

# TEA018 - Hidrologia Ambiental

## Aula 01 - Introdução (Parte 2)

### Ciclo hidrológico, conceito de sistema e classificação

Emílio G. F. Mercuri

[www.ambiental.ufpr.br/professores/mercuri](http://www.ambiental.ufpr.br/professores/mercuri)

*Professor DEA / UFPR*



# SUMÁRIO

## INTRODUÇÃO

Ciclo Hidrológico

Balço hídrico

Exemplo 1: tempo de residência

## CONCEITO DE SISTEMA

## MODELO HIDROLÓGICO

Classificação de Modelos Hidrológicos

## Exemplo: Reservatório de cheias

Enunciado

Solução no Google Colaboratory

# CICLO HIDROLÓGICO

Água na **hidrosfera**: 15 km na atmosfera e 1 km na litosfera, a crosta terrestre.

## Ciclo Hidrológico

**Evaporação** dos oceanos e da superfície terrestre → atmosfera

# CICLO HIDROLÓGICO

Água na **hidrosfera**: 15 km na atmosfera e 1 km na litosfera, a crosta terrestre.

## Ciclo Hidrológico

**Evaporação** dos oceanos e da superfície terrestre → atmosfera

**Vapor de água** → transporte → condensação e precipitação

# CICLO HIDROLÓGICO

Água na **hidrosfera**: 15 km na atmosfera e 1 km na litosfera, a crosta terrestre.

## Ciclo Hidrológico

**Evaporação** dos oceanos e da superfície terrestre → atmosfera

**Vapor de água** → transporte → condensação e precipitação

**Água precipitada** pode

# CICLO HIDROLÓGICO

Água na **hidrosfera**: 15 km na atmosfera e 1 km na litosfera, a crosta terrestre.

## Ciclo Hidrológico

**Evaporação** dos oceanos e da superfície terrestre → atmosfera

**Vapor de água** → transporte → condensação e precipitação

**Água precipitada** pode

Ser **interceptada** pela vegetação

# CICLO HIDROLÓGICO

Água na **hidrosfera**: 15 km na atmosfera e 1 km na litosfera, a crosta terrestre.

## Ciclo Hidrológico

**Evaporação** dos oceanos e da superfície terrestre → atmosfera

**Vapor de água** → transporte → condensação e precipitação

**Água precipitada** pode

Ser **interceptada** pela vegetação

Tornar-se um **fluxo superficial**

# CICLO HIDROLÓGICO

Água na **hidrosfera**: 15 km na atmosfera e 1 km na litosfera, a crosta terrestre.

## Ciclo Hidrológico

**Evaporação** dos oceanos e da superfície terrestre → atmosfera

**Vapor de água** → transporte → condensação e precipitação

**Água precipitada** pode

Ser **interceptada** pela vegetação

Tornar-se um **fluxo superficial**

**Infiltrar-se** no solo



# CICLO HIDROLÓGICO

Água na **hidrosfera**: 15 km na atmosfera e 1 km na litosfera, a crosta terrestre.

## Ciclo Hidrológico

**Evaporação** dos oceanos e da superfície terrestre → atmosfera

**Vapor de água** → transporte → condensação e precipitação

**Água precipitada** pode

Ser **interceptada** pela vegetação

Tornar-se um **fluxo superficial**

**Infiltrar-se** no solo

fluir através do solo como **fluxo subsuperficial**

# CICLO HIDROLÓGICO

Água na **hidrosfera**: 15 km na atmosfera e 1 km na litosfera, a crosta terrestre.

## Ciclo Hidrológico

**Evaporação** dos oceanos e da superfície terrestre → atmosfera

**Vapor de água** → transporte → condensação e precipitação

**Água precipitada** pode

Ser **interceptada** pela vegetação

Tornar-se um **fluxo superficial**

**Infiltrar-se** no solo

fluir através do solo como **fluxo subsuperficial**

descarregar em correntes como **escoamento superficial**

# CICLO HIDROLÓGICO

Água na **hidrosfera**: 15 km na atmosfera e 1 km na litosfera, a crosta terrestre.

