

# HIDROLOGIA BÁSICA

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>03</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>03</b>
<b>1. CICLO HIDROLÓGICO.....</b>	<b>04</b>
1.1 Introdução à hidrologia.....	04
1.1.1 História da hidrologia.....	05
1.1.2 Aplicação da Hidrologia .....	07
1.2 Ciclo hidrológico.....	09
1.3 Bacia hidrográfica.....	11
1.3.1 Área de drenagem1.....	14
1.3.2 Ordem da Bacia.....	15
1.3.3 Tempo de concentração.....	17
1.4 Precipitação.....	18
1.4.1 Tipos de precipitação.....	20
1.5 Interceptação.....	23
1.6 Infiltração.....	26
1.6.1 Grandezas características.....	27
1.6.2 Fatores intervenientes.....	28
1.6.3 Determinação da capacidade de infiltração.....	29
1.7 Evaporação.....	30
1.8 Escoamento superficial e regime dos cursos d'água.....	36
1.8.1 Escoamento superficial.....	36
1.8.2 Regime dos cursos d'água.....	45
1.9 Transporte de sedimentos.....	47
1.9.1 Ciclo hidrossedimentológico.....	48
1.10 Balanço hídrico.....	51

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Ciclo Hidrológico

Figura 2 – Bacia Hidrográfica

Figura 3 – Divisor de águas

Figura 4 – Regiões Hidrográficas do Brasil

Figura 5 – Precipitações ciclônicas

Figura 6 – Precipitações orográficas

Figura 7 – Precipitações convectivas

Figura 8 - Ietograma e hidrógrada de uma chuva isolada

Figura 9 – Hidrograma de saída

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Equações empíricas baseadas na expressão aerodinâmica

Tabela 2 - Valores do coeficiente de deflúvio,  $C$ .

Tabela 3 – Variáveis de entrada e saída de água do Balanço Hídrico

## 1. CICLO HIDROLÓGICO

### 1.1 Introdução à hidrologia

Hidrologia é a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas, e sua reação com o meio ambiente, incluindo sua relação com as formas vivas (Definição recomendada pela *United States Federal Council for Science and Technology*, 1962).

A hidrologia é uma ciência interdisciplinar e tem evoluído expressivamente devido aos problemas crescentes observados nas bacias hidrográficas, como a ocupação inadequada, o aumento significativo da utilização da água para diversos fins e principalmente em face aos resultados dos impactos sobre o meio ambiente. O estudo da água era uma ciência basicamente descritiva e qualitativa, porém se transformou em uma área de conhecimento onde os métodos quantitativos têm sido explorados através de metodologias matemáticas e estatísticas, melhorando de um lado os resultados e do outro explorando melhor as informações existentes (TUCCI, 1993).

Antes o planejamento de ocupação nas bacias era mínimo, levando em consideração apenas o menor custo de implantação e o máximo aproveitamento para os usuários, a questão de cuidados e preservação do meio ambiente raramente era apreciada. Dessa forma, o crescimento populacional e a exploração da água causaram grandes impactos e conseqüentemente a degradação dos recursos naturais.

De frente aos problemas observados, a população começou a se preocupar, estabelecendo medidas preventivas que minimizassem os prejuízos causados à natureza. Nos anos 70, as ações tinham como foco a bacia hidrográfica, enquanto que atualmente o problema tem grandeza global, em decorrência dos possíveis efeitos globais da alteração do clima. A tendência atual envolve desenvolvimento sustentado

da bacia hidrográfica, que implica o aproveitamento racional dos recursos com o mínimo dano ao ambiente.

Segundo NRC<sup>1</sup> (1991) apud Tucci (1993), se chegou à conclusão que o desenvolvimento da ciência hidrológica tem sido influenciado por aspectos específicos do uso da água e controle de desastres. A comissão menciona a necessidade de instruir profissionais com formação mais ampla, que englobe conhecimento de matemática, física, química, biologia e geociência, para desenvolver uma ciência dentro de um contexto mais vasto.

## 1.1.1 História da hidrologia

A hidrologia, que é a ciência que estuda a água, é fundamentada em históricos de processos envolvidos no meio físico natural. Para analisar a sazonalidade da ocorrência de precipitações num determinado local, por exemplo, são utilizadas observações obtidas no passado.

A convivência com o meio físico natural existe desde a origem do homem. De acordo com Tucci (1993), filósofos gregos tentaram erroneamente explicar o ciclo hidrológico, e apenas Marcus Vitruvius Pollio (100 a.C.) apresentou conceitos próximos do entendimento atual do ciclo hidrológico. Admitia-se que o mar alimentava os rios através do subsolo. Até no início deste século ainda existiam pessoas que questionavam o conceito moderno do ciclo hidrológico.

Mesmo sem saber a origem da água e o funcionamento dos fenômenos naturais, as civilizações antigas exploraram os recursos hídricos por meio de projetos de irrigação, aquedutos para abastecimento de água e controle de inundação. Ainda segundo Tucci

---

<sup>1</sup> NRC (National Research Council), 1991. *Opportunities in the hydrologic sciences*. Washington: National Academy Press. 348p.

(1993), apenas a partir do século 15, com Leonardo da Vinci e Bernard Palissy, o ciclo hidrológico passou a ser melhor compreendido. O problema era aceitar que a precipitação tinha um volume maior que a vazão e que os rios são mantidos perenes pelo retardamento do escoamento do subsolo. Pierre Perrault, no século 17 (1608-1680), avaliou os elementos da relação precipitação-vazão, ou seja a precipitação, evaporação e capilaridade da bacia do rio Sena e comparou estas grandezas com medições de vazão realizadas por Edm, Mariotte, constatando que a vazão era apenas cerca de 16% da precipitação.

As medições sistemáticas de precipitação e vazão, assim como o desenvolvimento teórico e experimental da hidráulica se iniciaram no século 19. Porém, no Brasil os postos mais antigos de precipitação são do final do século passado, enquanto que a coleta de dados de níveis e vazão iniciou no começo deste século.

Foi na década de 30 que surgiram os elementos descritivos do funcionamento dos fenômenos naturais e fórmulas empíricas de processos específicos, tais como as demonstradas por Chezy:

- Equação para movimento uniforme em canais;
- Método racional para cálculo de vazão máxima em pequenas bacias.

Essa década também marcou o início da hidrologia quantitativa com alguns trabalhos, tais como:

- Conceitos do hidrograma unitário utilizado para o escoamento superficial (Sherman,1932);
- Equação empírica para o cálculo da infiltração, permitindo a determinação da precipitação efetiva (Horton, 1933) ;
- Teoria para a hidráulica de poços (Theiss,1935).

Nesta mesma década outros métodos quantitativos foram apresentados, o que possibilitou a ampliação dos conhecimentos nessa ciência. Porém, mesmo com esse avanço, até a década de 50 a hidrologia se limitava a indicadores estatísticos dos processos envolvidos.

Somente com o surgimento do computador, houve o aprimoramento e experimentação das técnicas numéricas e estatísticas. Alguns aspectos da hidrologia tais como o escoamento subterrâneo, fluxo em rios, lagos e estuários desenvolveram-se com a observação e quantificação das variáveis envolvidas, aprimoramento de técnicas matemáticas e o aumento da capacidade do computador. Foram criadas em diversos países bacias representativas e experimentais visando ao atendimento e quantificação de processos físicos que ocorrem na bacia, tais como reflorestamento e desmatamento, erosão do solo e escoamento superficial.

Como a hidrologia está ligada diretamente ao uso da água, ao controle da ação da mesma sobre a população e ao impacto sobre a bacia, os estudos realizados visam o melhor entendimento desses processos e a implantação de um planejamento adequado do uso da bacia hidrográfica.

## **1.1.2 Aplicação da Hidrologia**

Segundo Righetto, 1998, a Hidrologia exerce grande influência em:

1. Escolha de fontes de abastecimento de água para uso doméstico ou industrial;
2. Projeto de construção de obras hidráulicas:
  - a. Fixação das dimensões hidráulicas de obras de arte, tais como: pontes, bueiros etc.;
  - b. Projeto de Barragens: localização e escolha do tipo de barragem, de fundação e de extravasor; dimensionamento;

- c. Estabelecimento de método de construção;
- 3. Drenagem:**
  - a. Estudo das características do lençol freático;
  - b. Exame das condições de alimentação e de escoamento natural do lençol: precipitação, bacia de contribuição e nível d' água nos cursos d' água;
- 4. Irrigação:**
  - a. Problema de escolha do manancial;
  - b. Estudo de evaporação e infiltração;
- 5. Regularização de cursos d' água e controle de inundações:**
  - a. Estudo das variações de vazão; previsão de vazões máximas;
  - b. Exame das oscilações de nível e das áreas de inundação;
- 6. Controle de Poluição:**
  - a. Análise da capacidade de recebimento de corpos receptores dos efluentes de sistemas de esgotos: vazão mínima de cursos d' água, capacidade de reaeração e velocidade de escoamento;
- 7. Controle da Erosão:**
  - a. Análise de intensidade e frequência das precipitações máximas, determinação de coeficiente de escoamento superficial;
  - b. Estudo da ação erosiva das águas e da proteção por meio de vegetação e outros recursos;
- 8. Navegação:**
  - a. Observação de dados e estudos sobre construções e manutenção de canais navegáveis;
- 9. Aproveitamento Hidrelétrico:**
  - a. Previsão das vazões máximas, mínimas e médias dos cursos d' água para o estudo econômico e o dimensionamento das instalações;



- b. Verificação da necessidade de reservatório de acumulação; determinação dos elementos necessários ao projeto e construção do mesmo: bacias hidrográficas, volumes armazenáveis, perdas por evaporação e infiltração;
- 10.** Operação de sistemas hidráulicos complexos;
- 11.** Recreação e preservação do meio ambiente; e
- 12.** Preservação e desenvolvimento da vida aquática.

