



Conceitos e Fundamentos de Modelagem Hidrológica

Camilo Daleles Rennó

Coordenação-Geral de Ciências da Terra

Divisão de Observação da Terra e Geoinformática

camilo.renno@inpe.br

<http://www.dpi.inpe.br/~camilo>

CAP-378 Tópicos em Observação da Terra

Julho de 2022



Roteiro

- Aspectos Gerais de Hidrologia
- O Ciclo Hidrológico e seus componentes
 - o papel da vegetação (interceptação e evapotranspiração)
 - o papel do solo (infiltração, percolação e armazenamento)
- Modelagem Hidrológica

Hidrologia

Definição: é a ciência que estuda a distribuição, circulação e comportamento da água no sistema terrestre. Também estuda suas propriedades físico-químicas e sua interação com o meio ambiente (biótico e abiótico).

Hidrometeorologia - estudo da água na atmosfera

Oceanografia - estudo dos oceanos

Limnologia - estudo de águas interiores (lagos e reservatórios)

Fluviologia - estudo de rios e cursos d'água

Glaciologia - estudo da água na forma de neve e gelo

Hidrogeologia - estudo das águas subterrâneas

Hidrologia de superfície - estudo das águas superficiais (bacias hidrográficas)

Ecohidrologia - estudo das interações entre a água e ecossistemas

Hidrologia

- Aplicações

- » Planejamento, construção e operação de projetos de aproveitamento de recursos hídricos (usinas hidrelétricas, controle de cheias, abastecimento de água, navegação, irrigação, etc.)
- » Entendimento dos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra
- » Entendimento dos impactos das mudanças climáticas
- » Alertas de eventos extremos
- » Ecohidrologia

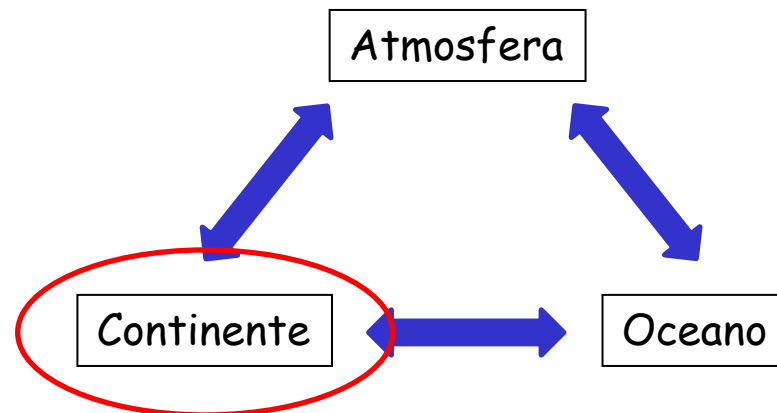
- Ferramentas

- » Observações: medições *in situ* e dados derivados de sensores remotos
- » Modelagem Hidrológica: várias escalas de entendimento e previsão dos processos

O Ciclo Hidrológico

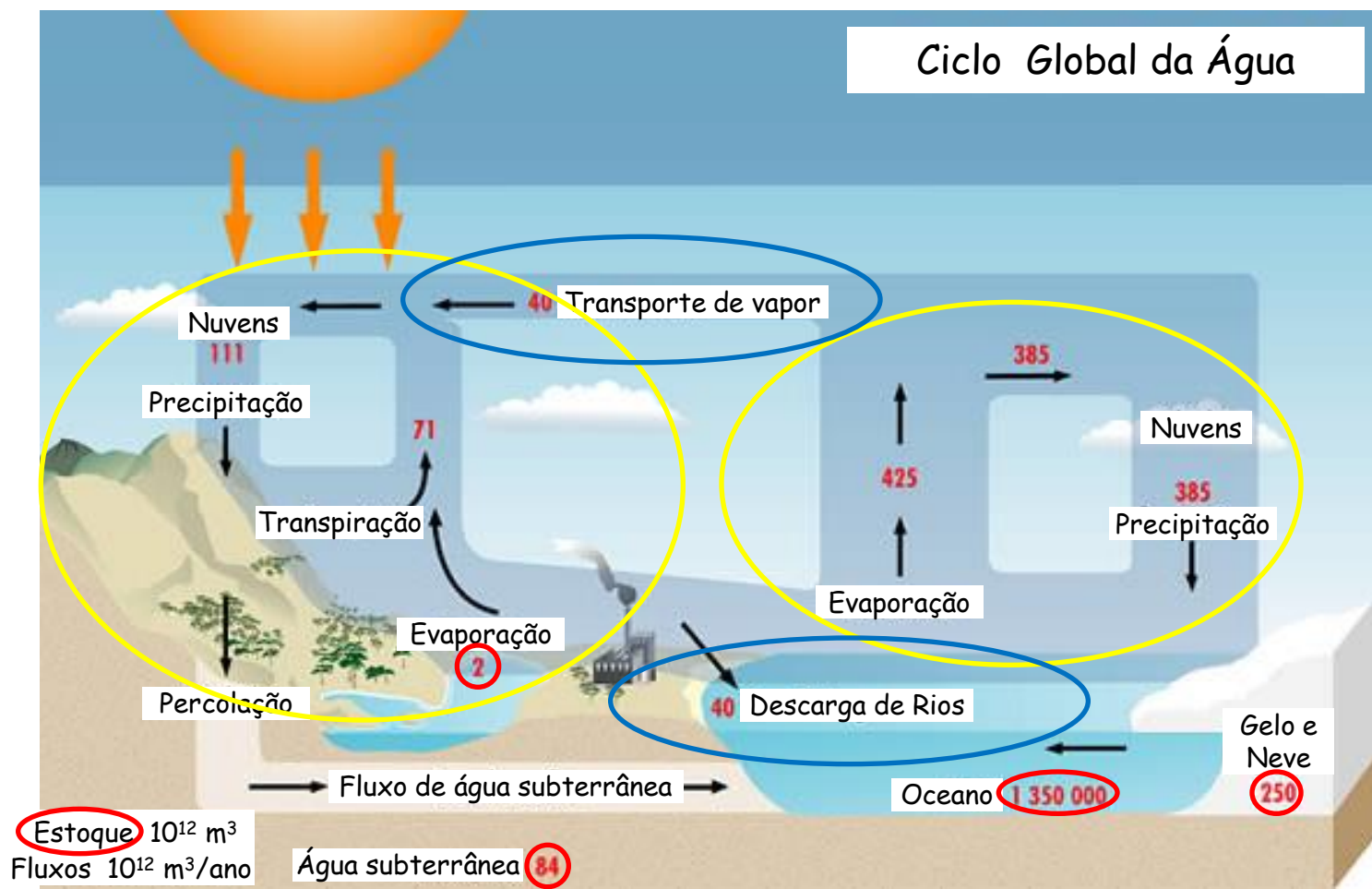
O ciclo hidrológico é um fenômeno global de circulação da água em suas 3 fases: gasosa (vapor), líquida (chuva e escoamento) e sólida (gelo e neve).

É um sistema fechado apenas em nível global.



ênfase desta apresentação

O Ciclo Hidrológico Global



Níveis de Detalhamento

Escala Local (Pontual)

Distribuição da água no solo

Processos unidimensionais

Escala de Vertente

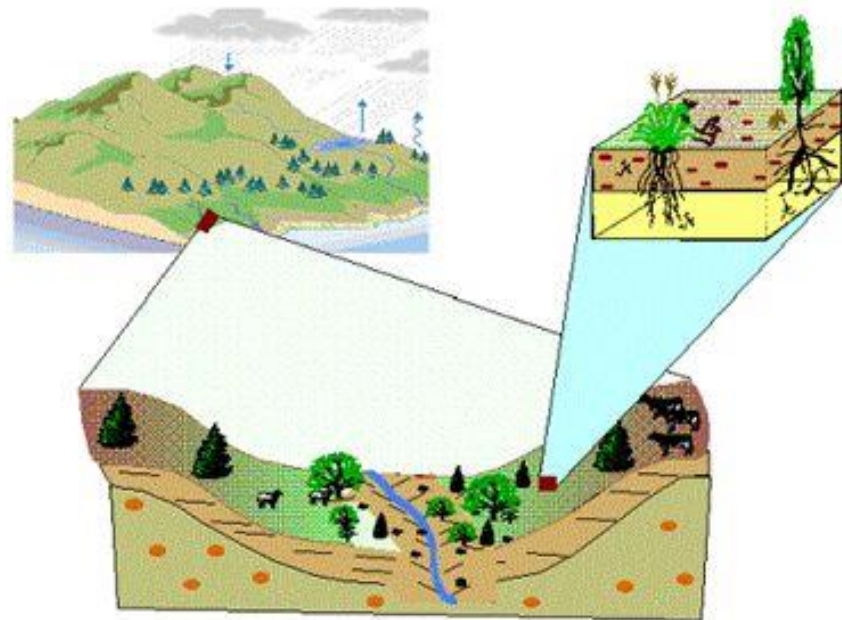
Mecanismos de geração de escoamento direto e de base

