível na Terra é finita e indestrutível, podemos encarar o ciclo hidrológico global como sendo um sistema

fechado. Um balanço hídrico pode ser desenvolvido para explicar os componentes hidrológicos.

De modo ilustrativo pode-se imaginar um sistema simples e altamente restrito como o da figura 5.1.

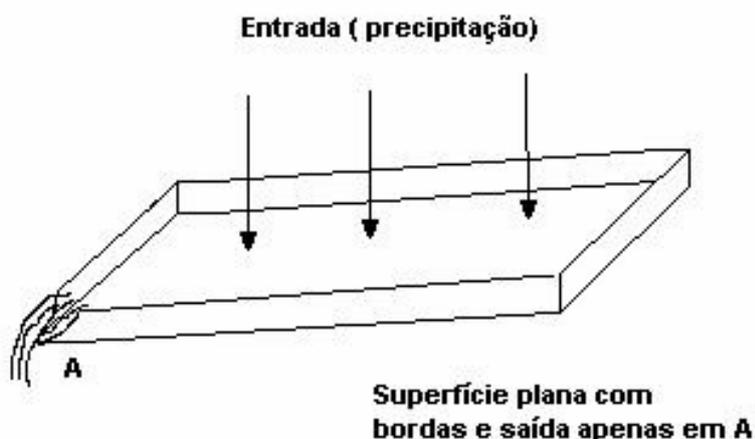


Figura 5.1. Modelo simplificado de um sistema hidrológico

Considere uma superfície plana inclinada e completamente impermeável ( a água não pode passar através da superfície), confinada pelos quatro lados e com uma saída no canto A. Desde que a superfície seja assumida como sendo completamente plana, não haverá depressões nas quais a água poderá se armazenar. Se uma chuva for aplicada a este sistema hidrológico simplificado, surgirá em A uma vazão de saída, denominada escoamento superficial direto. Pode-se representar o balanço hídrico para este sistema pela seguinte equação:

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

onde:

$I$  é a vazão de entrada;

$Q$  é a vazão de saída;

$dS/dt$  é a variação no armazenamento do sistema por unidade de tempo.

A vazão de saída não pode ocorrer até que se acumule água a uma profundidade mínima para fornecer carga necessária ao escoamento, mas devido à intensidade da chuva, a profundidade da água retida (retenção superficial) aumenta. Com o cessar da precipitação, a água retida na superfície se transforma em vazão de saída do sistema. No exemplo citado, toda a entrada se transforma em saída, negligenciando-se a pequena quantidade de água retida eletricamente na superfície e também qualquer evaporação ocorrida durante o período (uma suposição razoável para o sistema descrito). Esta ilustração elementar deve sugerir que qualquer sistema hidrológico pode ser descrito por um balanço hídrico para se poder explicar a disposição das entradas de água no sistema e a variação no armazenamento. A simplicidade do balanço hídrico é no entanto freqüentemente enganosa, pois como será visto adiante, os termos da equação não podem ser quantificados facilmente ou adequadamente.

Uma versão mais generalizada do balanço hídrico poderá explicar os vários componentes de um ciclo hidrológico e fornecer a visão de técnicas de resolução de problemas em regiões hidrológicas complexas. Tais regiões podem estar definidas pela topologia, limitadas politicamente ou especificadas arbitrariamente. Uma bacia é uma área definida topograficamente, drenada por um rio ou sistema de rios tal que toda a vazão é descarregada em uma única saída. Os estudos de recursos hídricos eram conduzidos no passado em bacias, pois estas áreas simplificam a aplicação do balanço hídrico. Teoricamente, um balanço é possível para qualquer tipo de região, embora a possibilidade de dados e o grau de refinamento dos métodos analíticos determina a aplicabilidade daquele em um senso prático.

O balanço hídrico de uma área unitária da superfície da Terra é formado pelos seguintes componentes:

P = precipitação;

E = evaporação;

Q = descarga, escoamento;

R = reserva, armazenamento;

U = uso, consumo;

A equação da continuidade se apresenta na seguinte forma:

$$\mathbf{P = E + D + R + U} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

onde:

D pode significar o escoamento superficial ou subterrâneo;

R é o armazenamento temporário de água no solo;

U é a água utilizada física ou quimicamente.