## 1.2 Ciclo hidrológico

Denomina-se ciclo hidrológico o processo natural de evaporação, condensação, precipitação, detenção e escoamento superficial, infiltração, percolação da água no solo e nos aquíferos, escoamentos fluviais e interações entre esses componentes. (Righetto, 1998).

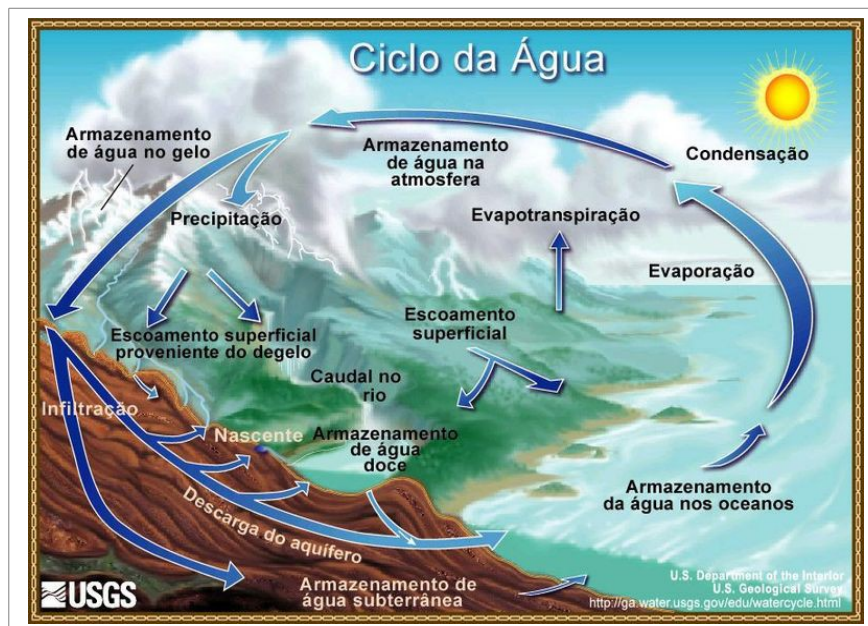
Para entender melhor, o ciclo pode-se visualizá-lo como tendo início com a evaporação da água dos oceanos. O vapor resultante é transportado pelo movimento das massas de ar. Sob determinadas condições, o vapor é condensado, formando as nuvens que por sua vez podem resultar em precipitação. Esta precipitação que ocorre sobre a terra pode ser dispersa de várias formas. A maior parte fica retida temporariamente no solo próximo onde caiu, que por sua vez, retorna à atmosfera através da evaporação e transpiração das plantas. Uma parte da água que sobra escoar sobre a superfície do solo ou para os rios, enquanto que a outra parte penetra profundamente no solo, abastecendo o lençol d' água subterrâneo. A Figura 1 demonstra melhor como ocorrem essas relações entre as fases.

As principais variáveis hidrológicas consideradas no ciclo hidrológico são:

- *E*: evaporação (mm/d);

- $q$ : umidade específica do ar em gramas de vapor d' água por quilo de ar, ou g/kg;
- $P$ : precipitação (mm);
- $i$ : intensidade de chuva (mm/h);
- $Q$ : deflúvio superficial ou vazão ( $m^3/s$ );
- $f$ : taxa de infiltração (mm/h);
- $ET$ : evapotranspiração (mm/d).

Figura 1 – Ciclo Hidrológico



Fonte: USGS - [United States Geological Survey](http://www.usgs.gov)

Embora o ciclo hidrológico possa parecer um ciclo contínuo, com a água se movendo de uma forma permanente e com uma taxa constante, é na realidade bastante diferente, pois o movimento que a água faz em cada uma das fases do ciclo ocorre de forma bastante aleatória, variando tanto no espaço como no tempo.

Em determinadas circunstâncias, a natureza parece trabalhar com os excessos. Ora provoca chuvas torrenciais que ultrapassam a capacidade de suporte dos cursos d' água, acarretando em inundações, ora parece que todo o ciclo hidrológico parou completamente. Esses extremos de enchente e seca são os que mais interessam para os engenheiros, pois muitos dos projetos de Engenharia Hidráulica são feitos com a finalidade de proteção contra estes mesmos extremos, e quando não previsto podem acarretar em danos.

Quando trabalhamos com projetos, necessariamente devemos definir nosso domínio, seja ele local ou regional. A definição do domínio implica na seleção dos componentes mais relevantes. Do ciclo hidrológico, por exemplo, para o balanço hídrico, são considerados a evapotranspiração, a precipitação, o escoamento superficial, a infiltração e a percolação profunda. Já nos estudos de drenagem é necessário conhecer as distribuições espaço-temporais da precipitação, da infiltração e das vazões nas seções de interesse.

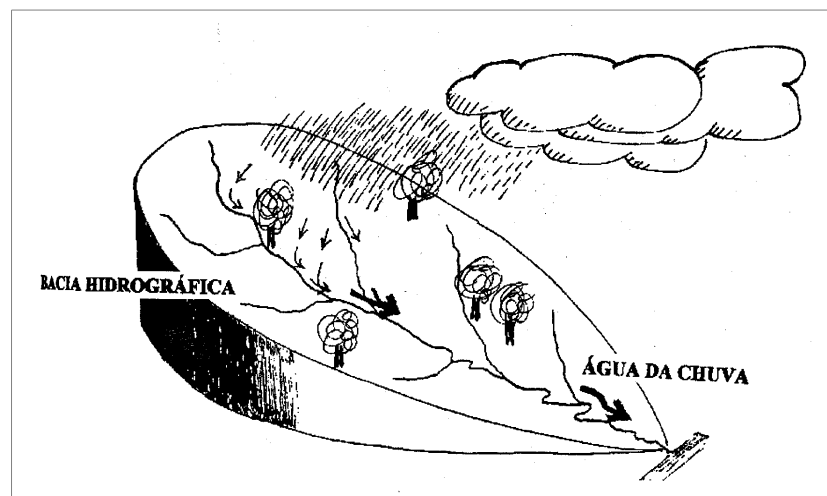
Para cada trabalho que irá realizar, uma análise hidrológica deve ser feita, seja para saber se a precipitação irá interferir no processo, ou se a drenagem é adequada para o tipo de empreendimento.

### **1.3 Bacia hidrográfica**

Uma bacia hidrográfica de um curso de água é uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. É composta basicamente de um conjunto de superfícies vertentes de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único no exutório. Bacia hidrográfica é, portanto, uma área definida topograficamente, drenada por um curso d' água ou por um sistema conectado de cursos d' água, de forma

tal que toda a vazão efluente seja descarregada por uma simples saída. Pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório (Figura 2), considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados profundamente.

Figura 2 – Bacia Hidrográfica



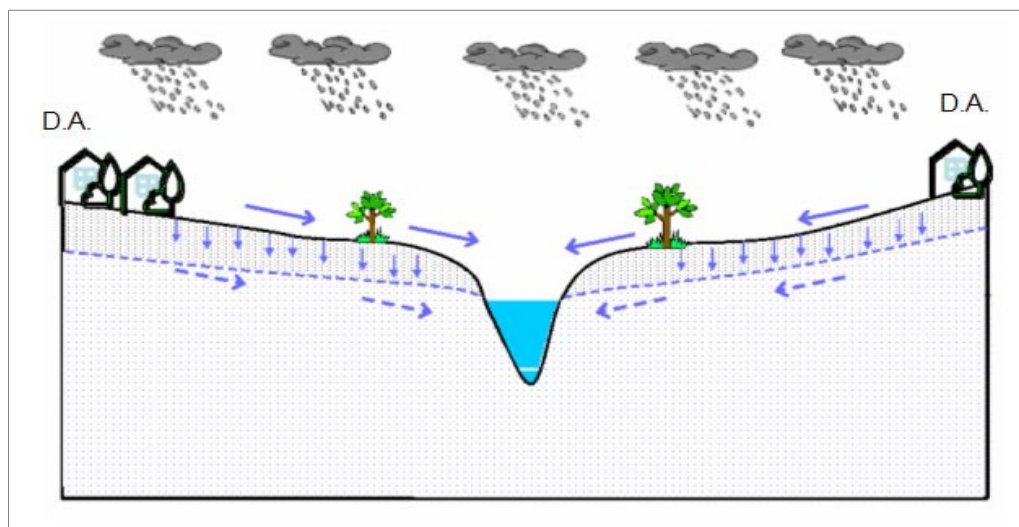
Fonte: Pedrazzi, 2003.

A formação da bacia hidrográfica dá-se através dos desníveis dos terrenos que direcionam os cursos da água, sempre das áreas mais altas para as mais baixas. É uma área geográfica e, como tal, mede-se em  $\text{km}^2$ .

A bacia hidrográfica é o elemento fundamental de análise no ciclo hidrológico, principalmente na sua fase terrestre, que engloba a infiltração e o escoamento

superficial (SILVEIRA, 1993). Ela pode ser definida como uma área limitada por um divisor de águas (Figura 3), que a separa das bacias adjacentes e que serve de captação natural da água de precipitação através de superfícies vertentes.

Figura 3 – Divisor de águas



Fonte: Menciondo, 2004.

Atualmente, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, de acordo com a Resolução nº 32 de 15 de outubro de 2003, divide o Brasil em 12 regiões hidrográficas. Diferentemente das bacias hidrográficas, que podem ultrapassar as fronteiras nacionais, as regiões hidrográficas estão restritas ao espaço territorial pertencente ao Brasil, como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Regiões Hidrográficas do Brasil



Fonte: Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Disponível em <http://www2.ana.gov.br/Paginas/default.aspx>.