Processos bidimensionais

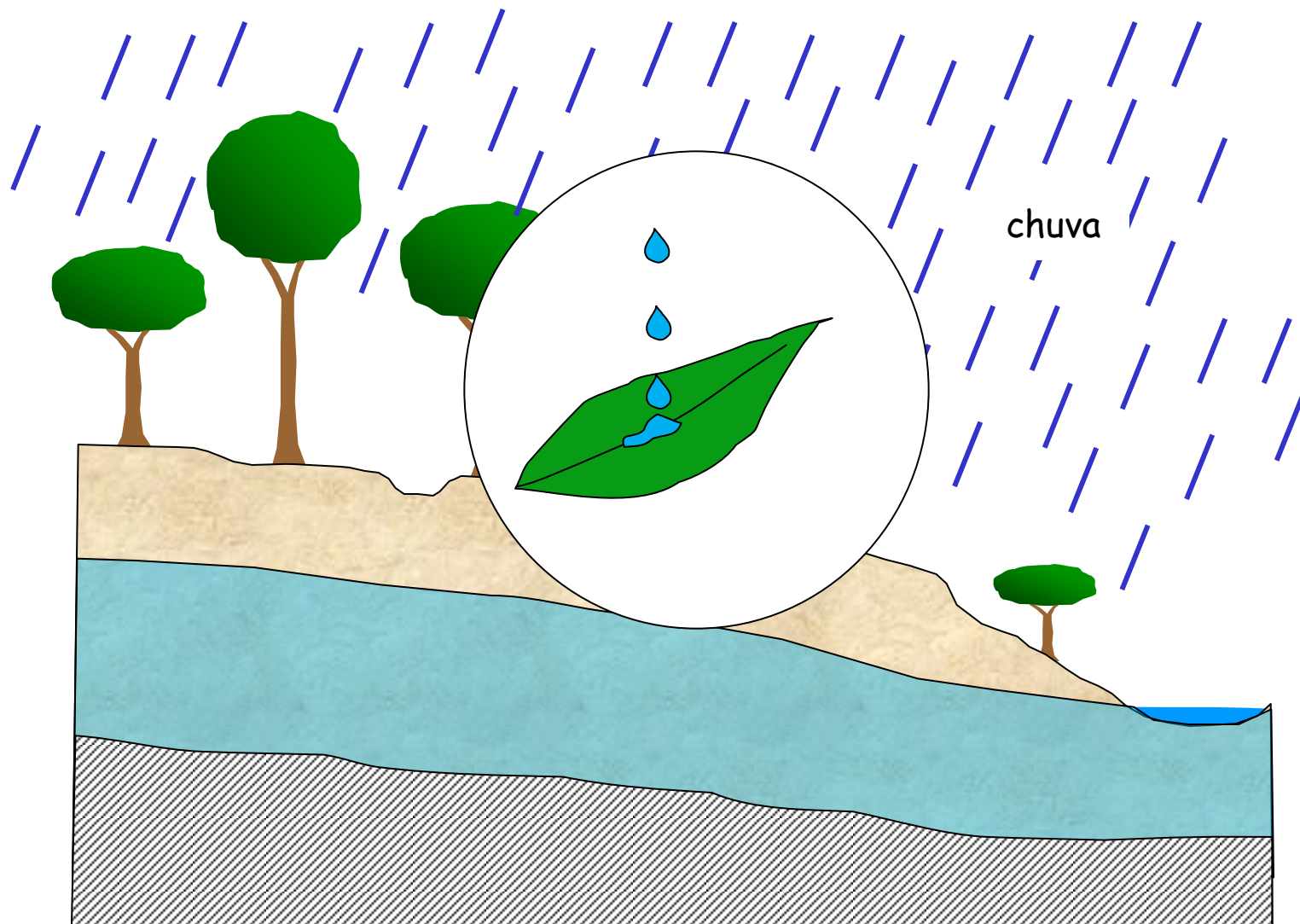
Escala de Bacia Hidrográfica

Variação espacial e temporal de processos - recarga

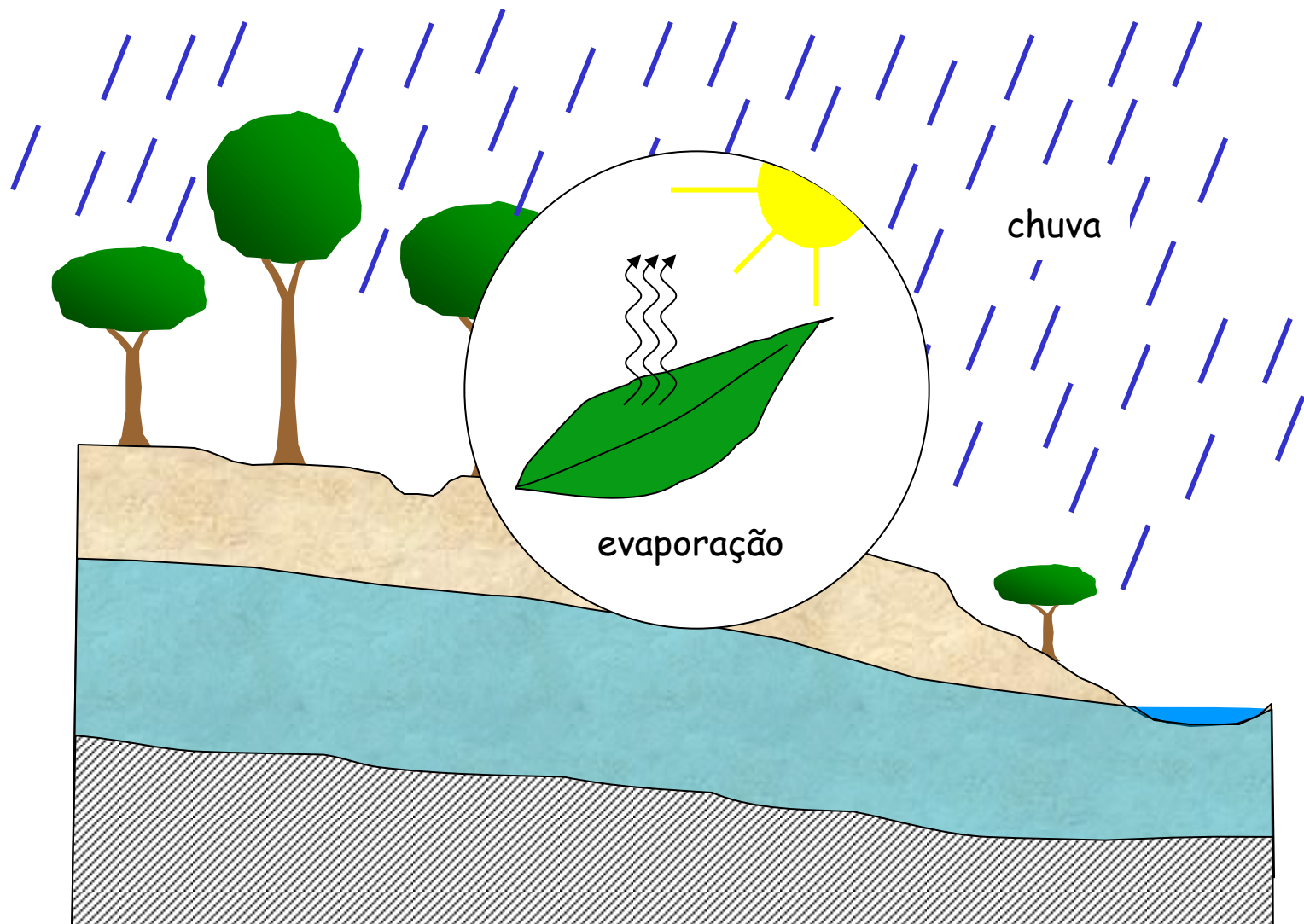
Processos tridimensionais



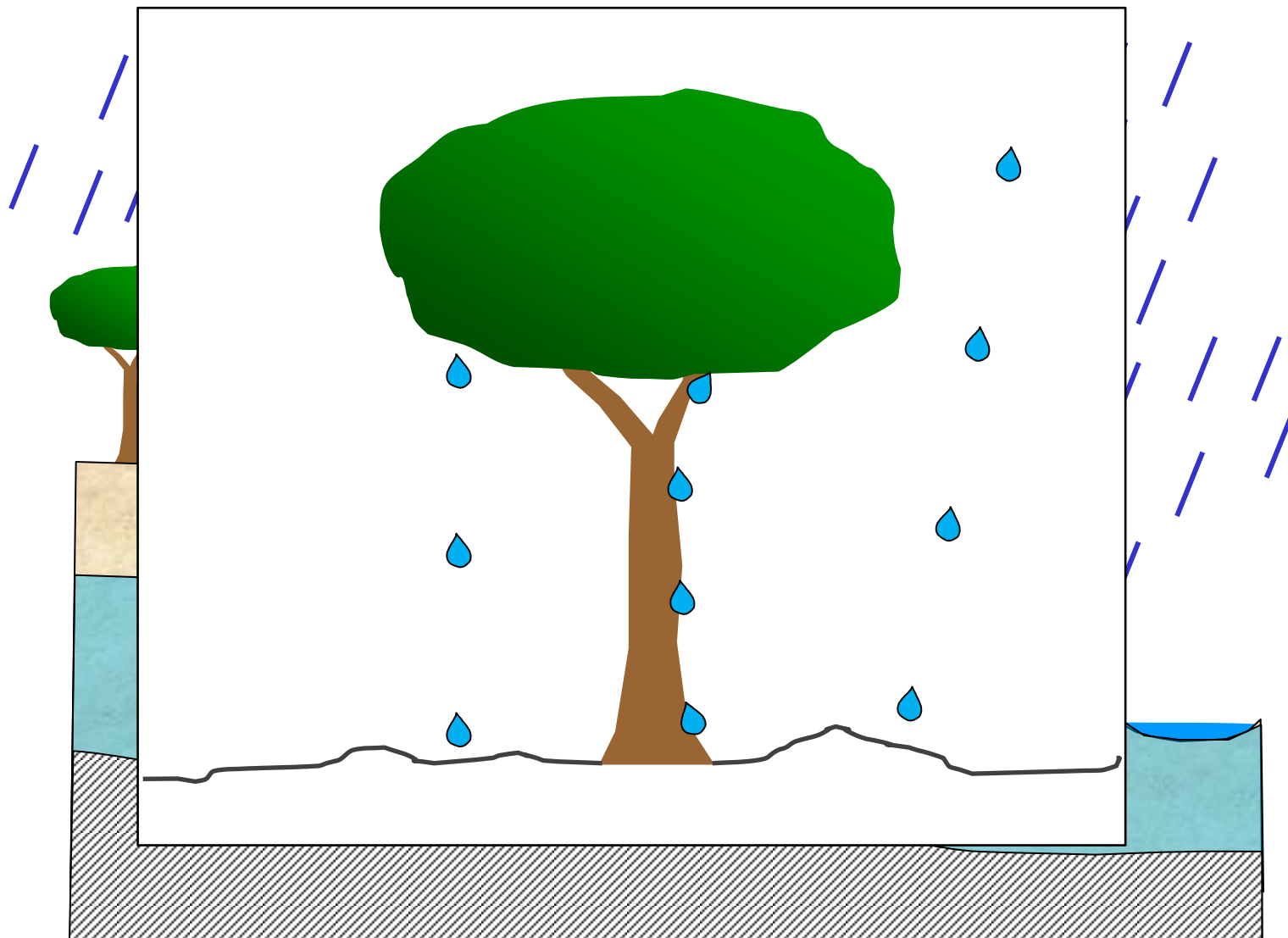
Componentes do Ciclo Hidrológico



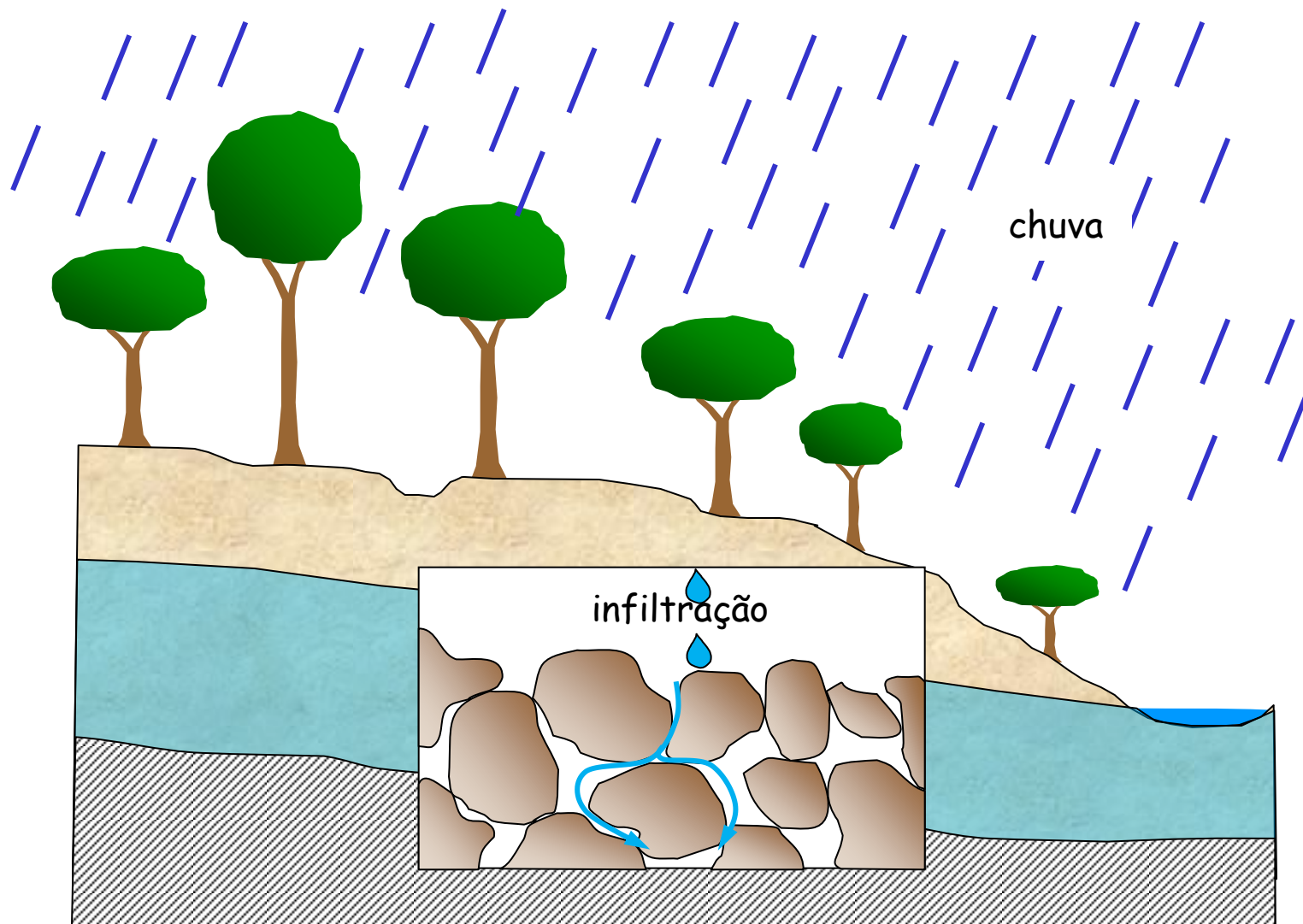
Componentes do Ciclo Hidrológico