Em uma média de longo período pode-se admitir que R e U sejam constantes, de forma que as flutuações dessas quantidades tornam-se insignificantes no balanço hídrico, que pode ser simplificado para:

$$\mathbf{P = E + Q} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

a dificuldade em se resolver problemas práticos repousa principalmente na inabilidade em se medir ou estimar adequadamente os vários termos da equação do balanço hídrico. Para estudos locais, são feitas freqüentemente medidas seguras, mas a avaliação em uma escala global é usualmente grosseira. A precipitação é avaliada por medidores dispostos em uma área. O escoamento superficial pode ser medido de

várias formas, tais como medidores em barragens, medidores de velocidade de fluxo, etc.. Em boas condições, estas medições são freqüentemente 95% precisas, mas grandes vazões não podem ser medidas pelos métodos tradicionais. A umidade do solo pode ser determinada usando-se provas de nêutrons e métodos gravimétricos; a infiltração determinada localmente por infiltrômetros ou estimada através dos dados de chuva-escoamento. Contudo as estimativas de umidade do solo e infiltração são geralmente muito pobres. Também a determinação da quantidade de água evaporada e transpirada é extremamente difícil no atual estágio de desenvolvimento da ciência. A equação do balanço hídrico é um instrumento extremamente útil e que pode ser usado de várias maneiras para estimar a magnitude e distribuição no tempo das variáveis hidrológicas.

## **6. Extensões de Séries de Vazões**

Já foi dito que o estabelecimento da vazão de projeto em um rio é realizado através do estudo probabilístico de dados de vazões levantados previamente, em quantidade e qualidade suficiente, para que se possam fazer as inferências necessárias a um nível de precisão compatível com a responsabilidade do empreendimento. Esses estudos requerem a realização de uma série de observações de vazões por um período de tempo muito longo.

Poucos rios dispõem de séries de vazões observadas cumprindo esse requisito. De fato, muitos dos empreendimentos são realizados em locais onde nunca se mediram vazões. Mesmo quando existem dados de vazões, pode haver períodos na série em que os dados se apresentam sabidamente incorretos, ou mesmo inexistentes. Há a necessidade então de se estudar técnicas que permitem conhecer o comportamento das vazões na seção de interesse, ao longo dos anos.

### **6.1 Utilização de fórmulas de correlação**

Um caso importante é quando se conhecem vazões em um ponto próximo ao estudado. Este ponto define uma outra bacia que deve ser muito semelhante à primeira para que se estabeleça uma correlação aceitável entre ambas. As bacias devem ter semelhança geométrica quanto à área, forma, declividade e relevo, semelhança hidrológica quanto à precipitação, natureza do solo, armazenamento nos leitos fluviais e semelhança geológica em relação aos fatores que influenciam o escoamento subterrâneo.

A evaporação média anual de uma bacia para um período de longa duração varia relativamente pouco. Em climas temperados oscila entre 400 e 600 mm, dependendo da temperatura média, latitude, das precipitações e do grau de continentalidade do clima. A relativa constância da evaporação média anual, resulta da interação de numerosas variáveis que a condiciona e da dupla limitação, de um lado pelo **poder de evaporar** da atmosfera e de outro, pela quantidade de água disponível, **altura de precipitação**.

A constância da evaporação média anual para zonas relativamente homogêneas, levou ao estabelecimento de fórmulas empíricas, relacionando-a com elementos meteorológicos de mais fácil determinação. Os mais importantes e os mais facilmente acessíveis são:

- ❖ A temperatura média anual  $T$  do ar, que caracteriza na falta de elementos melhores, o **poder de evaporar** da atmosfera;
- ❖ A precipitação  $P$  que representa bem ou mal a disponibilidade da água do solo e seu estado de saturação.