## Ciclo Hidrológico

**Evaporação** dos oceanos e da superfície terrestre → atmosfera

**Vapor de água** → transporte → condensação e precipitação

**Água precipitada** pode

Ser **interceptada** pela vegetação

Tornar-se um **fluxo superficial**

**Infiltrar-se** no solo

fluir através do solo como **fluxo subsuperficial**

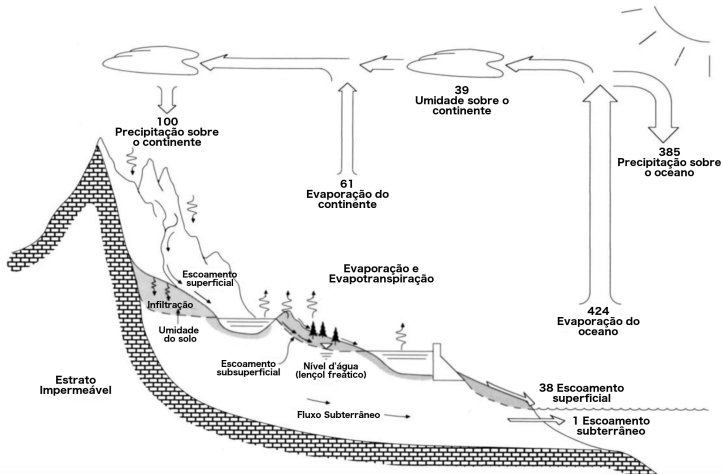
descarregar em correntes como **escoamento superficial**

fluir para e de **aquíferos**

# CICLO HIDROLÓGICO

## Balço hídrico anual global

Os componentes do ciclo em relação a uma precipitação anual de 100 mm.



# ÁGUA NO PLANETA TERRA

## Estimativa da distribuição da água

### Estimated world water quantities

Item	Area (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	Volume (km <sup>3</sup> )	Percent of total water	Percent of fresh water
Oceans	361.3	1,338,000,000	96.5	
Groundwater				
Fresh	134.8	10,530,000	0.76	30.1
Saline	134.8	12,870,000	0.93	
Soil Moisture	82.0	16,500	0.0012	0.05
Polar ice	16.0	24,023,500	1.7	68.6
Other ice and snow	0.3	340,600	0.025	1.0
Lakes				
Fresh	1.2	91,000	0.007	0.26
Saline	0.8	85,400	0.006	
Marshes	2.7	11,470	0.0008	0.03
Rivers	148.8	2,120	0.0002	0.006
Biological water	510.0	1,120	0.0001	0.003
<u>Atmospheric water</u>	510.0	<u>12,900</u>	0.001	0.04
Total water	510.0	1,385,984,610	100	
Fresh water	148.8	35,029,210	2.5	100

Table from World Water Balance and Water Resources of the Earth, Copyright, UNESCO, 1978.

# BALANÇO GLOBAL DE ÁGUA ANUAL

## Estimativa da distribuição da água

### Global annual water balance

		Ocean	Land
Area (km <sup>2</sup> )		361,300,000	148,800,000
<u>Precipitation</u>	(km <sup>3</sup> /yr)	<u>458,000</u>	<u>119,000</u>
	(mm/yr)	1270	800
	(in/yr)	50	31
Evaporation	(km <sup>3</sup> /yr)	505,000	72,000
	(mm/yr)	1400	484
	(in/yr)	55	19
Runoff to ocean			
Rivers	(km <sup>3</sup> /yr)	—	44,700
Groundwater	(km <sup>3</sup> /yr)	—	2200
Total runoff	(km <sup>3</sup> /yr)	—	47,000
	(mm/yr)	—	316
	(in/yr)	—	12

Table from World Water Balance and Water Resources of the Earth, Copyright, UNESCO, 1978

# EXEMPLO 1

## ***Estime o tempo de residência da umidade atmosférica global***

- ▶ O tempo de residência  $T_r$  representa a duração média para a passagem de uma molécula de água em um subsistema do ciclo hidrológico.