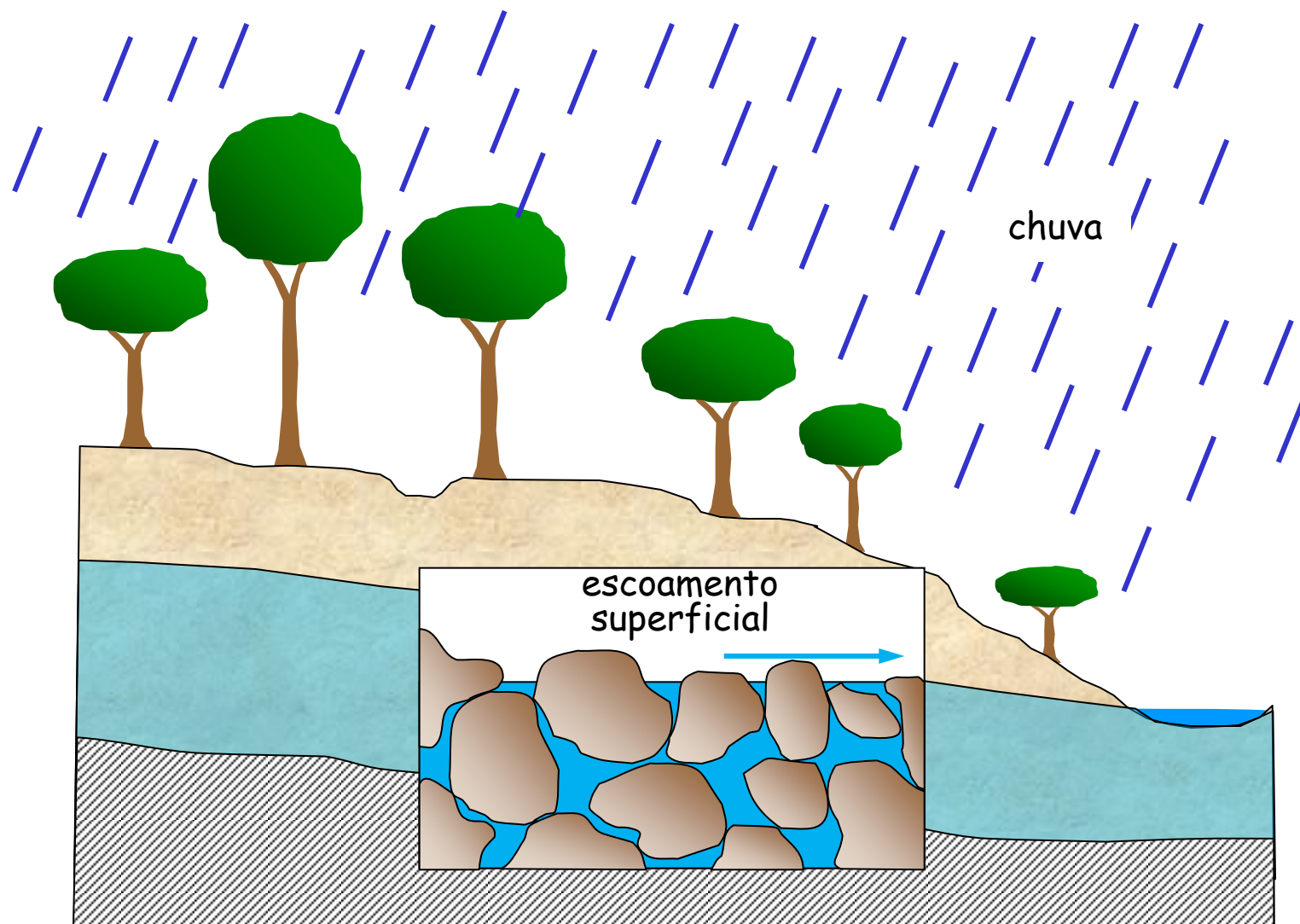
Componentes do Ciclo Hidrológico



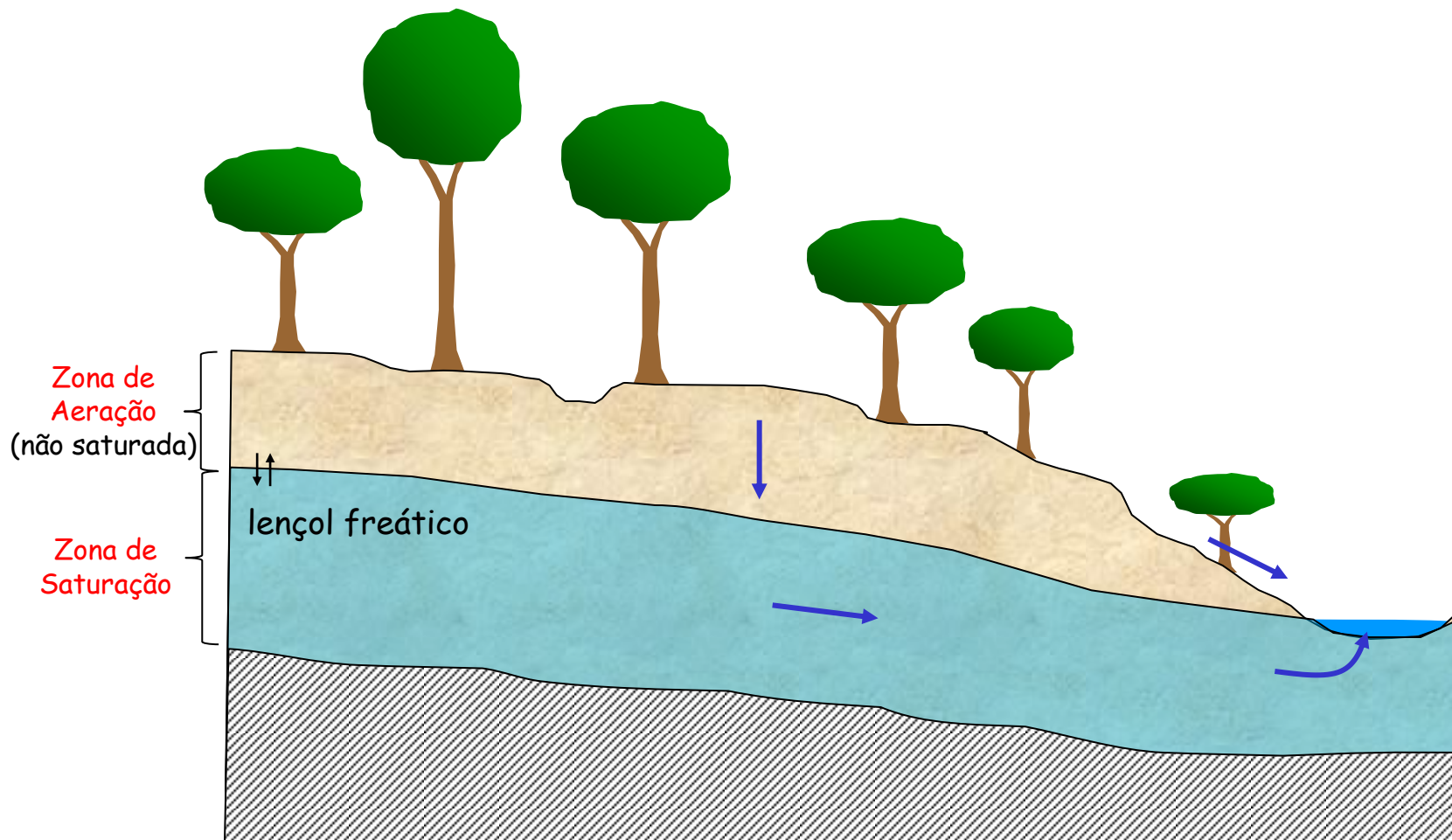
Componentes do Ciclo Hidrológico



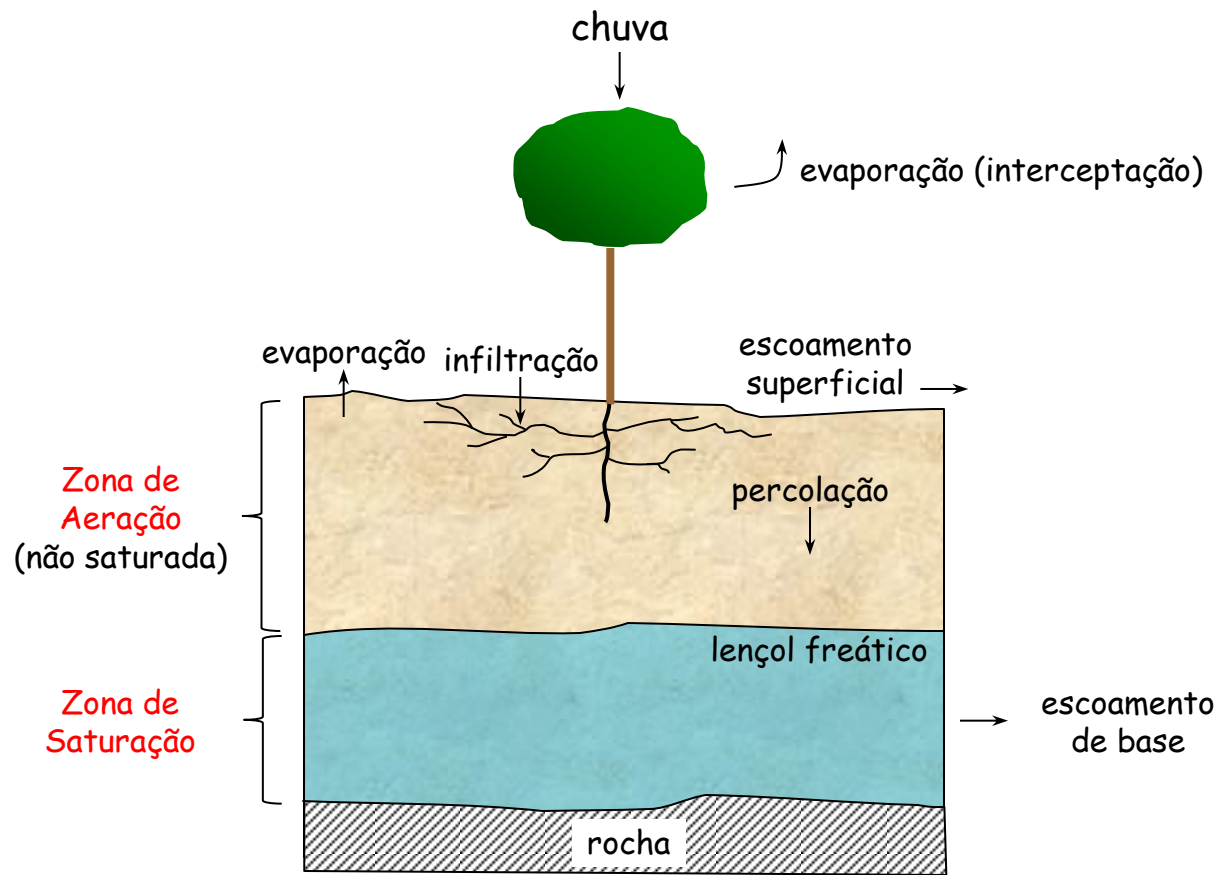
Componentes do Ciclo Hidrológico



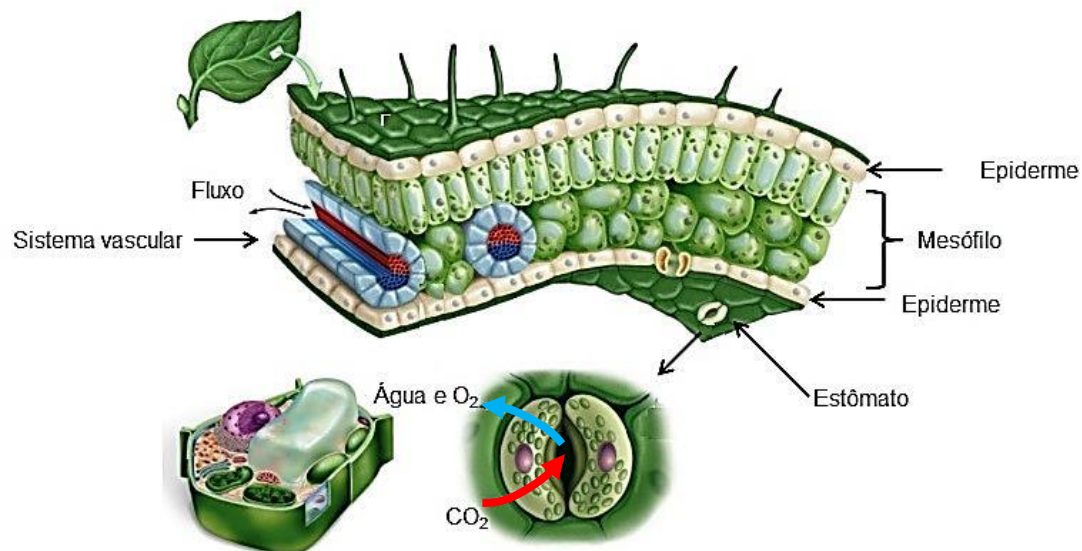
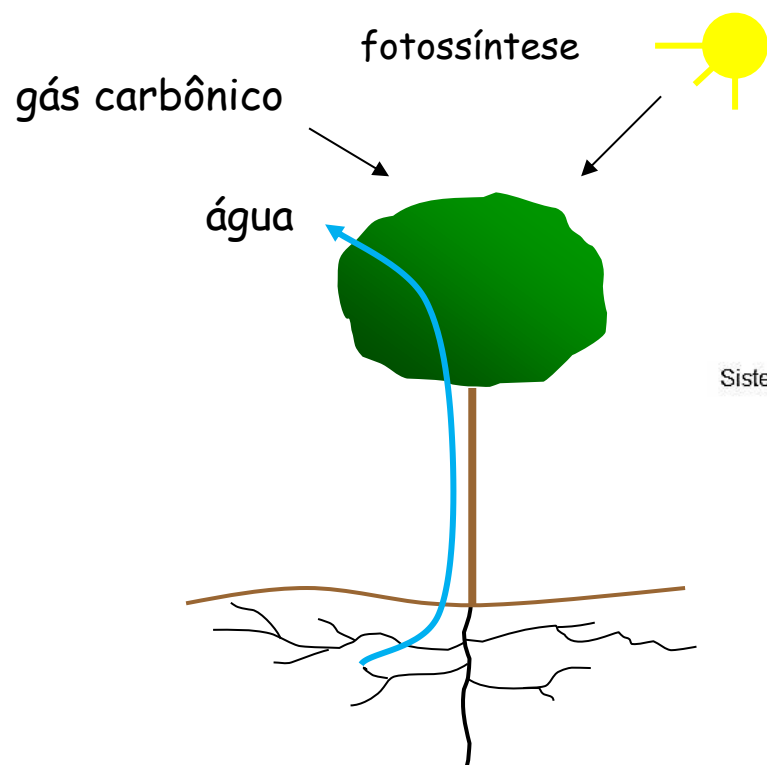
Componentes do Ciclo Hidrológico