#### **Fórmulas de evaporação média em função da precipitação e da temperatura:**

- **Fórmula de M. Coutagne**

A evaporação média anual (em metros) se deduz da altura média anual da precipitação  $P$  (em metros), e da temperatura anual  $T$  (em graus Celsius) pela fórmula:

$$E_m = P - cP^2 \quad (\text{Eq. 6.1})$$

$$c = \frac{1}{(0,8 + 0,14T)} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

Esta fórmula não se aplica para P compreendido entre (1/8c) e (1/2c).

- ❖ Se as precipitações forem inferiores a (1/8c), a evaporação média é igual à precipitação e não ocorre escoamento;
- ❖ Se elas são superiores a (1/2c), a evaporação média é praticamente independente de P.

- **Fórmula de M. Turc**

M. Turc adaptou às famílias de curvas  $E_m=f(P,T)$ , em mm, obtidas a partir de observações feitas sobre 254 bacias situadas em todos os climas do planeta, a expressão:

$$E_m = \frac{P}{(0,9 + P^2 / L^2)} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

O parâmetro L é dado pela expressão:

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3 \quad (\text{Eq. 6.4})$$

## 6.2. Utilização do Balanço Hídrico

A equação do balanço hídrico é uma ferramenta alternativa que o hidrólogo dispõe para a obtenção de dados de vazão. A tabela 6.1 mostra dados de 15 anos de vazão e

precipitação médias anuais medidos na represa de Guarapiranga (SP). Os dados de vazão foram transformados de metros cúbicos (m<sup>3</sup>) para milímetros (mm) de precipitação. Isto se consegue facilmente dividindo-se o valor da vazão pela área da bacia e multiplicando-se pelo número de segundos de um ano.

Tabela 6.1. Valores de precipitação e evaporação médias anuais da bacia do Guarapiranga

<b>Bacia do Guarapiranga: Área = 630 km<sup>2</sup></b>							
<b>(I)</b>	<b>(II)</b>	<b>(III)</b>	<b>(IV)</b>	<b>(V)</b>	<b>(VI)</b>	<b>(VII)</b>	<b>(VIII)</b>
<b>ano</b>	<b>Q</b>	<b>Q</b>	<b>P</b>	<b>R</b>	<b>ΣP</b>	<b>ΣQ</b>	<b>ΣR</b>
	(m <sup>3</sup> /s)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1914	8,8	441	1429	130	1429	441	130
1915	7,2	360	1218	0	2647	801	130
1916	8,1	405	1266	3	3913	1206	133
1917	10,3	516	1323	-51	5236	1722	82
1918	9,9	496	1222	-132	6458	2218	-50
1919	10,9	546	1330	-74	7788	2764	-124
1920	10,7	536	1529	135	9317	3300	11
1921	10,3	516	1212	-162	10529	3816	-151
1922	12,1	606	1498	34	12027	4422	-117
1923	15,7	786	1758	114	13785	5208	-3
<b>Soma</b>		5208	13785				

Pode-se determinar a evaporação média anual através da equação do balanço hídrico, colocada em termos de somatória:

$$\Sigma P = \Sigma Q + \Sigma E + \Sigma R \cong \Sigma Q + \Sigma E \quad (\text{Eq. 6.5})$$

Nota-se que o último termo da equação, que representa a soma das quantidades acumuladas a cada ano, tende a se anular com o aumento dos termos da somatória, pois o nível médio das águas subterrâneas permanece constante. Então:

$$E_m = \Sigma E / T = (\Sigma P - \Sigma Q) / T \quad (\text{Eq. 6.6})$$

Para o período de 10 anos observados tem-se:

$$E_m = (13785 - 5208) / 10 = 858 \text{ mm / ano} \quad (\text{Eq. 6.7})$$

Na figura 6.1, pode-se observar a variação da precipitação e da vazão ao longo do tempo. Ela mostra que as maiores vazões nem sempre coincidem com as maiores precipitações. Isso ocorre devido à recarga e à evaporação variáveis ao longo de cada ano. Pode-se dizer então que as variáveis chuva e precipitação não são diretamente proporcionais (não se correlacionam linearmente), devendo-se considerar também a influência das variáveis evaporação e recarga, como faz a equação do balanço hídrico.