# EXEMPLO 1

## Estime o *tempo de residência da umidade atmosférica global*

- ▶ O tempo de residência  $T_r$  representa a duração média para a passagem de uma molécula de água em um subsistema do ciclo hidrológico.
- ▶ Cálculo:

$$T_r = \frac{V}{Q} \quad (1)$$



# EXEMPLO 1

## Estime o *tempo de residência* da umidade atmosférica global

- ▶ O tempo de residência  $T_r$  representa a duração média para a passagem de uma molécula de água em um subsistema do ciclo hidrológico.
- ▶ Cálculo:

$$T_r = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

- ▶ O volume de umidade atmosférico é 12.900 km<sup>3</sup> (Tabela: Água no Planeta Terra).

# EXEMPLO 1

## Estime o tempo de residência da umidade atmosférica global

- ▶ O tempo de residência  $T_r$  representa a duração média para a passagem de uma molécula de água em um subsistema do ciclo hidrológico.
- ▶ Cálculo:

$$T_r = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

- ▶ O volume de umidade atmosférico é 12.900 km<sup>3</sup> (Tabela: Água no Planeta Terra).
- ▶ O fluxo de saída de atmosfera da atmosfera como precipitação é 458.000 + 119.000 = 577.000 km<sup>3</sup> Balanço global de água anual

# EXEMPLO 1

## Estime o tempo de residência da umidade atmosférica global

- ▶ O tempo de residência  $T_r$  representa a duração média para a passagem de uma molécula de água em um subsistema do ciclo hidrológico.
- ▶ Cálculo:

$$T_r = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

- ▶ O volume de umidade atmosférico é 12.900 km<sup>3</sup> (Tabela: Água no Planeta Terra).
- ▶ O fluxo de saída de atmosfera da atmosfera como precipitação é 458.000 + 119.000 = 577.000 km<sup>3</sup> Balanço global de água anual
- ▶ Portanto, o **tempo de residência** é:

$$T_r = \frac{12.900}{577.000} = 0,022 \text{ anos} = 8,2 \text{ dias}$$

# EXEMPLO 1

## Estime o tempo de residência da umidade atmosférica global

- ▶ O tempo de residência  $T_r$  representa a duração média para a passagem de uma molécula de água em um subsistema do ciclo hidrológico.
- ▶ Cálculo:

$$T_r = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

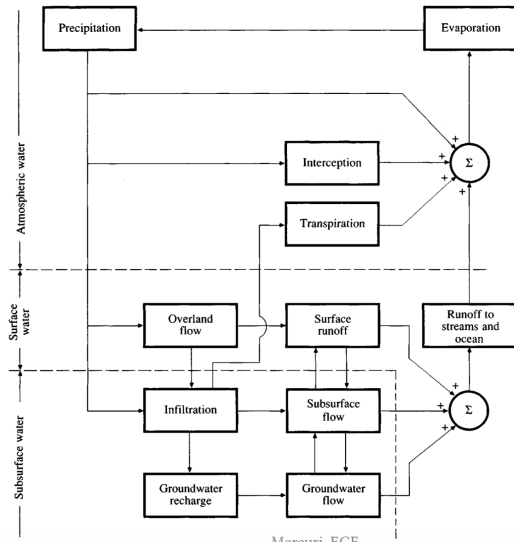
- ▶ O volume de umidade atmosférico é 12.900 km<sup>3</sup> (Tabela: Água no Planeta Terra).
- ▶ O fluxo de saída de atmosfera da atmosfera como precipitação é 458.000 + 119.000 = 577.000 km<sup>3</sup> Balanço global de água anual
- ▶ Portanto, o **tempo de residência** é:

$$T_r = \frac{12.900}{577.000} = 0,022 \text{ anos} = 8,2 \text{ dias}$$

- ▶ Curto tempo de residência → dificuldade de realizar previsões meteorológicas!