### 1.3.1 Área de drenagem

É a área plana (projeção horizontal) inclusa entre seus divisores topográficos. A área é o elemento básico para o cálculo das outras características físicas. A área de uma

bacia hidrográfica é geralmente expressa em km<sup>2</sup>. Na prática, determina-se a área de drenagem com o uso de um aparelho denominado planímetro, porém pode-se obter a área com uma boa precisão, utilizando-se o “método dos quadradinhos”.

### 1.3.2 Ordem da Bacia

O sistema de drenagem de uma bacia é constituído pelo rio principal e seus tributários. A classificação dos rios quanto à ordem reflete o grau de ramificação ou bifurcação dentro de uma bacia. Os cursos d'água maiores possuem seus tributários, que por sua vez possuem outros até que chegue aos minúsculos cursos d'água da extremidade. Normalmente, quanto maior o número de ramificações maior serão os cursos d'água. Dessa forma, podem-se classificar os cursos d'água de acordo com o número de bifurcações (PEDRAZZI, 2003).

O estudo das ramificações e do desenvolvimento do sistema é importante, pois ele indica a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica. O padrão de drenagem de uma bacia depende da estrutura geológica do local, tipo de solo, topografia e clima. Esse padrão também influencia no comportamento hidrológico da bacia.

Dessa forma, o Engenheiro brasileiro Otto Pfafstetter, do extinto Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), desenvolveu um eficiente e engenhoso método de subdivisão e codificação de bacias hidrográficas, utilizando dez algarismos, diretamente relacionado com a área de drenagem dos cursos d'água (PFAFSTETTER, 1989 apud GALVÃO & MENESES, 2005).

De acordo com Galvão e Meneses (2005), esse método é considerado natural, hierárquico, baseado na topografia da área drenada e na topologia (conectividade e



direção) da rede de drenagem. Sua aplicabilidade em escala global, com o emprego de poucos dígitos, além da amarração nos dígitos da relação topológica entre as bacias hidrográficas, são as características marcantes do método de Otto Pfafstetter.

A técnica desenvolvida por Otto Pfafstetter, conhecida pelo nome de “Ottobacias”, caracteriza-se por sua racionalidade. Utilizando pequena quantidade de dígitos em um código específico para uma dada bacia, o método permite inferir através desse código quais as bacias hidrográficas que se localizam a montante e a jusante daquela em estudo. Cada vez que for citada uma determinada numeração, sabe-se exatamente a identificação da bacia hidrográfica, seu rio principal e seu relacionamento com as demais bacias da mesma região hidrográfica, até o nível continental (SILVA, 1999 apud GALVÃO & MENESES, 2005).

O primeiro princípio dessa forma de classificação é que o rio principal de uma bacia é sempre o que tem a maior área de contribuição a montante. Isto contraria, em muitos casos, a atribuição de nomes feita tradicionalmente na bacia, mas é um critério que certamente tem uma base hidrológica mais sólida. A partir da identificação do rio principal, classificam-se suas bacias afluentes por área de drenagem.

As quatro maiores recebem números pares, sendo a mais a jusante a de número 2, a logo mais a montante a 4, a outra a 6 e a mais a montante de todas a 8. As bacias incrementais recebem números ímpares, sendo a da foz a número 1, a incremental entre as bacias 2 e 4 a 3, e assim por diante até a bacia de montante, que recebe o número 9. Desta forma está terminada uma fase da classificação.

Cada uma das bacias determinadas pode ser novamente classificada, sendo então atribuído um algarismo adicional. As bacias pares são classificadas como uma nova bacia integral, sendo o rio principal o que na fase anterior foi um afluente. As bacias



incrementais, ímpares, são classificadas considerando-se o mesmo rio principal da fase anterior, restrito ao trecho incremental considerado. O processo pode ser repetido enquanto houver afluentes na rede hidrográfica. A classificação de Pfafstetter tem como objetivo as bacias, mas nada impede que seja adaptada, como foi feito, para a classificação dos rios. Basta para isso que o rio receba o número da bacia principal ao qual é associado. Desta maneira os códigos dos rios sempre terão sua terminação em um algarismo par. (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2002).

### 1.3.3 Tempo de concentração

O tempo de concentração é aquele necessário para que toda a água precipitada na bacia hidrográfica passe a contribuir na seção considerada. Este tempo pode ser calculado através de dois métodos, apresentados a seguir.

#### Fórmula de Kirpich

- Equação – Tempo de concentração

$$t_c = 57 \left( \frac{L^2}{I_{eq}} \right)^{0,385}$$

Onde:

$I_{eq}$  = declividade equivalente em m/km

$L$  = comprimento do curso d'água em km.

#### Fórmula de Picking

- Equação – Tempo de concentração

$$t_c = 5,3 \left( \frac{L^2}{I_{eq}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Onde:

$L$  = comprimento do talvegue em km;

$I_{eq}$  = declividade equivalente em m/m.

## 1.4 Precipitação

O regime hidrológico de uma região é determinado por suas características físicas, geológicas e topográficas, e por seu clima. Os fatores climáticos mais importantes são a precipitação, principal “*input*” do balanço hidrológico de uma região, sua distribuição e modos de ocorrência, e a evaporação, responsável direta pela redução do escoamento superficial.

A precipitação é entendida em hidrologia como toda a água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve são formas diferentes de precipitações. A diferença entre essas precipitações é o estado em que a água se encontra (BERTONI & TUCCI, 1993).

A disponibilidade de precipitação numa bacia durante o ano é um fator determinante para quantificar, entre outros, a necessidade de irrigação de culturas e o abastecimento de água doméstico e industrial. A determinação da intensidade de precipitação é importante para o controle de inundação e da erosão do solo. Por sua capacidade para produzir escoamento, a chuva é o tipo de precipitação mais importante para a hidrologia (BERTONI & TUCCI, 1993).

Outros fatores climáticos de suma importância são a temperatura, a umidade e o vento, principalmente pela influência que exercem sobre a precipitação e a evaporação.

Os fenômenos atmosféricos de precipitação ocorrem quando existe uma condensação de vapor d' água formando nuvens, os ventos movimentam as partículas d' água de maneira a ocorrer aglutinação de gotículas, formando massas d' água suficientes para serem precipitadas.

Os processos de crescimento das gotas mais importantes são os de coalescência e de difusão do vapor. O processo de coalescência é aquele no qual as pequenas gotas das nuvens aumentam seu tamanho devido ao contato com outras gotas através da colisão, provocada pelo deslocamento das gotas, devido a movimentos turbulentos do ar, à força elétrica e ao movimento Browniano<sup>2</sup>.

A partir do momento em que as gotas d' água atingem tamanho suficiente para vencer a resistência do ar, elas se deslocam em direção ao solo. Nesse movimento de queda, as gotas maiores caem com maior velocidade do que os menores, o que faz com que as gotas menores sejam alcançadas e incorporadas às maiores aumentando, portanto, seu tamanho.

O processo de difusão do vapor é aquele no qual o ar, após o nível de condensação, continua evoluindo, provocando difusão do vapor supersaturado e sua consequente condensação em torno das partículas que aumenta de tamanho.

---

<sup>2</sup> O movimento Browniano é o movimento aleatório de partículas macroscópicas num fluido como consequência dos choques das moléculas do fluido nas partículas.

## 1.4.1 Tipos de precipitação

O esfriamento dinâmico ou adiabático é a principal causa da condensação e é o responsável pela maioria das precipitações.

O movimento vertical das massas de ar é um requisito importante para a formação das precipitações, que podem ser classificadas de acordo com as condições que produzem o movimento vertical do ar. Neste sentido, o rápido resfriamento de grandes massas de ar pode ser produzido de forma ciclônica, orográfica e convectiva. Normalmente quando ocorre a precipitação, mais de um desses processos são ativados.

- **Precipitações Frontais ou Ciclônicas**

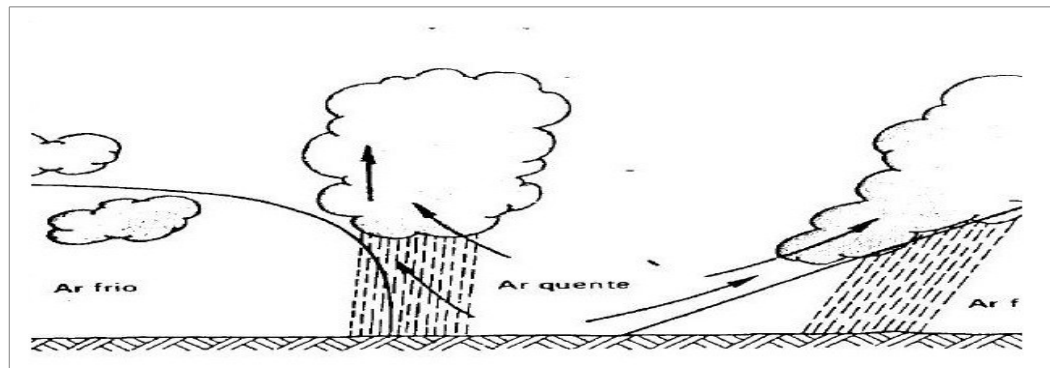
Estão associadas com o movimento de massas de ar de regiões de alta pressão para regiões de baixa pressão. A diferença de pressão normalmente é causada por aquecimento desigual da superfície terrestre.

As precipitações ciclônicas podem ser classificadas como frontal ou não frontal. A frontal resulta da ascensão do ar quente sobre o ar frio na zona de contato entre duas massas de ar de características diferentes. Se a massa de ar frio se move de tal forma que é substituída por uma massa de ar mais quente, a frente é conhecida como frente quente, e se o contrário acontece, chamamos de frente fria. A ascensão frontal pode ser vista na figura 5.

### **As precipitações ciclônicas**

Costumam ser de longa duração, apresentando intensidade de baixa a moderada, espalhando-se por grandes áreas.