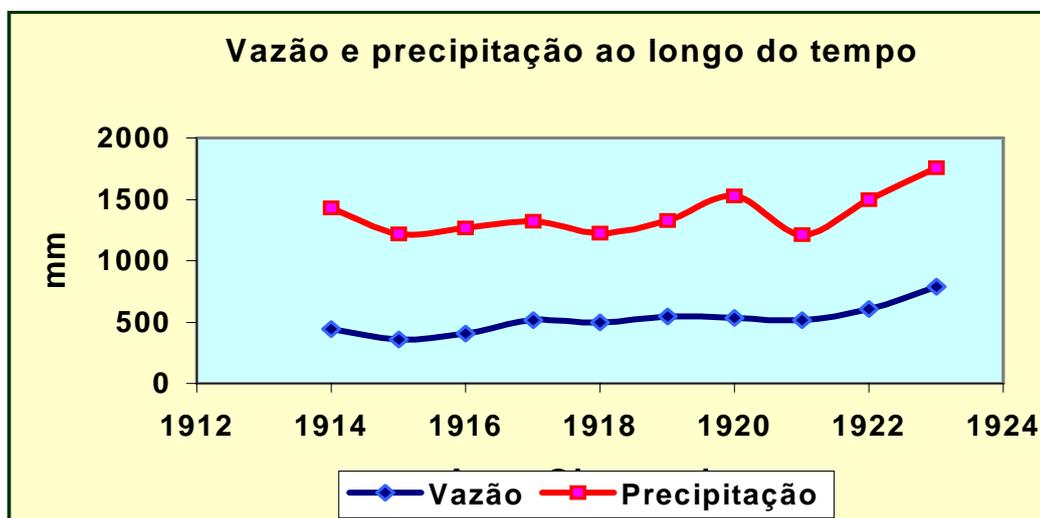


Figura 6.1 Gráfico de vazão e precipitação ao longo do tempo

Considerando-se que a evaporação anual seja aproximadamente constante e igual à evaporação média, estima-se os valores da recarga:

$$P = E + Q + R \quad (\text{Eq. 6.8})$$

$$R = P - Q - E \quad (\text{Eq. 6.9})$$

$$R = P - Q - E_m \quad (\text{Eq. 6.10})$$

A coluna (V) da tabela 6.1 do exemplo foi calculada utilizando-se a equação 6.10.

A figura 6.2 mostra um gráfico relacionando vazões e precipitações acumuladas. Nota-se uma correlação linear entre as variáveis acumuladas, como sugere a equação 6.5 se considerar que o acréscimo na evaporação a cada ano se dê aproximadamente como se fosse acréscimos constantes de evaporação média. De fato, pela análise de regressão obtém-se:

$$Q = 0,3879P - 247 \quad (\text{Eq. 6.11})$$
$$r^2 = 0,999$$

Usando agora os dados de precipitação para o período seguinte, pode-se obter as respectivas vazões acumuladas através da equação 6.11 e, por diferença, os valores das vazões anuais. A tabela 6.2 mostra isso para os 5 anos seguintes à série, comparando-se com os valores observados no período.

Tabela 6.2 Valores de vazão calculados e observados

(I) Ano	(II) precipitação (mm)	(III) $\Sigma P$ (mm)	(IV) $\Sigma Q$ (mm)	(V) Vazão obtida (mm)	(VI) Vazão real (mm)
1924	1029	14814	5499	291	417
1925	1452	16266	6063	564	462
1926	1784	18050	6755	692	548
1927	1735	19785	7428	673	695
1928	1502	21287	8010	582	643

Vale observar ainda que 1 mm de precipitação significa uma unidade de volume que equivale para esta bacia ( área = 630 km<sup>2</sup>) e  $V = 0,001.630.106 = 0,63$  milhões de m<sup>3</sup>.