# CONCEITO DE SISTEMA HIDROLÓGICO

Ciclo hidrológico: conjunto de subsistemas



# CONCEITO DE SISTEMA HIDROLÓGICO

**O sistema é um volume de controle (caixa preta)**

- ▶ Definição formal:

# CONCEITO DE SISTEMA HIDROLÓGICO

## O sistema é um volume de controle (caixa preta)

- Definição formal:

**Um sistema hidrológico é definido como uma estrutura ou volume no espaço, envolto por uma superfície, que aceita água e outras entradas, opera internamente, e produz as saídas.**

# CONCEITO DE SISTEMA HIDROLÓGICO

## O sistema é um volume de controle (caixa preta)

- ▶ Definição formal:

**Um sistema hidrológico é definido como uma estrutura ou volume no espaço, envolto por uma superfície, que aceita água e outras entradas, opera internamente, e produz as saídas.**

- ▶ Aplicar as Leis de conservação de massa, energia e leis de Newton



# CONCEITO DE SISTEMA HIDROLÓGICO

## O sistema é um volume de controle (caixa preta)

- ▶ Definição formal:

**Um sistema hidrológico é definido como uma estrutura ou volume no espaço, envolto por uma superfície, que aceita água e outras entradas, opera internamente, e produz as saídas.**

- ▶ Aplicar as Leis de conservação de massa, energia e leis de Newton
- ▶ Estrutura (para fluxos de superfície e subsuperfície) ou volume no espaço (para o fluxo de umidade na atmosfera) → totalidade de *caminhos de fluxo* que a água pode passar desde o ponto onde entra no sistema até o ponto em que sai.

# CONCEITO DE SISTEMA HIDROLÓGICO

## O sistema é um volume de controle (caixa preta)

- ▶ Definição formal:

**Um sistema hidrológico é definido como uma estrutura ou volume no espaço, envolto por uma superfície, que aceita água e outras entradas, opera internamente, e produz as saídas.**

- ▶ Aplicar as Leis de conservação de massa, energia e leis de Newton
- ▶ Estrutura (para fluxos de superfície e subsuperfície) ou volume no espaço (para o fluxo de umidade na atmosfera) → totalidade de *caminhos de fluxo* que a água pode passar desde o ponto onde entra no sistema até o ponto em que sai.
- ▶ Processos físicos, químicos e biológicos podem ocorrer dentro do sistema.

# CONCEITO DE SISTEMA HIDROLÓGICO

## O sistema é um volume de controle (caixa preta)

- ▶ Definição formal:

**Um sistema hidrológico é definido como uma estrutura ou volume no espaço, envolto por uma superfície, que aceita água e outras entradas, opera internamente, e produz as saídas.**

- ▶ Aplicar as Leis de conservação de massa, energia e leis de Newton
- ▶ Estrutura (para fluxos de superfície e subsuperfície) ou volume no espaço (para o fluxo de umidade na atmosfera) → totalidade de *caminhos de fluxo* que a água pode passar desde o ponto onde entra no sistema até o ponto em que sai.
- ▶ Processos físicos, químicos e biológicos podem ocorrer dentro do sistema.
- ▶ Na análise hidrológica trabalharemos com: água, ar e calor.

# MODELO HIDROLÓGICO

**Modelo hidrológico: transformação do sistema → formulação matemática**

- Objetivo da análise hidrológica:

# MODELO HIDROLÓGICO

**Modelo hidrológico: transformação do sistema → formulação matemática**

- Objetivo da análise hidrológica:

**Estudar o comportamento dos sistemas e prever as saídas.**

# MODELO HIDROLÓGICO

## Modelo hidrológico: transformação do sistema → formulação matemática

- Objetivo da análise hidrológica:

**Estudar o comportamento dos sistemas e prever as saídas.**

Sejam as entradas  $I(t)$  e saídas  $Q(t)$  funções do tempo  $t$ .