Figura 5 – Precipitações ciclônicas

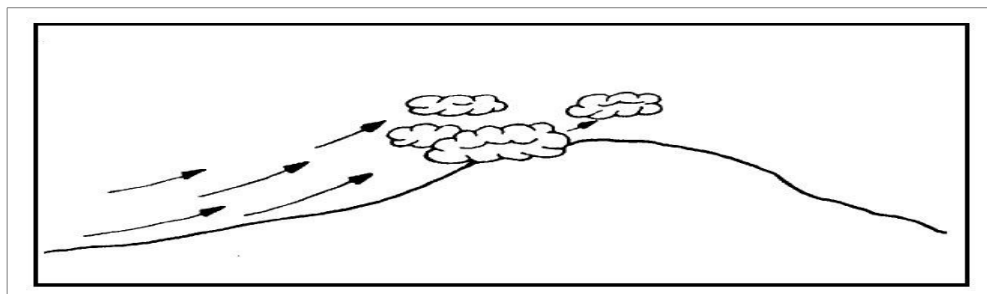


Fonte: Villela & Mattos, 1975.

- **Precipitações Orográficas**

Essa precipitação é resultante de ascensão mecânica, acontece quando uma corrente de ar úmido horizontal é forçada a passar por uma barreira natural, tais como as montanhas. As precipitações da Serra do Mar são exemplos típicos. A figura 6 demonstra como ocorre.

Figura 6 – Precipitações orográficas



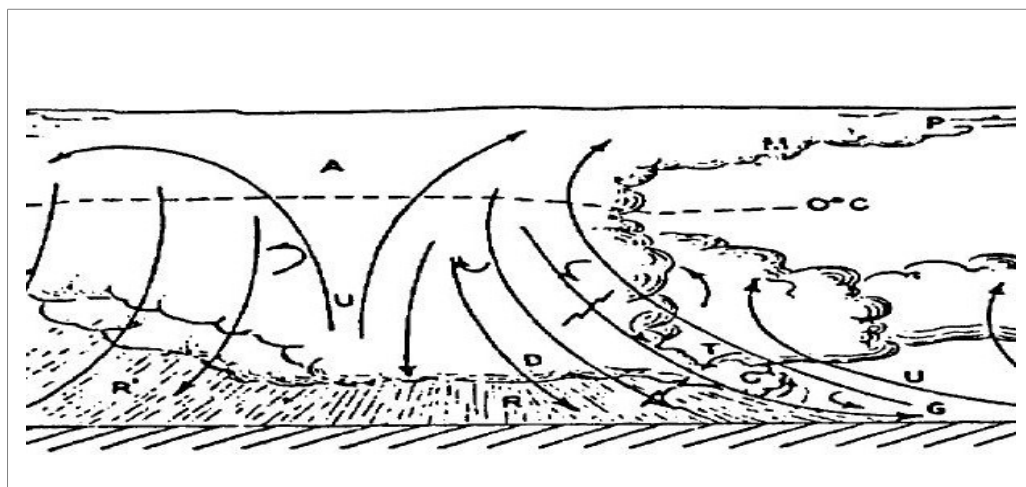
Fonte: Villela & Mattos, 1975.

- **Precipitações Convectivas**

As precipitações convectivas são típicas das regiões tropicais. Quando ocorre um aquecimento desigual da superfície terrestre, acaba surgindo o aparecimento de camadas de ar com densidades diferentes, o que gera uma estratificação térmica da atmosfera em equilíbrio estável.

Caso esse equilíbrio, por qualquer motivo (vento, superaquecimento) for quebrado, provocará uma ascensão brusca e violenta do ar menos denso, que é capaz de atingir grandes altitudes. Essas precipitações costumam ser de grande intensidade e curta duração, concentradas em pequenas áreas. A Figura 7 demonstra como esse fenômeno acontece.

Figura 7 – Precipitações convectivas



Fonte: Villela & Mattos, 1975.

## 1.5 Interceptação

A interceptação é a retenção de parte da precipitação acima da superfície do solo (Blake, 1975), podendo ocorrer pela presença de vegetação ou outra forma de obstrução ao escoamento. O volume retido é perdido por evaporação, retornando à atmosfera. Este processo interfere no balanço hídrico da bacia hidrográfica, funcionando como um reservatório que armazena uma parcela da precipitação para consumo. A tendência é de que a interceptação reduza a variação da vazão ao longo do ano, retarde e reduza o pico das cheias (TUCCI, 1993).

Ainda de acordo com Tucci (1993), a retenção de parte do escoamento também pode ocorrer por depressões do solo, mas não pode ser considerada uma interceptação propriamente dita, já que parte do volume retido retorna ao fluxo da bacia através da infiltração. Essas depressões do solo ou a baixa capacidade de drenagem podem provocar o armazenamento de grandes volumes de água, reduzindo a vazão média da bacia.

Como já mencionado, a interceptação pode ocorrer de duas formas: pela vegetação e por depressões. As duas formas são explicadas a seguir.

- **Interceptação vegetal**

Esse tipo de interceptação pode depender de algumas variáveis, dentre elas: características da precipitação e condições climáticas, tipo e densidade da vegetação e período do ano. As

características principais da precipitação são a intensidade, o volume precipitado e a chuva antecedente.

A intensidade do vento é o fator climático mais significativo na interceptação, aumentando a mesma para uma cheia longa e diminuindo para cheias menores (WIGHAM, 1970 apud TUCCI, 1993). O tipo de vegetação caracteriza a quantidade de gotas que cada folha pode reter e a densidade da mesma indica o volume retido numa superfície de bacia.

As folhas geralmente interceptam a maior parte da precipitação, mas a disposição dos troncos contribui significativamente. Em regiões em que ocorre uma maior variação climática, ou seja, em latitudes mais elevadas, a vegetação apresenta uma significativa variação da folhagem ao longo do ano, que interfere diretamente com a interceptação. A época do ano também pode caracterizar alguns tipos de cultivos que apresentam as diferentes fases de crescimento e colheita. A equação da continuidade do sistema de interceptação pode ser descrita por

- Equação – Precipitação Interceptada

$$S_i = P - T - C$$

Onde:

$S_i$  = precipitação interceptada;

$P$  = precipitação;

$T$  = precipitação que atravessa a vegetação;

$C$  = parcela que escoou pelo tronco das árvores.

De acordo com Tucci (1993), Horton (1919) foi um dos primeiros a descrever e apresentar resultados e equações para descrever o comportamento da interceptação



vegetal. O referido autor relacionou o volume interceptado durante uma enchente com a capacidade de interceptação da vegetação e a taxa de evaporação.

- Equação – Interceptação vegetal

$$S_i = S_v + \left( \frac{A_v}{A} \right) \cdot E \cdot tr$$

Onde:

$S_v$  = capacidade de armazenamento da vegetação para a área;

$A_v$  = área de vegetação;

$A$  = área total;

$E$  = evaporação da superfície de evaporação;

$tr$  = duração da precipitação.

- **Armazenamento nas depressões**

Na bacia hidrográfica existem obstruções naturais e artificiais ao escoamento, acumulando parte do volume precipitado. Em áreas rurais isso pode ser observado após uma enchente, quando áreas sem drenagem formam pequenas lagoas. O volume de água retido nessas áreas somente diminui por evaporação e por infiltração. Como o lençol freático fica alto, logo após a enchente, a saída de água dá-se principalmente pela evaporação, reduzindo a vazão média da bacia. Isso é mais grave em solos que se impermeabilizam com a umidade, como o argiloso (TUCCI, 1993).

Em bacias urbanas, podem ser criadas artificialmente áreas com retenção do escoamento em função de aterros, pontes e construções. O somatório destas perdas se reflete na redução da vazão média e no abatimento dos picos de enchentes. Linsley et

al. (1949) utilizou a seguinte expressão empírica para retratar o volume retido pelas depressões do solo após o início da precipitação (TUCCI, 1993).

- Equação – Fórmula empírica de interceptação

$$V_d = S_d (1 - e^{-kPe})$$

Onde:

$V_d$  = volume retido;

$S_d$  = capacidade máxima;

$Pe$  = precipitação efetiva;

$K$  = coeficiente equivalente a  $1/S_d$

No uso desta equação, admite-se que no início da precipitação as depressões estão vazias e para gerar escoamento superficial é necessário que as depressões estejam preenchidas. São aproximações do comportamento real, já que o escoamento superficial ocorre sem que as depressões sejam todas preenchidas, devido à variabilidade espacial da capacidade de retenção das mesmas.

## 1.6 Infiltração

A infiltração é o fenômeno de penetração da água nas camadas do solo próximas à superfície do terreno, movendo-se para baixo, através dos vazios, sob a ação da gravidade, até atingir uma camada suporte, que a retém, formando então a água do solo (MARTINS, 1976).

A água de chuva precipitada sobre terreno permeável é geralmente succionada totalmente pelo solo até o instante em que se inicia a formação de um espelho d'água na superfície e, por conseguinte, a ocorrência de deflúvio superficial. Esse fato pode ser observado por qualquer pessoa, porém é regido por leis físicas complexas, cuja quantificação é supostamente conseguida por meio de experimentos, leis empíricas e solução de equações diferenciais que governam o movimento da água no solo (RIGHETTO, 2008).

A infiltração pode ser dividida em três fases essenciais, sendo elas a fase de intercâmbio, de descida e de circulação. Na fase de intercâmbio, a água está próxima à superfície do terreno, sujeita a retornar a atmosfera por uma aspiração capilar, provocada pela ação da evaporação ou absorvida pelas raízes das plantas e em seguida transpirada pelo vegetal.

Quando o deslocamento vertical da água ocasionado pela ação de seu próprio peso supera a adesão e a capilaridade, chamamos de fase de descida. Esse movimento se efetua até atingir uma camada-suporte de solo impermeável.