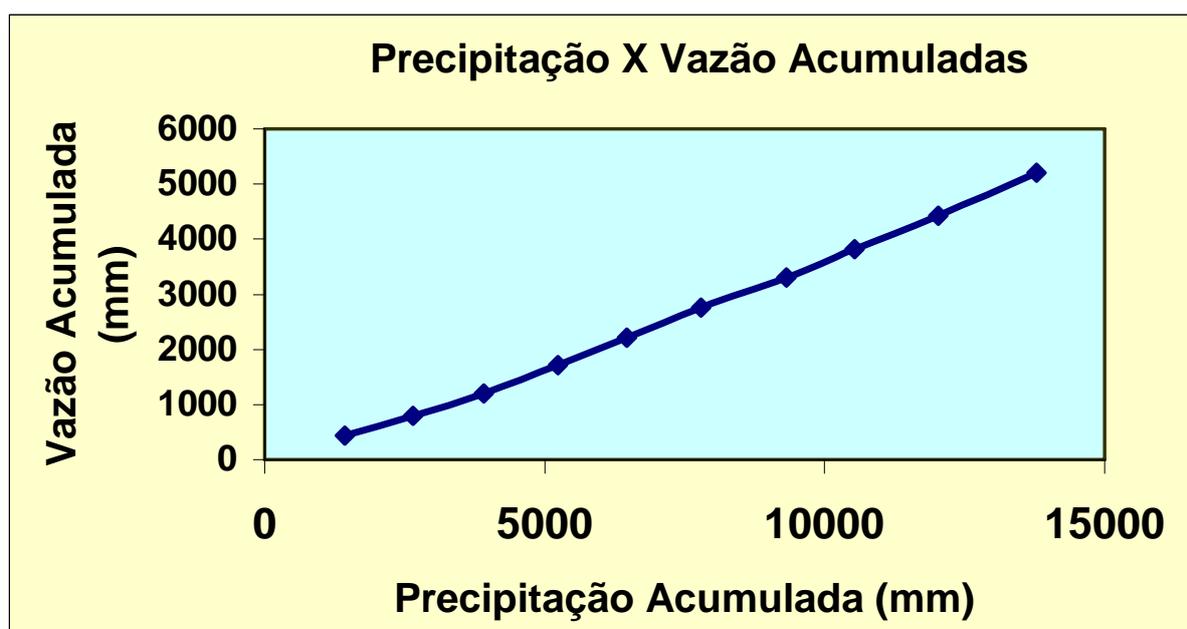


Figura 6.2 gráfico de precipitação X vazão acumuladas

### 6.3 Utilização de modelos de simulação do ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é muito bem conhecido do ponto de vista qualitativo. A evolução deste conhecimento qualitativo em técnicas que permitam a obtenção de resultados quantitativos constituiu-se sempre em penoso caminho que os hidrólogos vêm percorrendo há muito tempo.

A estocasticidade dos fenômenos hidrológicos, as complexas inter-relações entre os componentes do ciclo hidrológico, a diversidade de fatores reguladores do processo, a interdependência entre parâmetros e suas variações ao longo do tempo, acrescidas dos erros que sempre acompanham os dados, fazem com que a hidrologia talvez nunca possa ser tratada como uma ciência exata.

Um processo de simulação impõe-se naturalmente quando se deseja atribuir números a fenômenos hidrológicos. Na realidade, quase todas as técnicas hidrológicas tradicionais são modelos de simulação simples, limitados em geral pelas dificuldades de computação.

Os computadores digitais permitiram o emprego de um novo método no campo da hidrologia, conhecido como simulação por computador. Devido à grande velocidade de cálculo dos computadores atuais é possível programar todo o ciclo do escoamento e obter um fluxo contínuo de vazões por meio de incrementos elementares de tempo. É necessário estabelecer relações representando cada fase do ciclo, desde a precipitação medida até a vazão final procurada, e definir os parâmetros para essas relações.

Um modelo do tipo chuva-vazão, ou seja, um modelo que reproduz hidrogramas a partir de precipitações, admite como variáveis, dados de chuva e vazão. Aos parâmetros são atribuídos valores numéricos que na medida do possível devem traduzir as

características físicas da bacia. O resultado final do modelo será uma série de vazões, que poderão ser confrontadas com os valores observados em uma estação hidrométrica.