# MODELO HIDROLÓGICO

## Modelo hidrológico: transformação do sistema → formulação matemática

- Objetivo da análise hidrológica:

**Estudar o comportamento dos sistemas e prever as saídas.**

Sejam as entradas  $I(t)$  e saídas  $Q(t)$  funções do tempo  $t$ .

**Transformação:**

$$Q(t) = \Omega I(t)$$

# MODELO HIDROLÓGICO

## Modelo hidrológico: transformação do sistema → formulação matemática

- Objetivo da análise hidrológica:

**Estudar o comportamento dos sistemas e prever as saídas.**

Sejam as entradas  $I(t)$  e saídas  $Q(t)$  funções do tempo  $t$ .

**Transformação:**

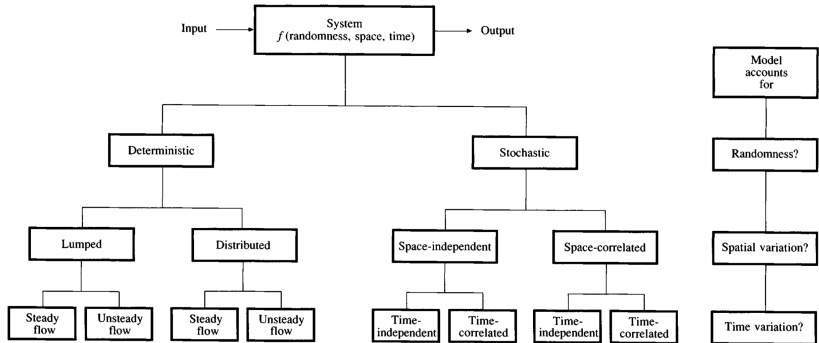
$$Q(t) = \Omega I(t)$$

$\Omega$ : função de transferência (operador algébrico)



# CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

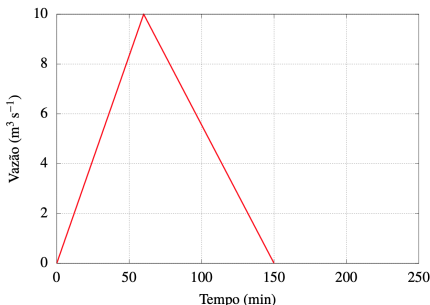
**Há aleatoriedade ou variabilidade espacial ou temporal na representação do fenômeno hidrológico?**



## EXEMPLO 2

Um reservatório de acumulação de cheias urbano tem uma área horizontal  $A = 100000 \text{ m}^2$  e paredes verticais. O reservatório está inicialmente vazio, e recebe uma cheia  $I(t)$  mostrada em vermelho na figura. O reservatório possui um vertedor de soleira livre e largura  $L = 20 \text{ m}$ . Use equação de descarga para um vertedor  $Q = CLH^{3/2}$ , sendo que no SI  $C = \alpha\sqrt{g} = 1.545$ , e obtenha a vazão efluente  $O(t)$  em função do tempo, de 1 em 1 minuto. Resolva o problema usando um método de diferenças finitas para a equação de balanço hídrico do reservatório,

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t)$$



## SOLUÇÃO EXEMPLO 2

As paredes do reservatório de acumulação são verticais:  $S = AH$

## SOLUÇÃO EXEMPLO 2

As paredes do reservatório de acumulação são verticais:  $S = AH$

No instante inicial, o reservatório está vazio:  $S(0) = H(0) = 0$

## SOLUÇÃO EXEMPLO 2

As paredes do reservatório de acumulação são verticais:  $S = AH$

No instante inicial, o reservatório está vazio:  $S(0) = H(0) = 0$

A vazão afluente é “triangular”, com duas retas cujas equações são facilmente obtidas:

$$I(t) = \begin{cases} t/360, & 0 \leq t \leq 3600 \\ 50/3 - t/540 & 3600 < t \leq 9000 \end{cases}$$