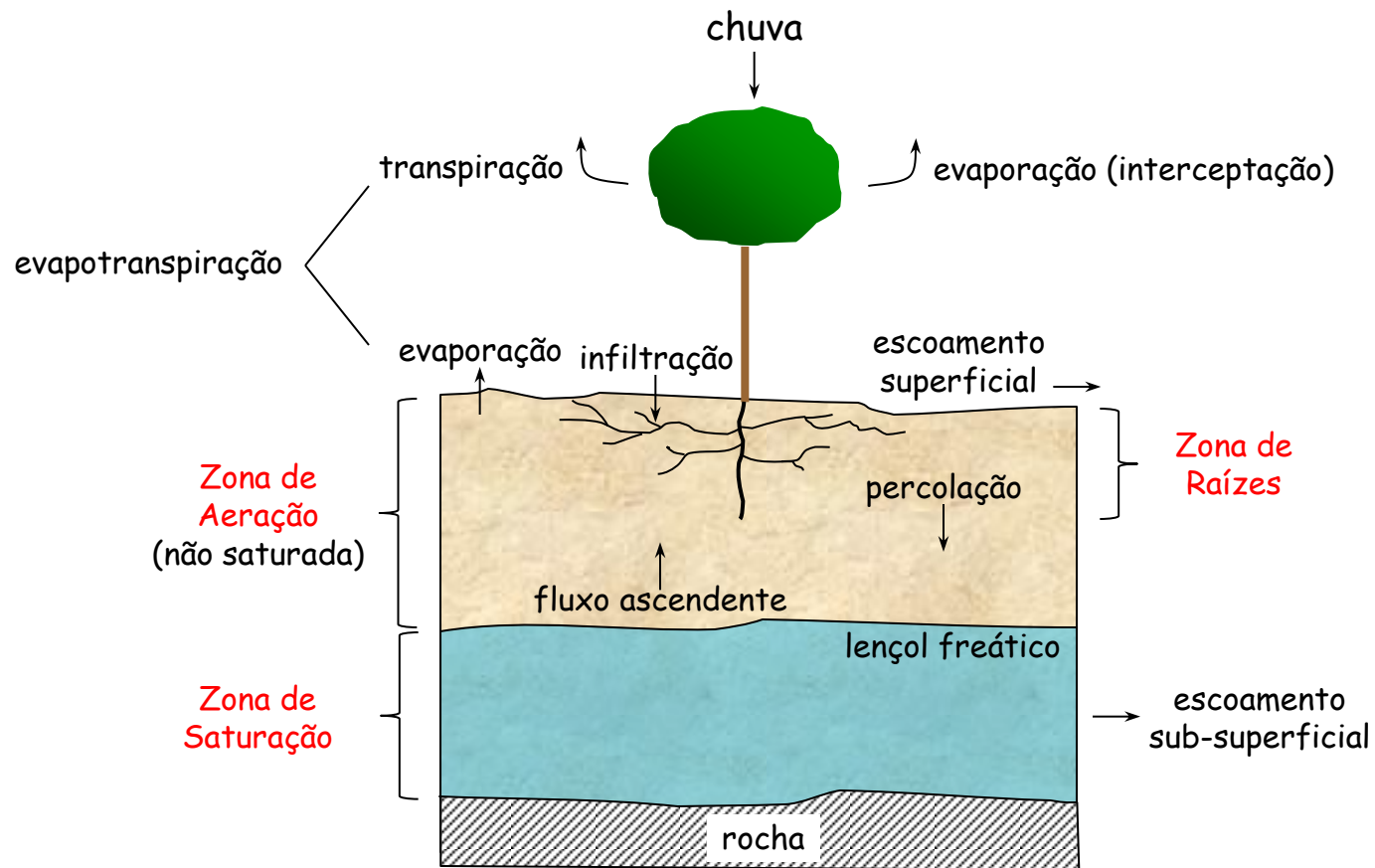
Componentes do Ciclo Hidrológico



O Papel da Vegetação no Ciclo Hidrológico



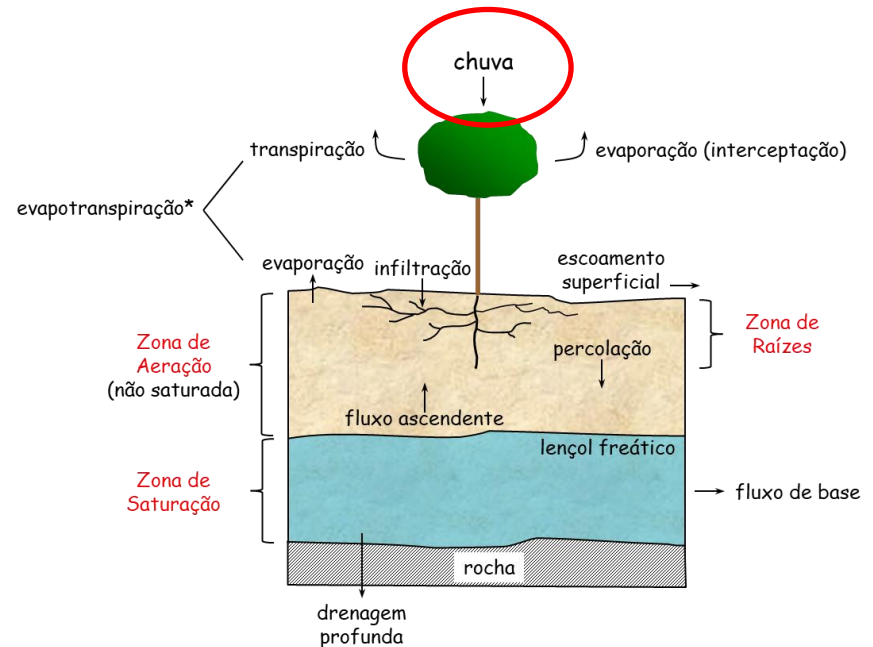
Componentes do Ciclo Hidrológico



Precipitação

A precipitação é formada por toda a água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície, incluindo **chuva**, granizo, orvalho e neve

É o fenômeno alimentador (**input**) da fase terrestre do ciclo hidrológico: desencadeador dos processos de escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração, recarga de aquíferos, vazão de rios, etc.



Meteorologia - estudo detalhado da precipitação

Hidrologia - a precipitação passa a ser de interesse no momento em que ela atinge a superfície do terreno

Precipitação sobre uma região

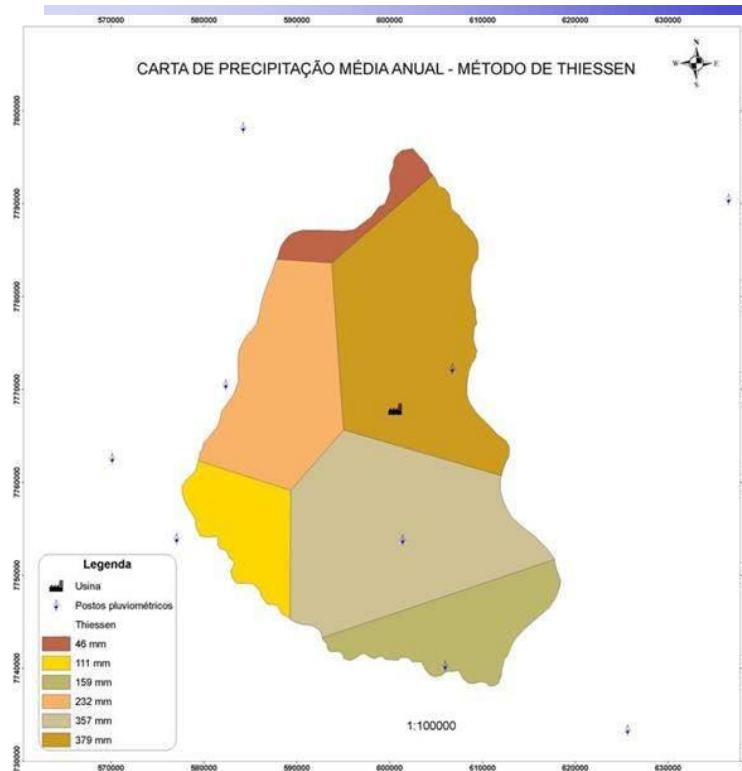
Problema prático:

Qual é o volume precipitado sobre uma bacia hidrográfica que possui mais de um pluviógrafo/pluviômetro?

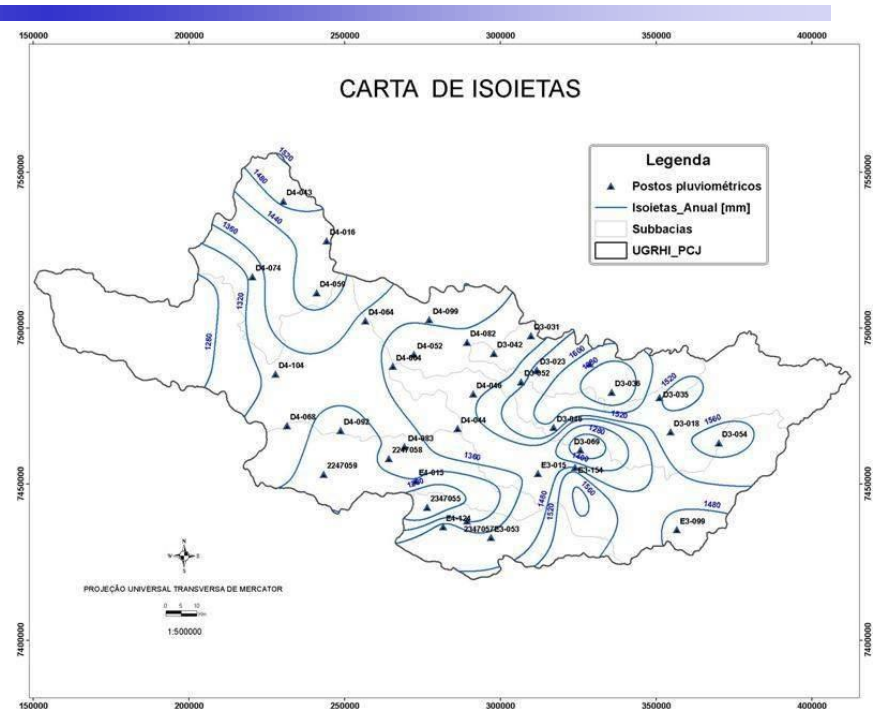


Previsão para hoje: chuvas acima da média

Precipitação sobre uma região



polígonos de Thiessen



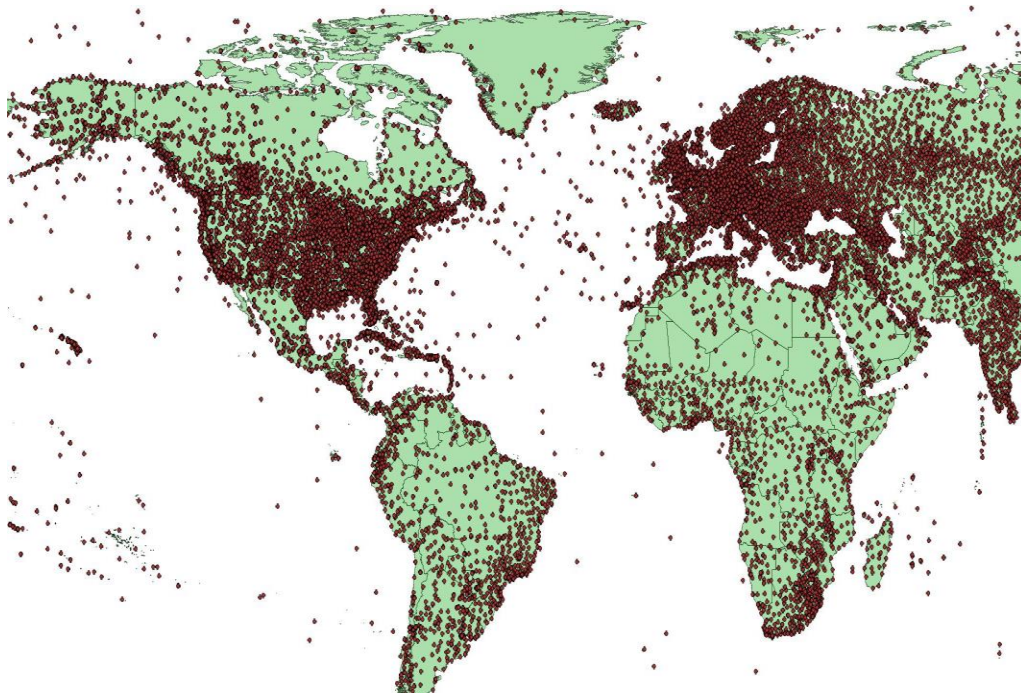
isoietas

Outros métodos interpoladores:

- inverso do quadrado da distância
- krigagem

Não consideram a influência do relevo

Redes hidrometeorológicas



- A rede de pluviômetros deveria estar adequadamente distribuída em função do relevo, da densidade populacional e do interesse (obras hidráulicas, previsão de cheias, etc.)
- Idealmente recomenda-se que, em áreas planas, deve-se instalar um pluviômetro a cada 250 km², mas em áreas montanhosas, esta densidade deveria ser maior

<http://blog.infochimps.com/2011/10/28/where-does-the-weather-data-come-from-visualizations-of-worldwide-weather-stations/>

Estimativa de Chuva por Sensoriamento Remoto

Três principais técnicas:

- Infravermelho termal
- Micro-ondas passivo
- Micro-ondas ativo

Radares meteorológicos: SR ativo de micro-ondas

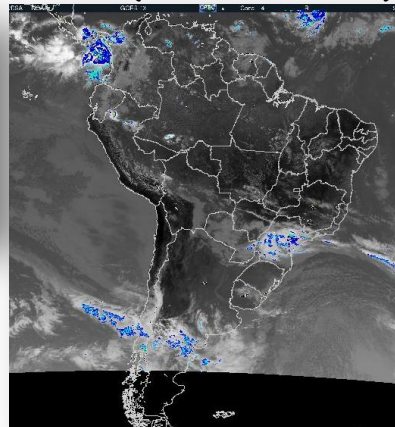


Fonte: INPE CPTEC
(2015)

Satélites meteorológicos: SR passivo (visível, IV e micro-ondas) e ativo (micro-ondas)



Fonte: GOES-8



Fonte: INPE CPTEC
(2015)

$$Z = aR^b$$

Z é a refletividade recebida

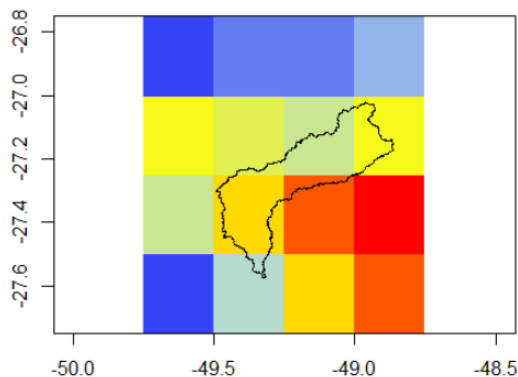
R é a taxa de precipitação

a e b são parâmetros da estação

Dados Globais

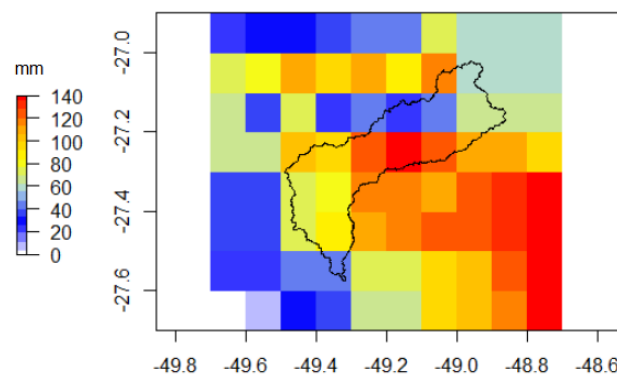
- Programa TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), lançado em 1997, representou uma grande conquista em relação ao futuro da utilização de sensores para a estimativa de precipitação, usando dados de micro-ondas passivo e ativo
- Constelação de satélites GPM (*Global Precipitation Measurement*), lançado em 27 de fevereiro de 2014, torna-se o sucessor do TRMM. Também usa dados de micro-ondas passivo e ativo. Produto IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals*) pode melhorar a resolução temporal ao integrar dados de infravermelho termal

TRMM/TMPA



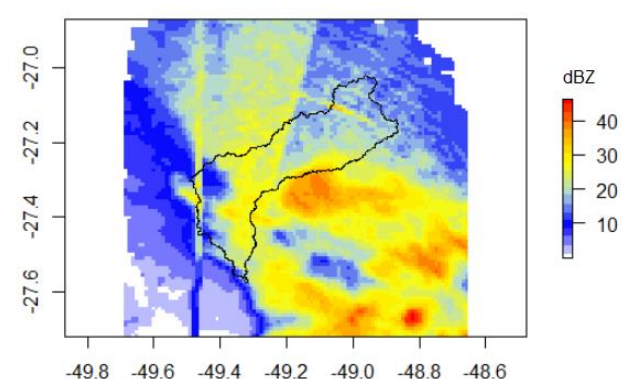
res. espacial 25 km
res. temporal 3 horas

GPM/IMERG



res. espacial 5 km
res. temporal 3 horas (até 30min)

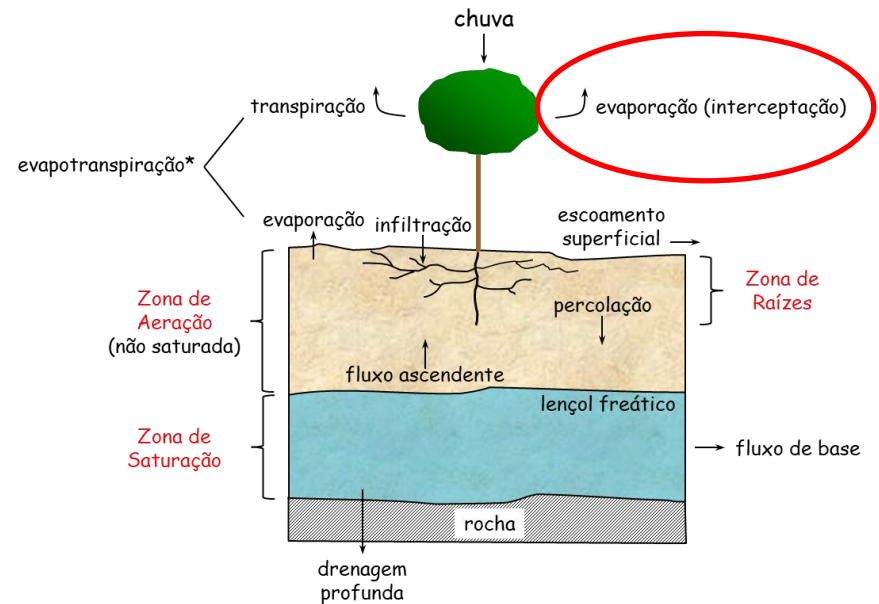
Radar Morro da Igreja



res. espacial 1 km
res. temporal ?

Interceptação

- Retenção de parte da precipitação acima da superfície do solo que, ao invés de infiltrar ou escoar, eventualmente atingindo os corpos hídricos, retorna para a atmosfera sob a forma de vapor d'água
- Pode ocorrer em superfícies naturais (florestas) ou antropizadas (edifícios e construções em geral)
- Ênfase: **interceptação vegetal**



Interceptação

- A chuva que cai sobre uma bacia hidrográfica vegetada é naturalmente fracionada em 3 parcelas
 - Parte é **interceptada** e armazenada pela vegetação e evapora
 - Parte escoa pelos galhos e troncos até a superfície do solo
 - Parte atinge a superfície do solo diretamente ou depois de escoar pelas folhas
- Primeiro processo hidrológico pelo qual a chuva passa, por vezes referido como 'perda por interceptação'. A parte da chuva que chega até o solo é chamada 'chuva efetiva'
- Frequentemente é negligenciado devido às dificuldades de medição e grande variabilidade espacial e temporal



Medida da Interceptação



Figura 5.4. (a) Instalação de calha para coleta de chuva interna. (b) Detalhe de mangueiras que ligam a calha ao pluviôgrafo do tipo báscula. (c) Limpeza da casca para instalação de mangueiras de coleta de escoamento de tronco. (d) Área com medição instalada de chuva interna e escoamento de tronco.

Estimativa da interceptação

Equação de Horton (1919)

$$I = S + (A_v/A).E.t_r$$

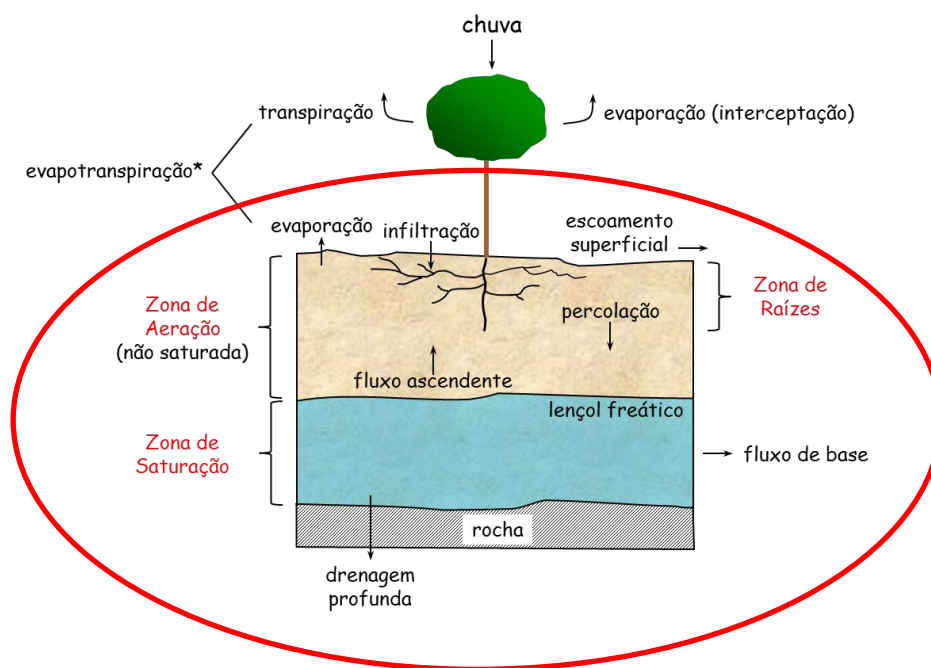
I - quantidade interceptada (mm)
 S - capacidade de armazenamento da vegetação (mm)
 A_v - área da vegetação
 A - área total
 E - taxa de evaporação (mm/h)
 t_r - duração da precipitação em horas

Simplificando...

$$I = F_i \times IAF$$

F_i - parâmetro de interceptação ($F_i = 0,1$ a $0,7$ mm)
 IAF - índice de área foliar (m^2m^{-2})

O Papel do Solo no Ciclo Hidrológico



Termos e conceitos

Infiltração

entrada de água no solo

Percolação

fluxo vertical descendente da água

Fluxo Ascendente

fluxo vertical ascendente da água

Escoamento superficial (*surface runoff*)

fluxo que ocorre sobre o solo

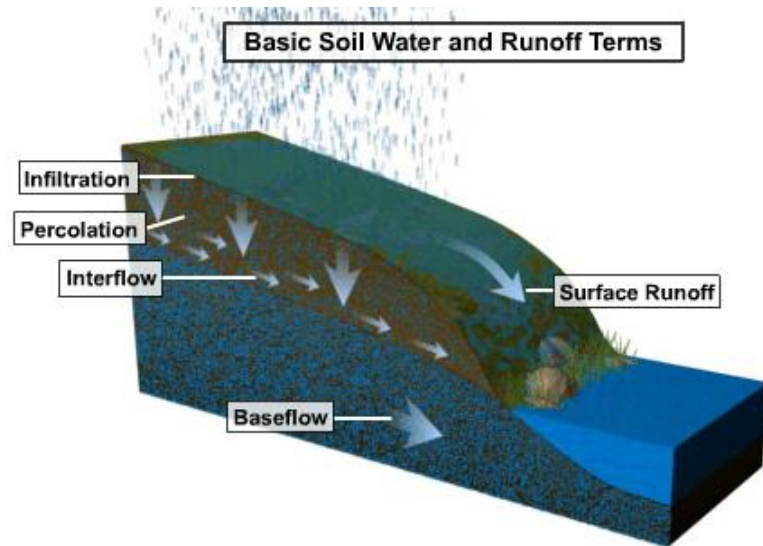
Escoamento subsuperficial (*interflow*)

fluxo lateral que ocorre no interior do solo

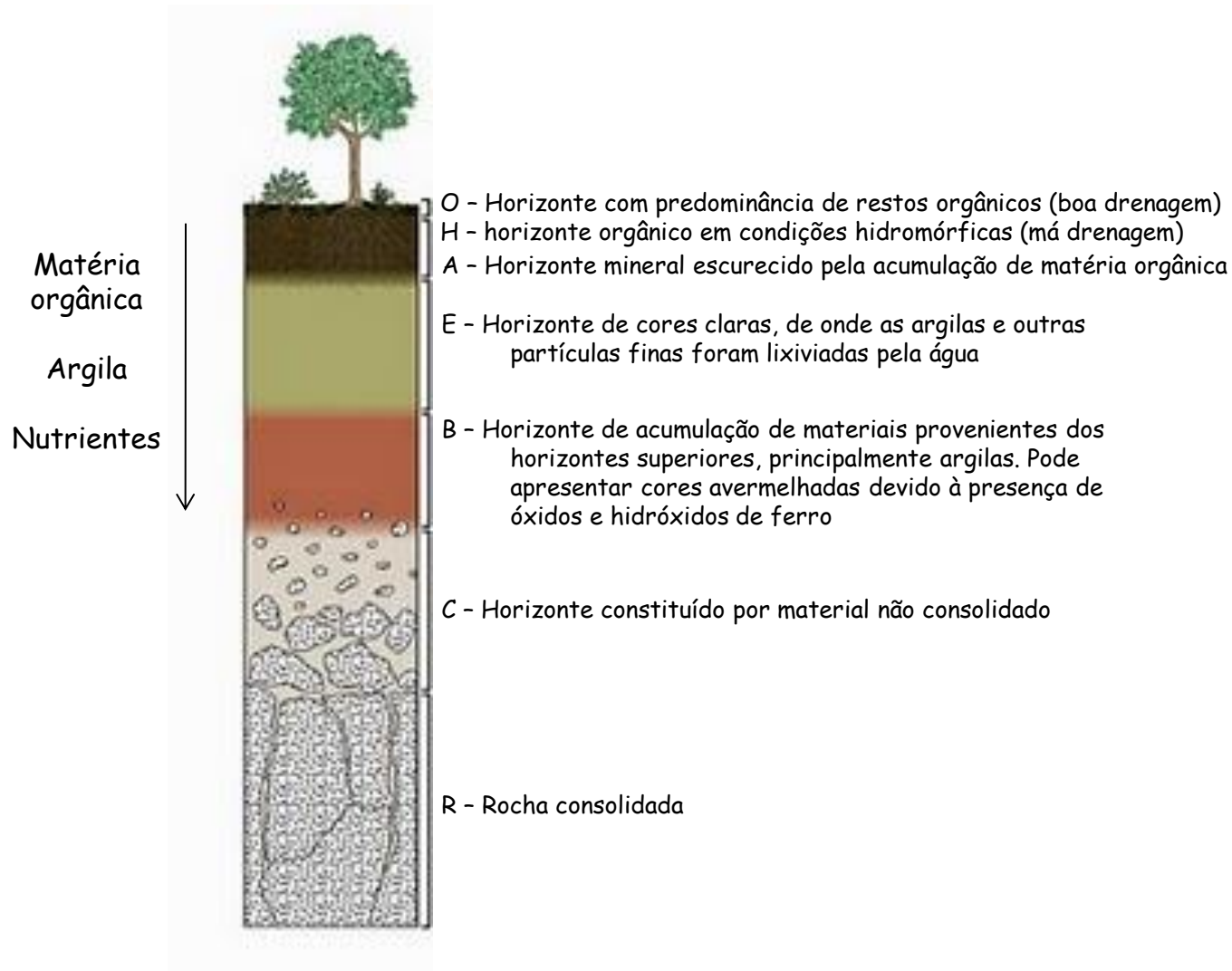
Fluxo de base (*baseflow*)