A fase de circulação ocorre quando há acúmulo de água, onde são constituídos os lençóis subterrâneos, cujo movimento se deve também a ação da gravidade, obedecendo às leis de escoamento subterrâneo.

### **1.6.1 Grandezas características**

As principais grandezas características são explicadas por Martins (1976), como mostram os próximos itens.

- **Capacidade de infiltração**

É a quantidade máxima de água que um solo, sob uma dada condição, pode absorver na unidade de tempo por unidade de área horizontal. A penetração da água no solo, na razão de sua capacidade de infiltração, verifica-se somente quando a intensidade da precipitação excede a capacidade do solo em absorver a água, isto é, quando a precipitação é excedente. A capacidade de infiltração pode ser expressa por milímetros por hora (mm/h), milímetros por dia (mm/dia), metros cúbicos por metro quadrado ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ) ou metros cúbicos por dia ( $\text{m}^3/\text{dia}$ ).

- **Distribuição granulométrica**

É a distribuição das partículas constituintes do solo em função das suas dimensões.

- **Porosidade**

É a relação entre o volume de vazios de um solo e o seu volume total, expressa comumente em porcentagem (%).

- **Velocidade de infiltração**

É a velocidade média de escoamento da água através de um solo saturado, determinada pela relação entre a quantidade de água que atravessa a unidade de área do material do solo e o tempo. Pode ser expressa por metros por segundo (m/s), metros por dia (m/dia), metros cúbicos por metro quadrado ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ) ou metros cúbicos por dia ( $\text{m}^3/\text{dia}$ ).

### 1.6.2 Fatores intervenientes

Os principais fatores intervenientes também são explicados por Martins (1976), apresentados nos itens a seguir.

- **Tipo de solo**

A capacidade de infiltração varia diretamente com a porosidade, o tamanho das partículas do solo e o estado de fissuração das rochas. As características presentes em pequena camada superficial, com espessura da ordem de 1 cm, têm grande influência sobre a capacidade de infiltração.

- **Compactação devida ao homem e aos animais**

Em locais onde há tráfego constante de homem ou veículos ou em áreas de utilização intensa por animais (pastagens), a superfície é submetida a uma compactação que a torna relativamente impermeável.

- **Ação da precipitação sobre o solo**

As águas das chuvas quando se chocam com o solo promovem a compactação da sua superfície, diminuindo a capacidade de infiltração, transportam os materiais finos que, pela sua sedimentação posterior, tenderão a diminuir a porosidade da superfície, umedecem a superfície do solo, saturando as camadas próximas, aumentando a resistência à penetração da água; e atuam sobre as partículas de substâncias coloidais que, ao intumescerem, reduzem as dimensões dos espaços intergranulares.

### **1.6.3 Determinação da capacidade de infiltração**

Para a determinação da capacidade de infiltração, podem ser utilizados equipamentos chamados infiltrômetros, que são capazes de realizar uma medição direta. São tubos cilíndricos curtos de chapa metálica, com diâmetros que variam entre 200 e 900 mm. São cravados verticalmente no solo de modo a restar uma pequena altura livre sobre este.

O método de Horner e Lloyd também pode ser utilizado para conhecer a capacidade de infiltração do solo de uma dada área, porém para pequenas bacias hidrográficas. Ele é baseado na medida direta da precipitação e do escoamento superficial resultante, o que possibilita a determinação da curva da capacidade de infiltração em função do tempo.

Já em bacias muito grandes, a intensidade de precipitação não é constante em toda a área e por isso, Horton propôs um método de avaliação da capacidade média de infiltração. Este método indica que a precipitação seja medida por diversos aparelhos por toda a bacia, e um deles deve ser necessariamente um pluviógrafo.

### 1.7 Evaporação

Evaporação é o conjunto dos fenômenos de natureza física que transformam a água líquida ou sólida em vapor de água da superfície do solo e transferida, neste estado, para a atmosfera. Esse processo somente poderá ocorrer naturalmente se houver ingresso de energia no sistema, proveniente do sol, da atmosfera ou de ambos e será controlado pela taxa de energia, na forma de vapor de água que se propaga na superfície da Terra (TUCCI & BELTRAME, 1993). A evaporação pode ocorrer em corpos d'água, lagos reservatórios de acumulação, águas retidas na camada superficial do solo e mares e é influenciada também pela temperatura e umidade relativa do ar, vento e pressão de vapor.

Os métodos mais utilizados para determinar a evaporação são:

- Evaporímetros: instrumentos que possibilitam uma medida direta do poder evaporativo da atmosfera, estando sujeitos aos efeitos de radiação, temperatura,

vento e umidade. Os mais conhecidos são os atmômetros e os tanques de evaporação;

- Transferência de massa: é baseado na primeira Lei de Dalton, que estabelece a relação entre evaporação e pressão de vapor, expressa da seguinte forma:
- Equação – Transferência de massa

$$E = C \cdot (e_s - e)$$

Onde:

E = intensidade da evaporação;

C = coeficiente influenciado por fatores interferentes;

$e_s$  = pressão de saturação do vapor de água à temperatura da água;

e = pressão do vapor d'água presente no ar atmosférico.

O efeito do vento foi introduzido através da alteração do coeficiente empírico (C). A expressão resultante é função da velocidade do vento, expressa por:

- Equação – Evaporação em função do vento

$$E_0 = \frac{s - e_a}{e} N f(w)$$

Onde:

N = parâmetro que considera dos efeitos da densidade do ar e da pressão;

f(w) = função da velocidade do vento;

$f(r)$  = parâmetro de rugosidade.

De acordo com Tucci e Beltrame (1993), as funções introduzidas, que retratam o efeito do vento, são obtidas com bases nos conceitos de camada limite que ocorre na ação do vento próximo da superfície de interesse. Várias expressões são utilizadas para a estimativa da evaporação em intervalos de tempo superiores a um dia. Segue a equação apresentada por Sverdrup (1946):

- Equação – Evaporação em intervalo de tempo superior a um dia

$$E_0 = \frac{0,63 \rho K^2 w_8 (e_2 - e_8)}{p \left[ \ln \left( \frac{800}{r} \right) \right]^2}$$

Onde:

$\rho$  = massa específica do ar;

$K = 0,41$  (constante de Von Karman);

$w_8$  = as velocidades do vento a 8 metros acima da superfície;

$e_2$  e  $e_8$  = pressão de vapor a 2 e 8 metros;

$p$  = pressão atmosférica;

$r$  = altura da rugosidade.

- Equações Empíricas: foram estabelecidas com base no ajuste por regressão das variáveis envolvidas, para algumas regiões e condições específicas. Por isso devem ser utilizadas com cautela. São baseadas usualmente na equação aerodinâmica:
- Equação



$$E_o = K f(w) [e_s(T_s) - e_a]$$

Onde:

K = constante;

f(w) = função da velocidade do vento.

Tucci e Beltrame (1993) apresentaram um resumo das equações desse tipo, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Equações empíricas baseadas na expressão aerodinâmica

Equação	Condições de aplicação	Referência
$E_o \text{ (pol/mês)} = 11(1+0,1w^8)(e_s-e_a)$	Lagos rasos	Meyer (1915)
$E_o \text{ (pol/dia)} = 0,771(1,465-0,0186p)(0,44+0,118w^0)(e_s-e_a)^*$	Lagos rasos	Rohwer (1931)
$E_o \text{ (pol/dia)} = 0,35(1+0,24w^2)(e_s-e_a)$	Pequenos tanques	Penman (1948)
$E_o \text{ (pol/dia)} = 0,057w^8(e_s-e_a)$	Lago Hefner	Marciano e Harbeck (1952)
$E_o \text{ (pol/dia)} = 0,072w^4(e_s-e_a)$	Lago Hefner	Marciano e Harbeck (1952)

\* pressão barométrica

- **Balanco hídrico:** possibilita a determinação da evaporação com base na equação da continuidade do lago ou reservatório. A referida equação pode ser escrita da seguinte forma:

- Equação – Balanço hídrico

$$\frac{dV}{dt} = I - Q - E_0 \cdot A + P \cdot A$$

Onde:

V = volume de água contido no reservatório (hm);

t = tempo (s);

I = vazão total de entrada no reservatório (m<sup>3</sup>/s);

Q = vazão de saída do reservatório (m<sup>3</sup>/s);

E<sub>0</sub> = evaporação (mm/mês);

P = precipitação sobre o reservatório (mm/mês);

A = área do reservatório (km<sup>2</sup>).

A evaporação é obtida da equação 10 por:

- Equação – Evaporação

$$E_0 = \frac{I - Q}{A} + P - \frac{dV}{dt}$$

Além da equação de continuidade, o método do balanço hídrico também apresenta a equação de Evaporação Real (ER):

- Equação – Evaporação Real

$$ER = [EP + (I - EP) - \Delta AS]$$

Onde:

EP = Evaporação Potencial

I = Infiltração;

$\Delta AS$  = variação do armazenamento de água no solo.

A evapotranspiração representa a quantidade de água que nas condições reais se evapora do solo e transpira das plantas e é de suma importância para o balanço hídrico de uma bacia como um todo. Para estimar os valores dessa variável, pode-se aplicar o método de Penman-Monteith, representado pela seguinte equação:

- Equação – Evapotranspiração

$$ET_0 = \frac{\delta + \gamma * \left( \frac{900}{T + 273} \right) * (e_s - e_a)}{\delta + \gamma * \left( R_n - G \right) \frac{1}{\lambda} + \gamma}$$

Onde:

$ET_0$  = evapotranspiração diária de referência (mm);

$\lambda$  = calor latente de vaporização ( $MJ kg^{-1}$ );

$\delta$  = inclinação da curva da pressão de vapor saturado versus temperatura ( $k Pa K^{-1}$ );

$R_n$  = saldo de radiação ( $MJ m^{-2} dia^{-1}$ );

$G$  = fluxo de calor no solo ( $MJ m^{-2} dia^{-1}$ );

$e_s$  = pressão de vapor saturado do ar (k Pa);

$e_a$  = pressão de vapor do ar na altura z (k Pa);

$T$  = temperatura do ar na altura z ( $^{\circ}C$ );

$\gamma^*$  = coeficiente psicrométrico modificado ( $\text{k Pa K}^{-1}$ ) =  $\gamma (1 + 0,33 U_2)$ ; ( $U_2$  é a velocidade do vento medida a 2 metros de altura ( $\text{m s}^{-1}$ );

$900$  = Constante ( $\text{k J}^{-1} \text{ kg } ^\circ\text{K}$ ).