## SOLUÇÃO EXEMPLO 2

As paredes do reservatório de acumulação são verticais:  $S = AH$

No instante inicial, o reservatório está vazio:  $S(0) = H(0) = 0$

A vazão afluente é “triangular”, com duas retas cujas equações são facilmente obtidas:

$$I(t) = \begin{cases} t/360, & 0 \leq t \leq 3600 \\ 50/3 - t/540 & 3600 < t \leq 9000 \end{cases}$$

Convertemos as equações de o gráfico da figura 1 para  $t$  em segundos. A equação diferencial que temos que resolver é:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t),$$

$$S = AH,$$

$$O(t) = \alpha\sqrt{gL}[H(t)]^{3/2},$$

$$\frac{d[AH]}{dt} + \alpha\sqrt{gL}[H(t)]^{3/2} = I(t)$$

$$\frac{dH}{dt} + \left[ \frac{\alpha\sqrt{gL}}{A} \right] H^{3/2} = \frac{I(t)}{A},$$

$$\frac{dH}{dt} + bH^{3/2} = f(t),$$

$$b = \frac{\alpha\sqrt{gL}}{A}, \quad f(t) = \frac{I(t)}{A}$$

## SOLUÇÃO EXEMPLO 2

A equação diferencial:

$$\frac{dH}{dt} + bH^{3/2} = f(t),$$

$$b = \frac{\alpha\sqrt{g}L}{A}, \quad f(t) = \frac{I(t)}{A}$$

## SOLUÇÃO EXEMPLO 2

A equação diferencial:

$$\frac{dH}{dt} + bH^{3/2} = f(t),$$
$$b = \frac{\alpha\sqrt{g}L}{A}, \quad f(t) = \frac{I(t)}{A}$$

Com condição inicial  $H(0) = 0$  e  $f(t)$  variando como:

$$I(t) = \begin{cases} t/360, & 0 \leq t \leq 3600 \\ 50/3 - t/540 & 3600 < t \leq 9000 \end{cases}$$



## SOLUÇÃO EXEMPLO 2

A equação diferencial:

$$\frac{dH}{dt} + bH^{3/2} = f(t),$$
$$b = \frac{\alpha\sqrt{g}L}{A}, \quad f(t) = \frac{I(t)}{A}$$

Com condição inicial  $H(0) = 0$  e  $f(t)$  variando como:

$$I(t) = \begin{cases} t/360, & 0 \leq t \leq 3600 \\ 50/3 - t/540 & 3600 < t \leq 9000 \end{cases}$$

Discretização em Diferenças Finitas:

$$\frac{H_{n+1} - H_n}{\Delta t} + bH_n^{3/2} = f(t_n)$$
$$H_{n+1} = H_n + \Delta t \left[ f(t_n) - bH_n^{3/2} \right]$$

## SOLUÇÃO EXEMPLO 2

A equação diferencial:

$$\frac{dH}{dt} + bH^{3/2} = f(t),$$
$$b = \frac{\alpha\sqrt{g}L}{A}, \quad f(t) = \frac{I(t)}{A}$$

Com condição inicial  $H(0) = 0$  e  $f(t)$  variando como:

$$I(t) = \begin{cases} t/360, & 0 \leq t \leq 3600 \\ 50/3 - t/540 & 3600 < t \leq 9000 \end{cases}$$

Discretização em Diferenças Finitas:

$$\frac{H_{n+1} - H_n}{\Delta t} + bH_n^{3/2} = f(t_n)$$
$$H_{n+1} = H_n + \Delta t \left[ f(t_n) - bH_n^{3/2} \right]$$

Código no **Google Colab!**

[https://drive.google.com/file/d/1vcRktvLEoB6eZqUPh6wZi-KuiInXMsvm/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1vcRktvLEoB6eZqUPh6wZi-KuiInXMsvm/view?usp=drive_link)