Diz-se que o modelo simula adequadamente o comportamento de uma bacia hidrográfica quando as diferenças entre as vazões calculadas e as vazões realmente observadas ficam contidas em certa faixa de erro aceitável.

Os valores numéricos dos parâmetros podem ser estimados de várias formas, quer seja por intermédio de fórmulas empíricas ou ainda através de processos de ajuste dos valores de vazão calculados aos observados. Este ajuste é feito, em geral, por processos de tentativa e erro ou pela aplicação de processos matemáticos de minimização de uma função objetivo que mede a discrepância entre os valores calculados e observados.

Os modelos de simulação do ciclo hidrológico tratam em última análise da quantificação do ciclo hidrológico no seu todo ou em partes. Caracteriza-se como ciclo hidrológico a ocorrência de água na natureza, suas transformações de estado e suas relações com o meio natural.

De acordo com os objetivos específicos de cada trabalho poderá ser dada maior ou menor ênfase a certos aspectos do ciclo hidrológico, o que poderá acarretar um número bastante grande de decomposições e esquemas representativos.

Foi julgada elucidativa a reprodução de um esquema do ciclo hidrológico (figura 6.3), face à adequação de sua concepção ao tratamento por modelos matemáticos. Na figura 6.3, os significados dos símbolos são os seguintes:

P = precipitação;

E = evaporação;

- F = infiltração;
- U = volume de água interceptado pela vegetação;
- $U^*$  = volume máximo possível a ser retido pela vegetação. Admite-se que quando  $U = U^*$ , a água passa a níveis inferiores;
- R = volume de água retido no solo;
- $R^*$  = capacidade máxima de armazenamento da superfície do solo. Admite-se que quando  $R = R^*$ , inicie-se o escoamento superficial direto;
- H = volume de água imediatamente abaixo da superfície do solo onde se processa o escoamento subsuperficial;
- M = volume de água contido na região do solo sujeita aos efeitos da capilaridade (zona areada);
- $M^*$  = capacidade máxima de retenção da água na zona areada;
- G = volume de água contida no aquífero subterrâneo;
- $G^*$  = capacidade máxima do aquífero subterrâneo;
- S = armazenamento natural em rios e áreas inundadas;
- Q1 = escoamento superficial direto;
- Q2 = escoamento subsuperficial;
- Qs = escoamento superficial na seção de medição X (já considerado o efeito de atenuação devido a S);
- Qb = vazão básica;
- C = eventual ascensão de água do reservatório G para a zona areada;
- D = infiltração de água da zona areada para o reservatório G que se admite ocorrer quando  $M \geq M^*$ .