fluxo lateral que ocorre na zona saturada

runoff



Perfil do Solo



Textura do Solo

Diz respeito a distribuição de tamanho das partículas do solo

Classificação granulométrica

Fração	Diâmetro
Matacões	> 20 cm
Calhaus	20 mm a 20cm
Cascalhos	2 a 20 mm
Areia Grossa	0,2 a 2 mm
Areia Fina	0,05 a 0,2 mm
Silte	0,002 a 0,05 mm
Argila	< 0,002 mm

O conhecimento da textura é importante pois fornece informação sobre o solo a respeito de:

- sua capacidade em permitir a movimentação da água (condutividade hidráulica),
- sua capacidade em reter/armazenar água,
- seu potencial de fertilidade e,
- sua capacidade mecânica

areia



silte



argila



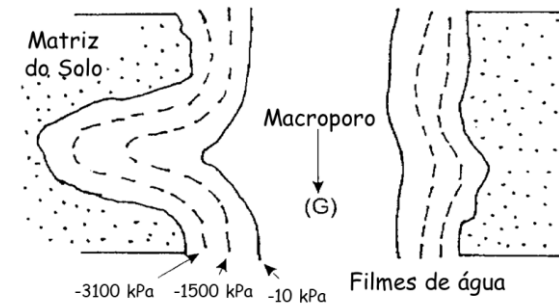
Estrutura e Porosidade

Estrutura é o arranjo das partículas primárias do solo formando agregados (torrões). Este arranjo é geralmente bastante complexo.

A estrutura do solo é determinante para a porosidade do solo, ou seja, na distribuição e no tamanho dos poros. Afeta processos tais como germinação, crescimento de raízes, erosão, etc.



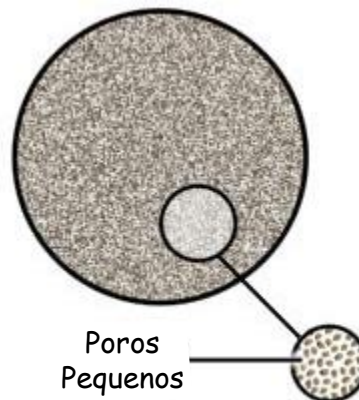
macroporos



Solo Arenoso



Solo Argiloso

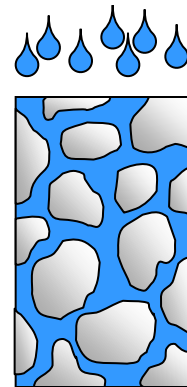


A porosidade influencia diretamente no movimento de água no solo (condutividade hidráulica)

A porosidade determina a capacidade de armazenamento de água no solo

Água Disponível: CC e PMP

Após a chuva ou irrigação, a infiltração cessa e a água se redistribui dentro do perfil principalmente pela influência da gravidade.



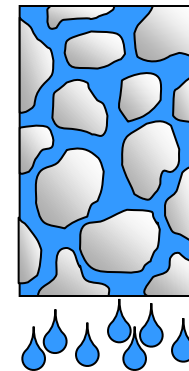
Saturação

Todos os
poros estão
cheios de
água.

Água Disponível: CC e PMP

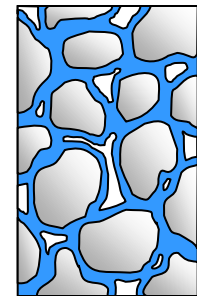
Após a chuva ou irrigação, a infiltração cessa e a água se redistribui dentro do perfil principalmente pela influência da gravidade.

A umidade do solo na qual a redistribuição praticamente cessa é denominada **capacidade de campo (CC)**, ou seja, é a umidade que o solo consegue sustentar sob a ação da gravidade.



Saturação

Todos os poros estão cheios de água.
A água gravitacional é perdida.



Capacidade de Campo

Apenas os macroporos estão ocupados por ar.

Água Disponível: CC e PMP

A água perdida pelas plantas por transpiração deve ser constantemente repostada pela extração da água do solo na zona radicular.

Quando a planta não consegue mais retirar a água do solo, as folhas perdem a turgidez e a planta murcha.



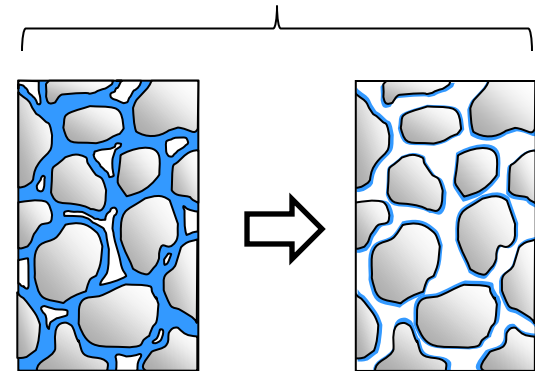
Água Disponível: CC e PMP

A água perdida pelas plantas por transpiração deve ser constantemente repostada pela extração da água do solo na zona radicular.

Quando a planta não consegue mais retirar a água do solo, as folhas perdem a turgidez e a planta murcha.

O **ponto de murcha permanente** (PMP) é definido como a umidade do solo na qual uma planta não mais recupera a turgidez.

Água Disponível
(CC - PMP)



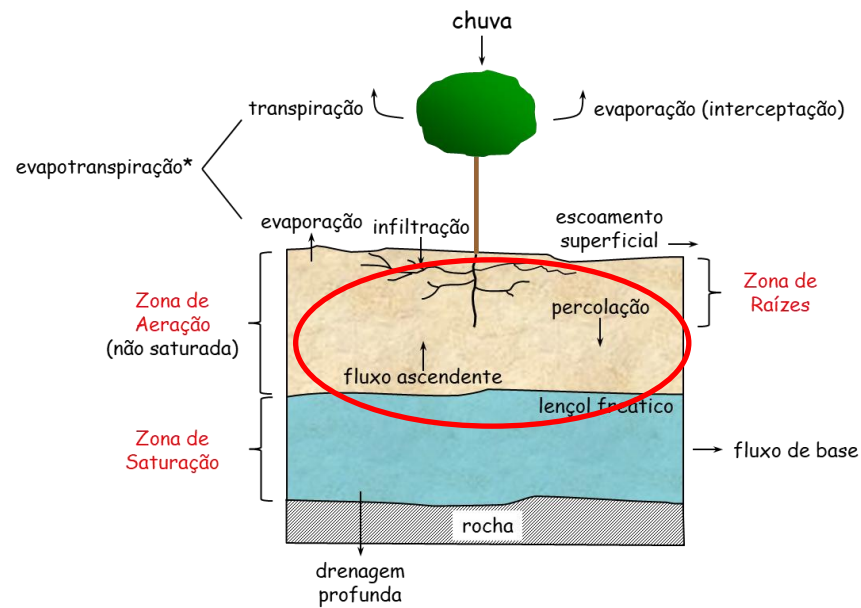
Capacidade
de Campo

Apenas os
macroporos
estão ocupados
por ar.

Ponto de
Murcha
Permanente

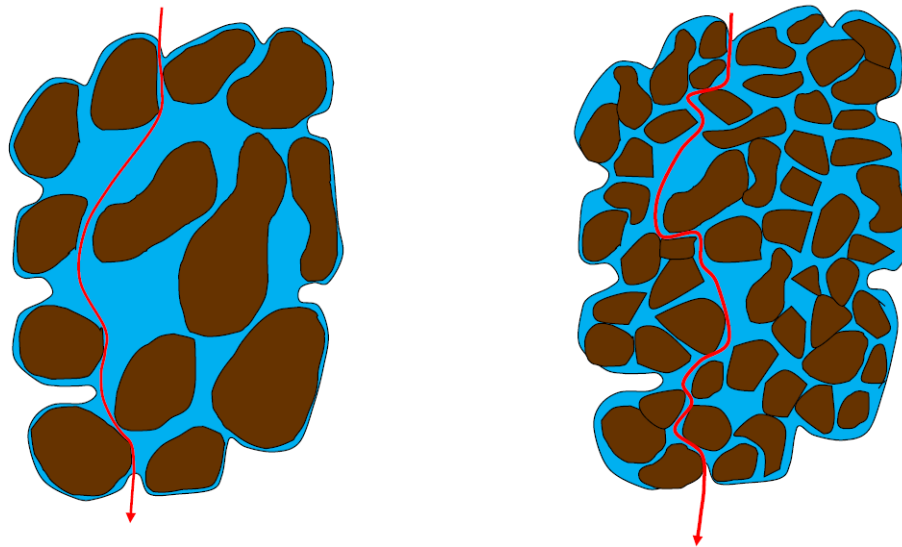
Não há mais água
disponível para as
plantas
(umidade residual)

Movimento da água no solo



Movimento da água no solo saturado

A **condutividade hidráulica (K)** é afetada pela estrutura e textura do solo, sendo maior em solos porosos (poros grandes), fraturados e bem estruturados (formação de torrões). Ou seja, não depende apenas da quantidade de poros, mas também do tamanho e da geometria desses poros (tortuosidade) por onde a água irá ser conduzida.

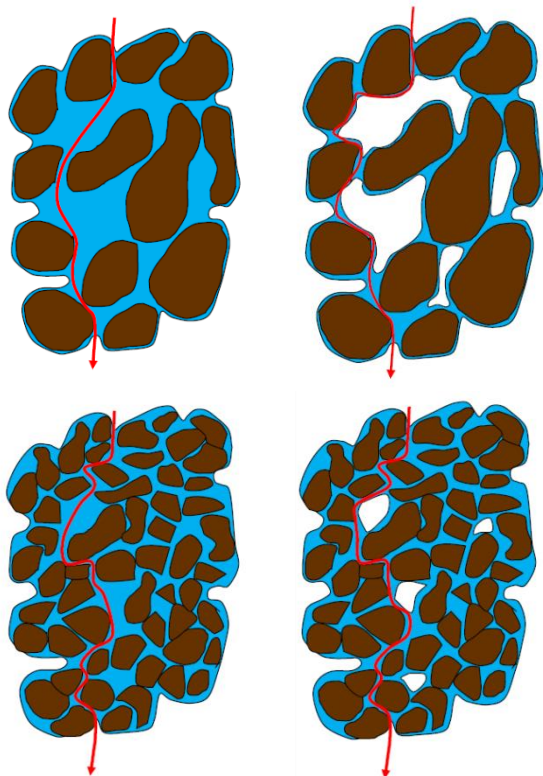


Por isso, em geral, solos **arenosos** apresentam condutividade hidráulica **maior** que solos **argilosos** quando **saturados**.

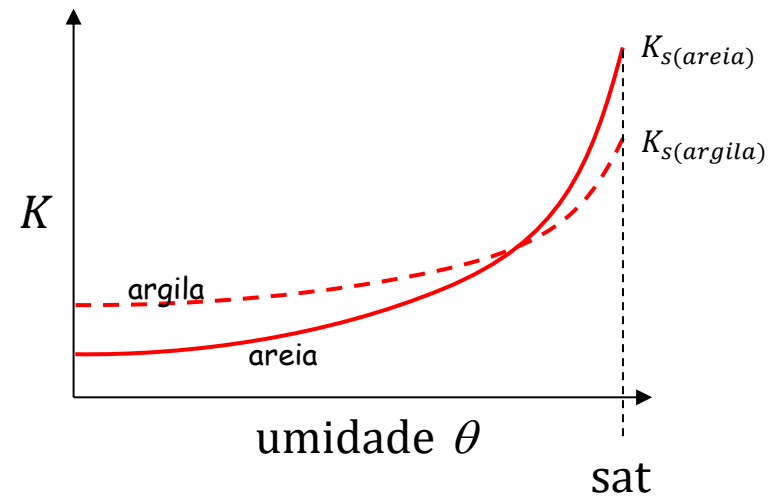
Movimento da água no solo não saturado

Quando o solo não está saturado, alguns poros estão preenchidos também pelo ar, e a capacidade de transmitir água desse poro diminui.