## 1.8 escoamento superficial e regime dos cursos d'água

### 1.8.1 escoamento superficial

O escoamento superficial talvez seja a fase mais importante do ciclo hidrológico e de maior importância para os engenheiros, pois é a etapa que estuda o deslocamento das águas na superfície da Terra e está diretamente ligada ao aproveitamento da água superficial e à proteção contra os efeitos causados pelo seu deslocamento (erosão do solo, inundações, etc.).

Esse tipo de escoamento é presenciado fundamentalmente na ocorrência de precipitações e considera desde o movimento da água de uma pequena chuva que, caindo sobre um solo saturado de umidade, escoar pela sua superfície, formando as enxurradas ou torrentes, córregos, ribeirões, rios e lagos ou reservatórios de acumulação.

De acordo com Martins (1976), parte da água das chuvas é absorvida pela vegetação e outros obstáculos, a qual é evaporada posteriormente. Da quantidade de água que atinge o solo, parte é retida em depressões do terreno e parte é infiltrada. Após o solo alcançar sua capacidade de absorver a água, ou seja, quando os espaços nas superfícies retentoras tiverem sido preenchidos, ocorre o escoamento superficial da água restante.

No início do escoamento superficial é formada uma película laminar que aumenta de espessura, à medida que a precipitação prossegue, até atingir um estado de equilíbrio.

Dentre os fatores que influenciam o escoamento superficial estão os seguintes:

- Fatores climáticos: ligados à intensidade da chuva, duração da chuva e a chuva antecedente;
- Fatores fisiográficos: ligados à área e forma da bacia, à permeabilidade e capacidade de infiltração e à topografia da bacia;
- Obras hidráulicas: ligadas à construção de barragens, canalização ou retificação e derivação ou transposição.
  
- **Coeficiente de escoamento superficial (*run off*)**

O coeficiente de escoamento superficial ou coeficiente de “*run off*”, é definido como a razão entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado. Este coeficiente pode ser relativo a uma chuva isolada ou relativo a um intervalo de tempo onde várias chuvas ocorreram (VILLELA E MATTOS, 1975). A equação a seguir demonstra o coeficiente de “*run off*”.

Equação – Coeficiente de “*run off*”

$$C = \frac{\text{Volumetotalescoado}}{\text{Volumetotalprecipitado}}$$

Sabe-se que conhecendo o coeficiente de “*run off*” para uma determinada chuva intensa de uma certa duração, pode-se determinar o escoamento superficial de outras precipitações de intensidades diferentes, desde que a duração seja a mesma. Esse coeficiente é muito utilizado para se prever a vazão de uma enchente provocada por uma chuva intensa.

- **Métodos de Estimativa do Escoamento Superficial**

De acordo com Carvalho e Silva (2006), os métodos de estimativa do escoamento superficial podem ser divididos em quatro grupos conforme à:

a) Medição do Nível de Água

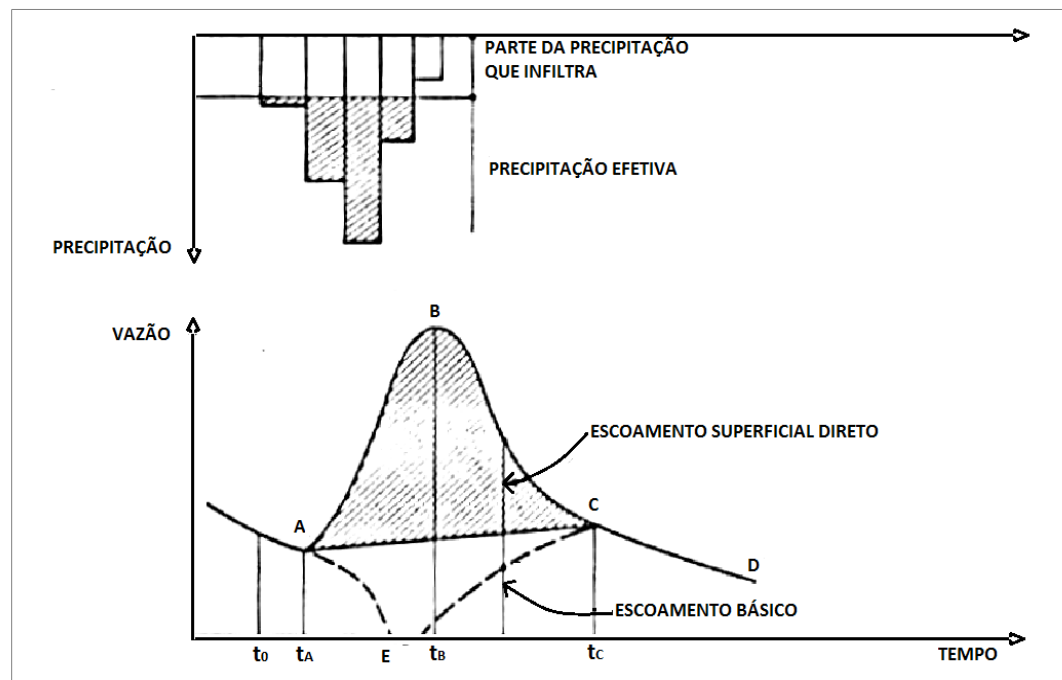
A estimativa do escoamento superficial por meio de medição do nível de água é realizada em postos fluviométricos, onde a altura do nível de água é obtida com auxílio das réguas linimétricas ou por meio dos linígrafos. De posse das alturas pode-se estimar a vazão em uma determinada seção do curso d'água por meio de uma curva-chave. Esta curva relaciona uma altura do nível do curso d'água a uma vazão. É o método mais preciso e requer vários postos fluviométricos.

b) Modelo Chuva-Vazão Calibrados - Método do hidrograma

A área de drenagem, grau de permeabilidade, profundidade do lençol freático, porosidade do solo e também o tipo de precipitação que ocorreu sobre a bacia, são aspectos da bacia que podem refletir em um hidrograma. O hidrograma, hidrógrafa ou fluviograma é a representação gráfica da distribuição da vazão em função do tempo numa dada seção de um curso d'água. Essa distribuição é interpretada como sendo a resposta da bacia hidrográfica ou área de drenagem quando estimulada pelas chuvas que caem sobre essa área (Righetto, 1998).

A figura 8 mostra uma hidrógrafa de uma chuva isolada (ietograma) de uma precipitação que ocorreu em uma bacia, assim como a curva de vazão correspondente registrada em uma seção de um curso d'água.

Figura 8 - Ietograma e hidrógrafa de uma chuva isolada



Fonte: CARVALHO e SILVA, 2006

Alguns fatores contribuíram para o escoamento na seção considerada, sendo eles:

- 1) Precipitação recolhida diretamente pela superfície livre das águas;
- 2) Escoamento superficial direto (incluindo o escoamento subperifical);
- 3) Escoamento básico (contribuição do lençol de água subterrânea).

É possível observar quatro trechos diferentes na Figura xx, aonde o primeiro vai até o ponto A. Neste primeiro trecho o escoamento ocorre devido exclusivamente à contribuição do lençol freático, fazendo com que a vazão decresça. Entre os pontos A e B acontece a contribuição simultânea dos escoamentos superficial e da base, formando escoamento superficial direto, o qual promove aumento da vazão à medida que aumenta a área de contribuição para o escoamento.

Quando a chuva durar tempo suficiente para que toda a área da bacia hidrográfica contribua para a vazão na seção de controle, atinge-se o ponto B, onde ocorre a vazão de pico, ou seja, o valor máximo para a vazão resultante da precipitação sob análise.

De qualquer forma o ponto B é um máximo da hidrógrafa, mesmo que toda a área da bacia não contribua para a vazão, porém não representando a condição crítica. Caso a chuva tenha duração superior ao tempo de concentração da bacia, a hidrógrafa tenderá a um patamar com flutuações da intensidade de precipitação.

As contribuições dos escoamentos superficiais e de base acontecem no trecho entre os pontos A e B, chamado também de trecho de ascensão do escoamento superficial direto.

Quando a chuva houver terminado, a área de contribuição do escoamento superficial é reduzida gradualmente, como mostra o trecho BC. Este trecho é denominado trecho de depleção do escoamento superficial direto, o qual se encerra no ponto C. Quando é observada apenas a contribuição do escoamento básico, chamamos de curva de depleção de escoamento de base, fase apresentada após o término do trecho C.

O volume escoado superficialmente (VESD) corresponde à área compreendida entre o trecho de reta AC e a hidrógrafa. Para avaliá-la deve-se utilizar qualquer processo de



aproximação como o é a integração numérica, com base, por exemplo, na regra dos trapézios, cuja aplicação resulta:

- Equação – Volume escoado superficialmente

$$\frac{Q_1 + Q_n}{2} + \sum_{i=2}^{n-1} Q_i ;$$
$$VESD = \Delta T$$

Desde que  $\Delta t$  seja constante. Deve-se utilizar para  $\Delta t$  a mesma unidade de tempo da vazão.