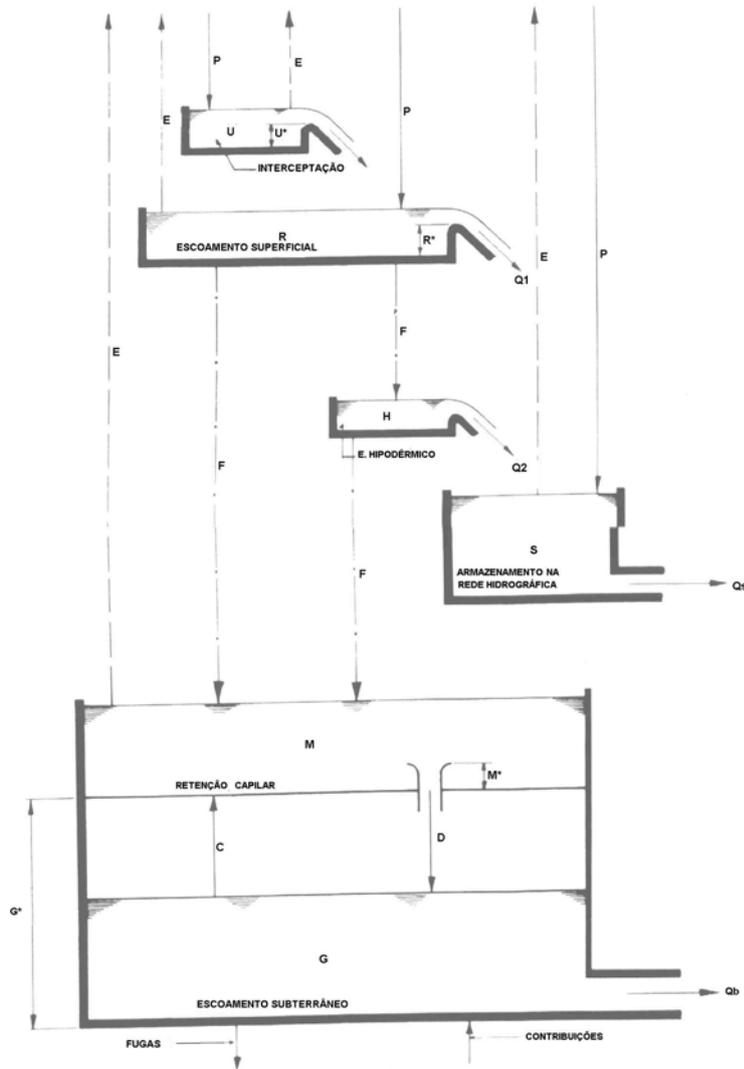


Figura 6.3 Representação esquemática do ciclo hidrológico

A figura 6.3 enfatiza a ocorrência de uma série de armazenamentos a que a água está sujeita durante seu processo cíclico.

A maneira de ver o ciclo hidrológico como uma seqüência de níveis de armazenamentos, constitui na realidade um processo largamente utilizado por alguns

tipos de modelos. Em um modelo de simulação digital o ciclo hidrológico é representado por um conjunto de expressões matemáticas compostas de parâmetros e variáveis. Esta representação deve permitir a possibilidade de ajustar os resultados calculados aos dados observados, mediante modificações de parâmetros, a fim de que a representação matemática possa ser melhorada em termos da precisão com que reproduz a realidade física. Portanto, é imprescindível estimar os valores numéricos dos parâmetros, quer através de dados e observações de campo, quer por intermédio de fórmulas empíricas. Dá-se a isso o nome de **calibração do modelo**. O procedimento usual para isso é o seguinte:

- ❖ Escolhe-se um modelo que melhor se adapte às condições locais e aos objetivos do estudo;
- ❖ Seleciona-se uma série de observações simultâneas de chuva e vazão;
- ❖ Esta série de valores é dividida em dois períodos, que chamaremos de 1 e 2;
- ❖ Admite-se valores iniciais para os parâmetros a partir das observações de campo, fórmulas empíricas ou conhecimentos oriundos da experiência;
- ❖ Simula-se uma série de vazões a partir dos dados de chuva do período 1;
- ❖ Comparam-se os valores obtidos através da simulação com os valores de vazão observados no período 1;
- ❖ Alteram-se os parâmetros de modo a minimizar as diferenças entre os hidrogramas calculado e observado;
- ❖ Com os parâmetros calculados no passo anterior, simula-se uma nova série de vazões, agora com os dados do período 2;
- ❖ Comparam-se as vazões assim calculadas com as observadas no período 2.

Se o ajuste dos valores comparados nesse último passo forem considerados satisfatórios, diz-se que o modelo está calibrado.

Este texto foi originalmente preparado por Luiz Fernando e Silva, em 1986, sob orientação dos professores Rubem La Laina Porto e Kamel Zahed Filho.

## **7. BIBLIOGRAFIA:**

**Chow, V. T.** Handbook of Applied Hydrology.

**Wisler, O. C.; Brater, E. F.** Hidrologia.

**Braga, B.P.F.; Conejo, J.G.L.** Balanço Hídrico no Estado de São Paulo.

**Hjelmfelt, A. T.** Hydrology for Engineers and Planners.

**Ward, R. C.** Principles of Hydrology.

**Baumgartner, A.** The World Water Balance, 1975.

Boletins Técnicos DAEE.