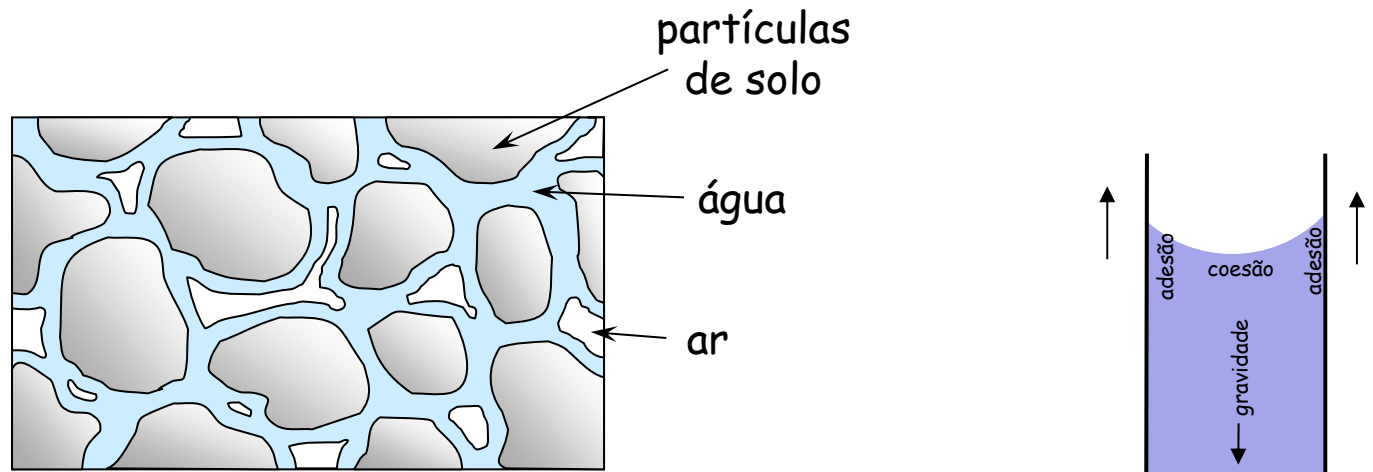
A medida que a quantidade de água no solo se reduz, os poros maiores começam a se esvaziar, fazendo com que a água só possa fluir pelos poros menores.



Por isso, em geral, solos **arenosos** apresentam condutividade hidráulica **menor** que solos **argilosos** quando **não saturados**.



Potencial de Água no Solo

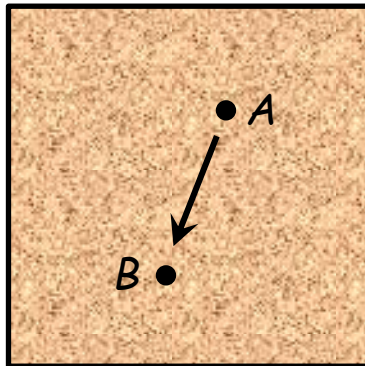


Toda molécula de água no solo está sujeita a uma série de forças que determinarão o sentido e velocidade de deslocamento desta molécula dentro do solo.

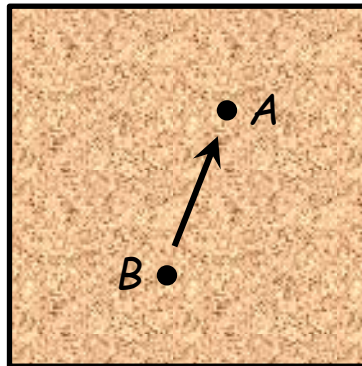
Potencial de Água no Solo

A energia com a qual o solo retém a água é medida em termos de potencial de água (ψ), que tem unidades de pressão*, ou energia por unidade de volume, que equivale à força por unidade de área.

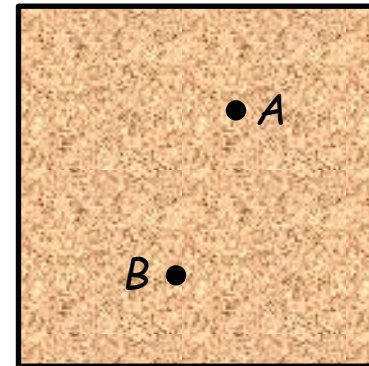
O movimento da água será sempre orientado para a região de menor potencial



$$\psi_A > \psi_B$$



$$\psi_A < \psi_B$$



$$\psi_A = \psi_B$$

* Unidades de pressão: 1000 kPa = 10 bar = 101,98 mca = 7500,64 mmHg

Potencial de Água no Solo

O potencial de água no solo é a soma dos potenciais gravitacional, osmótico e de pressão:

$$\psi = \psi_g + \psi_o + \psi_p$$

Onde:

ψ = potencial total

ψ_g = potencial gravitacional

ψ_o = potencial osmótico

ψ_p = potencial de pressão ou potencial de água no solo

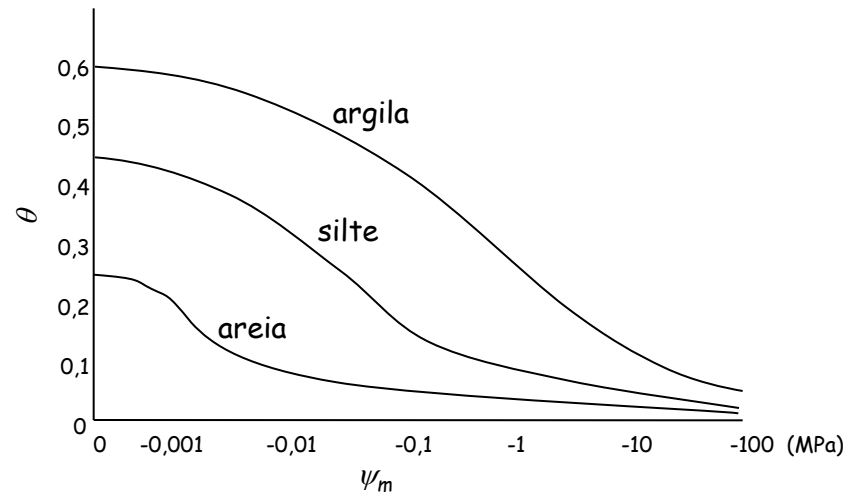
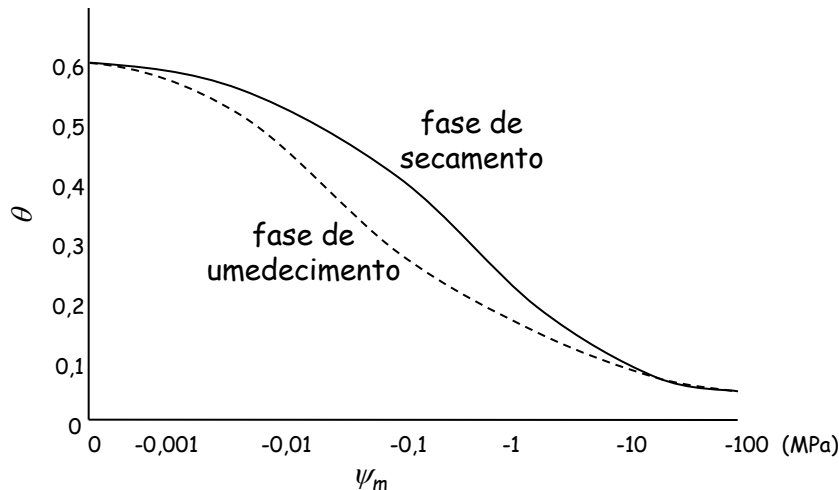
Em solos não saturados, o potencial matricial (ψ_m) representa a força de adesão da água às partículas do solo. Quanto menor for a umidade, mais fortemente a água será retida pelas partículas do solo.

Em solos saturados, potencial de carga (ψ_c) representa o peso da coluna d'água sobre o ponto considerado.

Curva de Retenção do Solo

Cada solo, dependendo de sua textura e porosidade, possui uma curva de retenção característica que relaciona o conteúdo de umidade e o potencial matricial deste solo.

É importante observar que a relação entre a umidade e o potencial matricial é diferente se este solo estiver recebendo ou perdendo água. Este fenômeno é conhecido como histerese.



Medição do Potencial de Água no Solo

Métodos indiretos:

- Medindo-se a umidade e obtendo-se o potencial através da curva de retenção característica do solo

Métodos diretos:

- Tensiômetros (0 até -85 kPa)
- Baseados na condutividade elétrica (entre -100 e -1500 kPa)

Modelos de Relação entre θ e ψ_m

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

S_e é a saturação efetiva (entre 0 e 1)
 θ_s e θ_r são os conteúdos volumétricos de água na saturação natural ($V_w = V_p$) e residual ($\psi = -1500\text{kPa}$)

- Brooks-Corey

$$S_e = \left(\frac{\psi_b}{\psi_m} \right)^\lambda$$

ψ_b é o potencial de entrada de ar ou pressão de entrada do ar
 λ é chamado de índice de distribuição de poros
(se $|\psi_m| \leq |\psi_b|$ então $S_e = 1 \therefore \theta = \theta_s$)

- van Genuchten

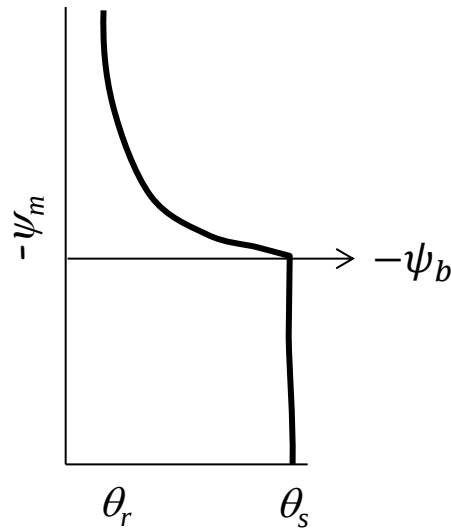
$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha |\psi_m|)^n]^{1-\frac{1}{n}}}$$

α e n são parâmetros

Modelos de Relação entre θ e ψ_m

- Brooks-Corey

$$S_e = \left(\frac{\psi_b}{\psi_m} \right)^\lambda$$



Classe Textural	Porosidade Total ϕ (cm ³ /cm ³)	Umidade Residual θ_r (cm ³ /cm ³)	$-\psi_b$ (cm)	λ
areia	0,437	0,020	15,98	0,694
areia franca	0,437	0,035	20,58	0,553
franco arenosa	0,453	0,041	30,20	0,378
franco	0,463	0,027	40,12	0,252
franco siltosa	0,501	0,015	50,87	0,234
franco argilo arenosa	0,398	0,068	59,41	0,319
franco argilosa	0,464	0,075	56,43	0,242
franco argilo siltosa	0,471	0,040	70,33	0,177
argilo arenosa	0,430	0,109	79,48	0,223
argilo siltosa	0,479	0,056	76,54	0,150
argila	0,475	0,09	85,60	0,165

Rawls et al. (1982)

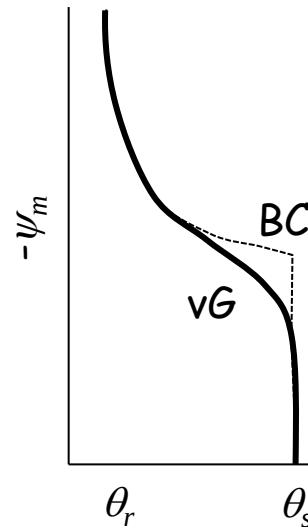
ψ_b é mais negativo para texturas mais argilosas, ou seja, em condição de saturação, solos argilosos retêm a água mais fortemente que solos mais arenosos

λ é maior para texturas mais arenosas, ou seja, a curva decai mais rapidamente para solos arenosos (pequenas variações na umidade causam grandes mudanças na tensão matricial)

Modelos de Relação entre θ e ψ_m

- van Genuchten

$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha|\psi_m|)^n]^{1-\frac{1}{n}}}$$

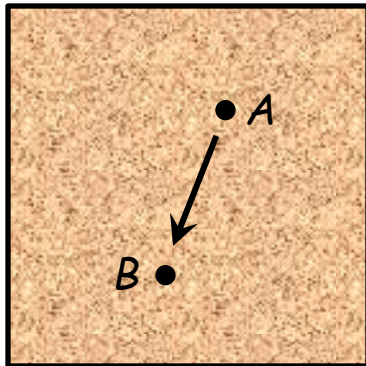


A obtenção dos valores de α e n é feito através de dados experimentais buscando-se o melhor ajuste numérico

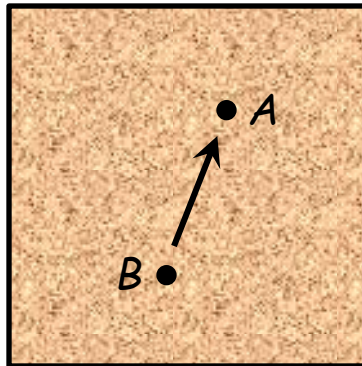
Comparado com o modelo Brooks-Corey, este modelo ajusta-se melhor às condições próximas a saturação