O valor encontrado para VESD pode ser transformado em lâmina escoada ou precipitação efetiva (Pe) por meio de:

- Equação – Precipitação efetiva

$$Pe = \frac{VESD}{A_{BH}}$$

Onde:

Pe = precipitação efetiva;

VESD = volume escoado superficialmente direto;

ABH = área da bacia hidrográfica.

A separação do hidrograma em escoamento superficial direto e escoamento básico é muito importante para o estudo das características hidrológicas da bacia e para alguns métodos de previsão de enchentes.

A determinação do hidrograma de projeto de uma bacia hidrográfica depende de dois componentes principais, a separação do volume de escoamento superficial e a propagação deste volume para jusante. Este último componente dos modelos hidrológicos geralmente utiliza da teoria de sistemas lineares, ou seja, o hidrograma unitário (HU) (Tucci, 1993).

O método de HU, apresentado por Le Roy K. Sherman em 1932 e aperfeiçoado mais tarde por Bernard e outros, baseia-se primariamente em determinadas propriedades do hidrograma de escoamento superficial (Pinto, 1976).

O HU é o hidrograma resultante de um escoamento superficial unitário (1 mm, 1cm, 1 polegada) gerado por uma chuva uniforme distribuída sobre a bacia hidrográfica, com intensidade constante de certa duração, constituindo uma característica própria da bacia, refletindo as condições de deflúvio para o desenvolvimento da onda de cheia (Carvalho e Silva, 2006).

### c) Modelo Chuva-Vazão Não Calibrado

#### Método Racional

O método Racional é utilizado para o dimensionamento das redes de drenagem urbana dada sua simplicidade, uma vez que engloba todos os processos em apenas um coeficiente “Coeficiente de Escoamento (C)”. No entanto, não devem ser aplicados em bacias com área superior a 2 km<sup>2</sup>.

Os princípios dessa metodologia são:

- 1) Deve-se considerar a duração da precipitação intensa de projeto igual ao tempo de concentração da bacia. Ao considerar esta igualdade admite-se que a bacia é suficientemente pequena para que esta situação ocorra, pois a duração é

inversamente proporcional à intensidade. Em bacias pequenas, as condições mais críticas ocorrem devido às precipitações convectivas que possuem pequena duração e grande intensidade.

- 2) Adotar um coeficiente único de perdas (coeficiente de escoamento), estimado com base nas características da bacia.
- 3) Não avalia o volume de cheia e a distribuição temporal das vazões.

A equação do método racional é a seguinte:

- Equação – Método Racional

$$Q = 0,27 \cdot C \cdot i \cdot A$$

Onde:

Q = vazão máxima (m<sup>3</sup>/s);

0,027 = correção quando usando a área da bacia em km<sup>2</sup>;

C: coeficiente de escoamento, também conhecido como *run-off* ou deflúvio;

i: intensidade da precipitação (mm/h);

A: área da bacia (km<sup>2</sup>).

A tabela abaixo apresenta alguns valores de C relativo a tipos de ocupação de solo.

Tabela 2 - Valores do coeficiente de deflúvio, C.

Tipo de Ocupação	Coeficiente C
Áreas com edificação; grau de adensamento	-
• Muito grande	0,70 a 0,95
• Grande	0,60 a 0,70
• Médio	0,40 a 0,60
• Pequeno	0,20 a 0,40

Áreas livres: matas, parques, campos	0,05 a 0,20
Pavimentos	0,70 a 0,95
Solos com vegetação	-
• Arenoso	0,05 a 0,15
• Argiloso	0,15 a 0,35

Fonte: RIGHETTO, 1998

O coeficiente de escoamento utilizado no método racional depende das seguintes características:

- Solo;
- Cobertura;
- Tipo de ocupação;
- Tempo de retorno;
- Intensidade da precipitação.
- **Método Racional Modificado**

Este método deve ser utilizado para áreas maiores que 80 ha até 200 ha. A equação seguinte representa o método.

- Equação - Método Racional Modificado

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{360} \cdot D$$

Onde:

$D = 1 - 0,009 \cdot L/2$  (L = comprimento axial da bacia, km).

- **Método de I – Pai – Wu**

Método desenvolvido em 1963 sendo aplicado a áreas maiores que 200 ha até 20.000 ha.

Equação – Método de I – Pai – Wu

$$Q = \frac{C * i * A^{0,90}}{360} * K$$

Sendo que:

$$C * \left( \frac{2}{1+F} \right) * \left( \frac{C}{2+F} \right)$$

$$F = \frac{L}{\sqrt{\frac{A}{\pi}}}$$

Onde:

F = fator de ajuste relacionado com a forma da bacia;

L = comprimento axial da bacia;

A = área da bacia;

K = coeficiente de distribuição espacial da chuva.

## d) Fórmulas Empíricas

A estimativa por meio de fórmulas empíricas deve ser utilizada somente na impossibilidade do emprego de outra metodologia. A utilização das fórmulas empíricas é principalmente alvo de estudos de previsão de enchentes.

## **1.8.2 Regime dos cursos d'água**

De grande importância no estudo das bacias hidrográficas é o conhecimento do sistema de drenagem, ou seja, que tipo de curso d'água está drenando a região de acordo com seu regime. Segundo Carvalho e Silva (2006), uma maneira utilizada para classificar os cursos d'água é a de tomar como base a constância do escoamento com o que se determinam três tipos:

a) Perenes: contém água durante todo o tempo. O lençol freático mantém uma alimentação contínua e não desce nunca abaixo do leito do curso d'água, mesmo durante as secas mais severas.

b) Intermitentes: em geral, escoam durante as estações de chuvas e secam nas de estiagem. Durante as estações chuvosas, transportam todos os tipos de deflúvio, pois o lençol d'água subterrâneo conserva-se acima do leito fluvial e alimentando o curso d'água, o que não ocorre na época de estiagem, quando o lençol freático se encontra em um nível inferior ao do leito.

c) Efêmeros: existem apenas durante ou imediatamente após os períodos de precipitação e só transportam escoamento superficial. A superfície freática se encontra sempre a um nível inferior ao do leito fluvial, não havendo a possibilidade de escoamento de deflúvio subterrâneo.

Os rios proporcionam a forma mais visível de escoamento da água fazendo parte integrante do ciclo hidrológico e alimentado a partir das águas superficiais e subterrâneas (CHRISTOFOLETTI, 1981<sup>3</sup> apud DESTEFANI, 2005). A vazão é uma das principais variáveis que caracteriza um rio, constituindo-se da quantidade de água que passa por uma seção num determinado período de tempo.

As vazões que escoam em um curso d'água são consideradas estocásticas (TUCCI, 2002) sendo variáveis no tempo e no espaço. Essa variabilidade representada pela

---

<sup>3</sup> CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia fluvial. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.

subida e descida das águas consideradas no decorrer de um ano civil (janeiro a dezembro) ou um ano hidrológico (ciclo de vazante-cheia-vazante) corresponde ao regime fluvial ou regime de cursos d'água ou hidrológico (DESTEFANI, 2005).

Tucci (1993) cita que a variabilidade do regime hidrológico é controlada por alguns elementos que formam a bacia hidrográfica ou fatores que nela ocorrem. Dentre eles estão: as condições climáticas, como a precipitação, evapotranspiração e a radiação solar; a geologia; a geomorfologia; os tipos e uso dos solos; a cobertura vegetal e as ações antrópicas.

O regime de um curso d'água se constitui na forma em que é alimentado, ou seja, de acordo com a origem da água que o abastece. Pode ser classificado em pluvial, nival ou misto. O regime pluvial é caracterizado pelos rios que recebem água da chuva, já no regime nival o rio é abastecido pelo derretimento de geleiras. Um exemplo de rio que apresenta regime misto é o rio Amazonas, que suas águas são oriundas de derretimento e de altos níveis pluviométricos.

### **1.9 Transporte de sedimentos**

Quando a água está se movimentando rumo à saída de uma bacia hidrográfica, passa sobre as rochas e os solos que formam ou revestem as vertentes e as calhas da rede de drenagem. Os obstáculos que a água encontra determinam os caminhos que ela vai seguir e a velocidade que se deslocará, propiciando que partículas sejam removidas e transportadas vertente ou rio abaixo, pelo fluxo líquido. Embora eventuais, o deslocamento dos sedimentos carregados pela água podem ocasionar a alteração do ciclo hidrológico, e certamente afetar o uso, a conservação e a gestão dos recursos hídricos (BORDAS & SEMMELMANN, 1993).

A composição do material do leito e as características geométricas e hidráulicas da seção e do trecho do rio são fatores importantes que influenciam na quantidade de sedimentos transportada. Por essa razão qualquer intervenção que altere o equilíbrio natural do rio pode trazer sérias consequências em termos de erosão e deposição de sedimentos.

Transporte e deposição de sedimentos em leitos de cursos d'água são ações naturais que ocorrem de forma lenta e contínua. Porém, esse processo está sendo acelerado pelo homem quando ocupa de forma desordenada e irresponsável as áreas próximas aos rios. A falta de cuidados, como o corte da vegetação, o manejo inadequado do solo e a urbanização acelerada próxima aos rios, são alguns dos fatores que trazem sérias consequências ao meio ambiente e ao homem.

Dentre outras decorrências, podemos citar o assoreamento de reservatórios e rios e, por conseguinte, os alagamentos, redução da qualidade da água para consumo e irrigação, mortandade de espécies aquáticas e impossibilidade de navegação devido à diminuição da lâmina d'água. Os custos para a recuperação de um rio ou reservatório assoreado são extremamente altos, por isso medidas preventivas acompanhadas de um monitoramento sedimentométrico são recomendadas (SCAPIN, 2005).

Righetto (1998) afirma que grande parte do sedimento transportado por um rio, por exemplo, é proveniente da erosão do solo da bacia hidrográfica, retirando significativa quantidade de nutrientes de terras férteis para agricultura. Esse fato pode acontecer por decorrência de chuva em solos desprotegidos, provocando a erosão por um processo físico complexo de desprendimento e transporte de partículas de solo pela ação do impacto das gotas da chuva e pelo arraste do escoamento superficial.

### **1.9.1 Ciclo hidrossedimentológico**



Esse ciclo é paralelo, vinculado fortemente e dependente do ciclo hidrológico. É um ciclo aberto que envolve o deslocamento, o transporte e o depósito de partículas sólidas presentes na superfície da bacia. No entanto, ao contrário das moléculas da água, os sedimentos não terão como voltar ao meio de onde vieram.

A gestão integrada dos recursos hídricos, os riscos de degradação dos solos, dos leitos dos rios e dos ecossistemas fluviais e estaurinos, ou de contaminação de sedimentos por produtos químicos, fizeram com que se fosse dada mais atenção ao ciclo hidrossedimentológico, pois o custo dos impactos decorrentes da remoção não controlada de sedimentos nas bacias hidrográficas é bastante elevado (BORDAS & SEMMELMANN, 1993).

Os principais fenômenos que compõem o ciclo hidrossedimentológico e que regem o deslocamento de partículas sólidas são a desagregação, separação ou erosão, transporte, decantação ou sedimentação, depósito e consolidação. Esses processos são explicados por Bordas e Semmelmann (1993), como apresentado a seguir:

- **Desagregação**

É o desprendimento de partículas sólidas do meio do qual fazem parte, podendo acontecer por reações químicas, flutuações de temperatura, ações mecânicas ou outros fatores naturais. Esses processos deixam uma massa de partículas sólidas exposta à ação do escoamento superficial, que é remanejada pelo movimento das águas. Esse estoque de material sólido é composto por elementos de vários tamanhos e feições, distinguidos como: argila, silte, areia, cascalho, seixo e pedras, pedregulhos ou matacão.

- **Erosão**

Erosão é o processo de deslocamento das partículas sólidas de seu local de origem. Esse deslocamento ocorre quando as forças hidrodinâmicas exercidas pelo escoamento sobre uma partícula ultrapassam a resistência por ela oferecida. A resistência tem sua origem, principalmente, no peso das partículas e nas forças de coesão. A coesão constitui a força de resistência por excelência das partículas mais finas, enquanto o peso da partícula é a principal força resistente para as areias e o material mais graúdo. No primeiro caso, os sedimentos são qualificados de coesivos, no segundo de não coesivos ou granulares.

- **Transporte**

O processo de transporte de material erodido pela água pode ocorrer de diversas formas. As partículas mais pesadas deslocam-se sobre o fundo por rolamento, deslizamento ou, em alguns casos, por saltos curtos, e constituem a chamada descarga sólida de fundo ou arraste. As mais leves deslocam-se no seio do escoamento e constituem a descarga sólida em suspensão. Estas podem ser provenientes da bacia vertente, ou do fundo e paredes da calha, enquanto o arraste é exclusivamente constituído de material encontrado no fundo.

- **Sedimentação ou Decantação**

Neste processo as partículas mais finas transportadas em suspensão, tendem a chegar ao fundo do leito sob ação da gravidade. Pode ainda ocorrer a resistência do meio fluido, impedindo ou reduzindo a queda das partículas para o fundo, principalmente por efeito da turbulência.

- **Depósito**

Entende-se por depósito a parada total da partícula em suspensão recém-decantada sobre o fundo, ou daquela transportada por arraste. Esse processo, por algumas vezes, é confundido com a decantação. No entanto ele se difere, pois uma partícula recém-decantada pode continuar movimentando-se após entrar em contato com o fundo, de acordo com as forças hidrodinâmicas existentes rentes ao fundo.

- **Consolidação**

A consolidação ocorre após o depósito das partículas e corresponde ao acúmulo de partículas sobre o fundo e a compactação do depósito resultante sob efeito do próprio peso dos sedimentos, da pressão hidrostática ou qualquer outro fenômeno que venha a aumentar a densidade dos depósitos (efeito do esvaziamento de uma represa, por exemplo).

Algumas ações de controle podem ser consideradas para evitar as consequências da erosão e o conseqüente transporte de sedimentos. Em pequenas bacias hidrográficas, por exemplo, deve haver o correto manejo do solo na agricultura, considerando o tipo de plantação e respeitando as curvas de nível do terreno. Já nas áreas urbanas, uma das ações é a implantação de um sistema de drenagem eficiente e sua manutenção adequada.

### **1.10 Balanço hídrico**

O balanço hídrico pode ser entendido como o resultado da quantidade de água que entra e sai de um sistema em um determinado intervalo de tempo. Diversas escalas espaciais podem ser analisadas para se contabilizar o balanço hídrico. Em escala global, o “balanço hídrico” é o próprio “ciclo hidrológico”, cujo resultado nos mostrará a

quantidade de água disponível no sistema (no solo, rios, lagos, vegetação úmida e oceanos), ou seja, na biosfera, apresentando um ciclo fechado.

A bacia hidrográfica é o melhor espaço de avaliação do comportamento hídrico, pois tem definido o espaço de entrada, a bacia, o local de saída e a seção de rio que define a bacia hidrográfica (TUCCI, 1993).

Dessa forma, em uma escala intermediária, que pode ser representada por uma microbacia hidrográfica, o balanço hídrico resulta na vazão de água desse sistema. Para períodos em que a chuva é menor do que a demanda atmosférica por vapor d'água, a vazão diminui, ao passo em que nos períodos em que a chuva supera a demanda, a vazão aumenta.

Na escala local, no caso de uma cultura, o balanço hídrico tem por objetivo estabelecer a variação de armazenamento e, conseqüentemente, a disponibilidade de água no solo. Conhecendo-se qual a umidade do solo ou quanto de água este armazena é possível se determinar se a cultura está sofrendo deficiência hídrica, a qual está intimamente ligada aos níveis de rendimento dessa lavoura.

Conhecendo essas características, podemos aplicar a **equação da continuidade da massa**, que afirma que o volume de água de entrada menos o volume de água de saída, deve igualar a variação dos estoques de água na área em um determinado período de tempo. Essa lei é representada pela Equação 20.

- Equação – Continuidade da massa

$$\Delta V = \Sigma I - \Sigma O$$

Sendo:

$\Delta V$  = variação de volume no tempo, que consideraremos de um mês ( $m^3$ );

$\Sigma I$  = somatório dos volumes de água que entram no sistema isolado ( $m^3$ );

$\Sigma O$  = somatória dos volumes de água que saem do sistema isolado ( $m^3$ ).

Dessa forma, as entradas e saídas podem ser determinadas como apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Variáveis de entrada e saída de água do Balanço Hídrico

Entrada de água	Saída de água
Chuva	Evapotranspiração
Orvalho	Escoamento Superficial
Escoamento Superficial	Escoamento Subsuperficial
Escoamento Subsuperficial	Drenagem Profunda
Ascensão capilar	

Fonte: Tomaz, 2006.

De acordo com Tucci (2009), o entendimento do balanço hídrico é um dos fundamentos mais importantes para conhecer os efeitos causados pelo homem sobre o meio natural, disponibilidade hídrica e sustentabilidade ambiental. A determinação do balanço hídrico pode ser realizada para uma camada de solo, para um trecho de rio ou por uma bacia hidrográfica.

O conhecimento desses componentes depende de vários fatores como: precipitação, evapotranspiração potencial (aqui embutidas outras variáveis climáticas), condições do solo e uso do solo, geologia subterrânea.

Os principais objetivos de se estudar o balanço hídrico, são: conhecer o regime hídrico; conhecer as disponibilidades hídricas; conhecer as demandas de uso da água e prestar informações para elaboração de projetos, estudos e gerenciamentos. É de suma

importância para o planejamento agropecuário, principalmente para saber quais são as épocas propícias para plantio e o controle de pragas, para o planejamento de obras de engenharia, previsão e acompanhamento de enchentes, zoneamento de áreas inundáveis, entre outros.

Numa bacia o balanço hídrico é determinado por (TUCCI, 1993):

- Equação – Balanço hídrico

$$S(t+1) = S(t) + (P - E - Q) \cdot Dt$$

Onde:

S (t+1) e S(t) = quantidade de água no tempo t+1 e t;

P = precipitação na área da bacia no intervalo;

E = evapotranspiração real no intervalo de tempo na bacia;

Q = vazão de saída no intervalo de tempo Dt.

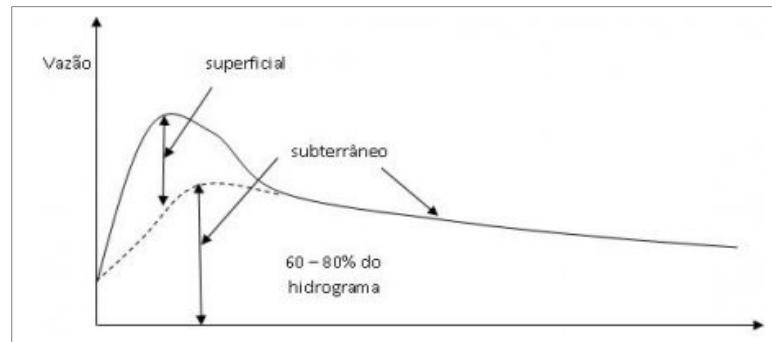
Quando o período de avaliação (Dt) é muito longo a diferença de armazenamento (S) pode ser considerada desprezível e, dessa forma temos:

- Equação

$$P - E = Q$$

A vazão Q no tempo é o hidrograma de saída da bacia e representa o escoamento superficial (superfície das bacias) e subterrâneo (gerado pelos aquíferos) (Figura 9).

Figura 9 – Hidrograma de saída



Fonte: Tucci, 2009. Disponível em: Blog do Tucci

(<http://rhama.net/wordpress/?p=116>)