Fluxo de água no solo

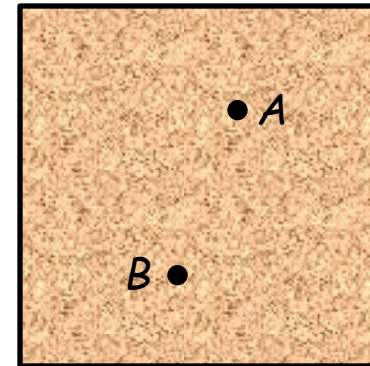
A água se desloca em resposta a uma diferença de potencial, isto é, sempre que houver diferença de potencial entre dois pontos de um sistema, a água estará se movendo do ponto onde o potencial total é maior para o ponto onde ele é menor.



$$\psi_A > \psi_B$$



$$\psi_A < \psi_B$$

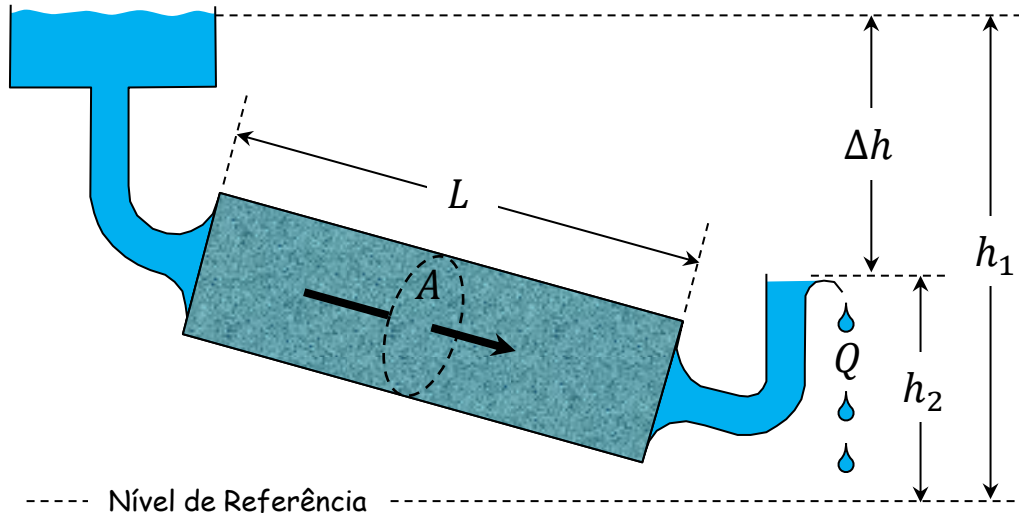


$$\psi_A = \psi_B$$

Mas há como medir a velocidade deste deslocamento?

Fluxo de água no meio saturado

Darcy (em 1856) estudou o escoamento da água em meios porosos saturados (colunas de areia), verificando que a vazão de saída (Q , m^3h^{-1}) era diretamente proporcional à perda de carga (Δh , m) e à seção transversal da coluna da amostra (A , m^2) e inversamente proporcional ao comprimento desta mesma coluna (L , m).



$$Q = K_s A \frac{\Delta h}{L}$$

K_s é condutividade hidráulica num meio saturado (mh^{-1})

$$q = K_s \frac{\Delta h}{L} \quad \begin{array}{l} \text{velocidade do} \\ \text{fluxo laminar} \\ (\text{mh}^{-1} = \text{m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}) \end{array}$$

$$q = -K_s \frac{\partial \psi_t}{\partial d}$$

sendo $\partial \psi_t / \partial d$ a variação do potencial total ψ_t ao longo da direção d

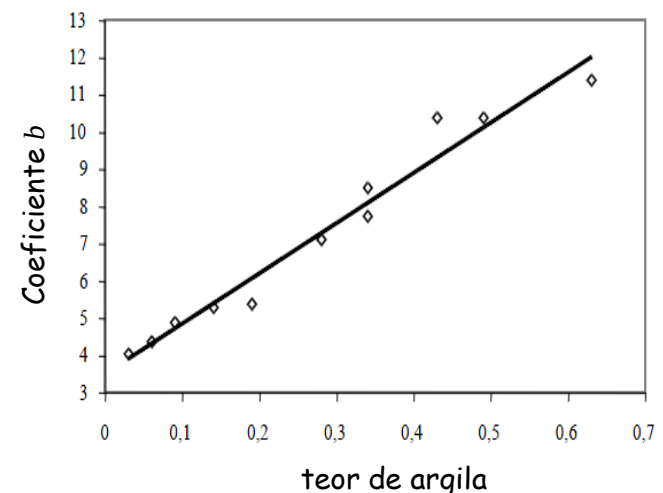
Condutividade Hidráulica no meio não saturados

Em meio não saturado, a lei de Darcy ainda continua válida, mas a condutividade hidráulica K diminui rapidamente com a diminuição da umidade. A condutividade hidráulica é máxima em condições de saturação (K_s).

Campbell (1974) formulou uma relação bastante prática para o cálculo da condutividade hidráulica:

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3}$$

onde b é um coeficiente empírico. Clapp e Hornberger (1978) determinaram valores do coeficiente b para solos com diferentes texturas, chegando a uma relação muito forte entre o coeficiente b e o teor de argila do solo.



Modelo de Condutividade Hidráulica

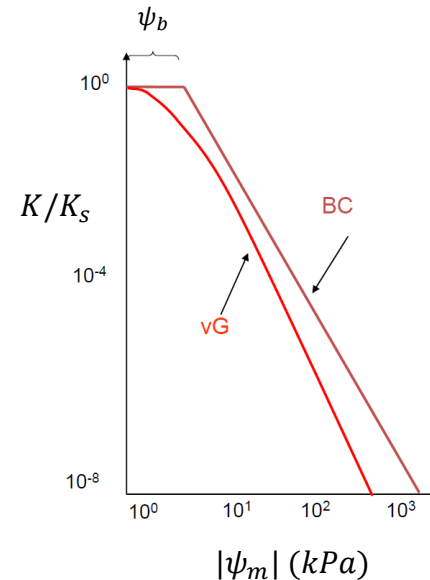
Modelo de Brooks-Corey:

$$K(S_e) = K_s S_e^{2 + \frac{1}{2} + 2/\lambda}$$

Modelo de van Genuchten:

$$K(S_e) = K_s S_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2$$

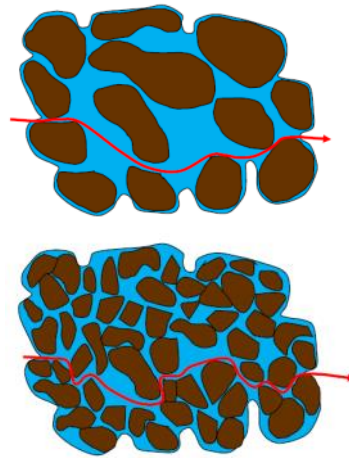
$$m = 1 - 1/n$$



Considerações importantes

O tamanho dos poros é um dos fatores que mais afetam o movimento da água no solo. Quando considerado um solo em condições de saturação, poros maiores (areias) conduzem mais água que poros menores (argilas), ou seja,

$$K_{s(areia)} > K_{s(argila)}$$



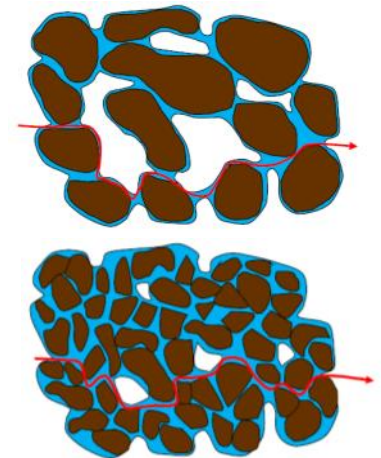
Considerações importantes

O tamanho dos poros é um dos fatores que mais afetam o movimento da água no solo. Quando considerado um solo em condições de saturação, poros maiores (areias) conduzem mais água que poros menores (argilas), ou seja,

$$K_{s(areia)} > K_{s(argila)}$$

Em condições não saturadas, os caminhos que a água deve percorrer se tornam tortuosos. Quanto mais tortuosos, menor a condutividade hidráulica. Nestas condições, os solos arenosos têm menor capacidade de conduzir água que os solos argilosos, ou seja,

$$K_{(areia)} < K_{(argila)}.$$



Considerações importantes

Em geral, solos arenosos têm poros maiores que os solos argilosos, mas têm porosidade (espaço poroso) menor e por isso armazenam menos água por unidade de volume que solos argilosos.

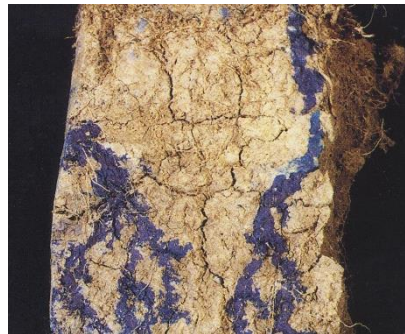
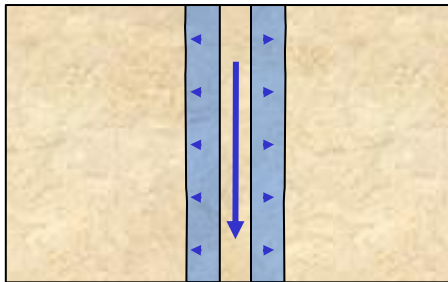
$$\theta_s(\text{areia}) < \theta_s(\text{argila})$$

Considerações importantes

Em geral, solos arenosos têm poros maiores que os solos argilosos, mas têm porosidade (espaço poroso) menor e por isso armazenam menos água por unidade de volume que solos argilosos.

$$\theta_s(\text{areia}) < \theta_s(\text{argila})$$

Mudanças no tamanho e na distribuição de poros afetam o movimento de água no solo: compactação, canais de raízes deixados por raízes mortas, túneis de minhocas e de outros animais, fendas, etc.



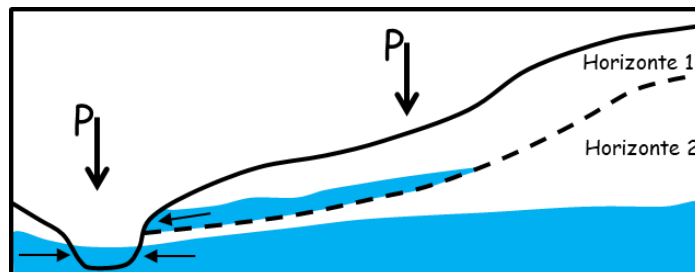
Considerações importantes

Em geral, solos arenosos têm poros maiores que os solos argilosos, mas têm porosidade (espaço poroso) menor e por isso armazenam menos água por unidade de volume que solos argilosos.

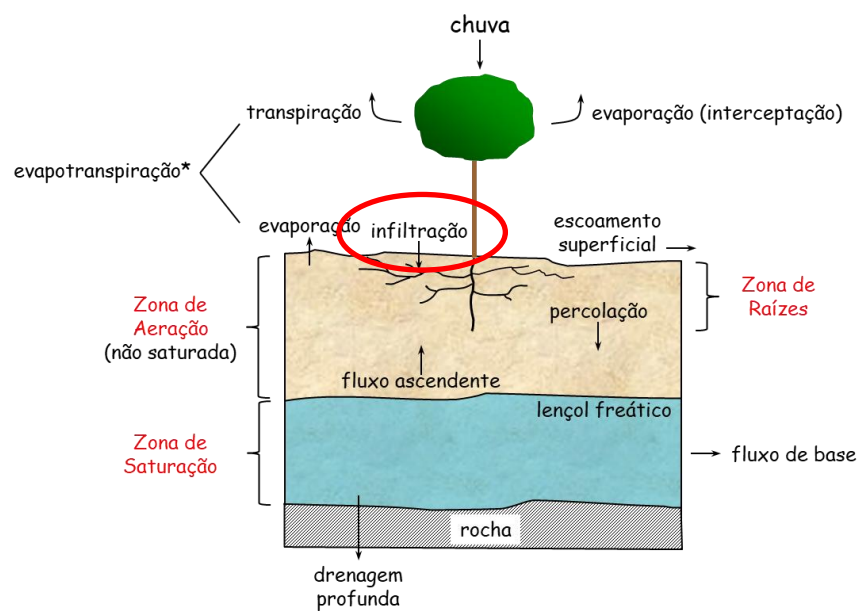
$$\theta_s(\text{areia}) < \theta_s(\text{argila})$$

Mudanças no tamanho e na distribuição de poros afetam o movimento de água no solo: compactação, canais de raízes deixados por raízes mortas, túneis de minhocas e de outros animais, fendas, etc.

Em alguns casos, uma camada do solo pode ter condutância hidráulica inferior que camadas superiores, o que provocará o retardamento da percolação, podendo inclusive formar uma zona saturada suspensa intermitente.



Infiltração



Fatores que afetam a Infiltração

Textura e estrutura do solo: porosidade, densidade e compactação do solo

maior quantidade de poros grandes → maior infiltração

maior compactação → maior densidade → menor infiltração

Condição antecedente de umidade do solo

mais úmido → menor infiltração

Atividade biológica e matéria orgânica

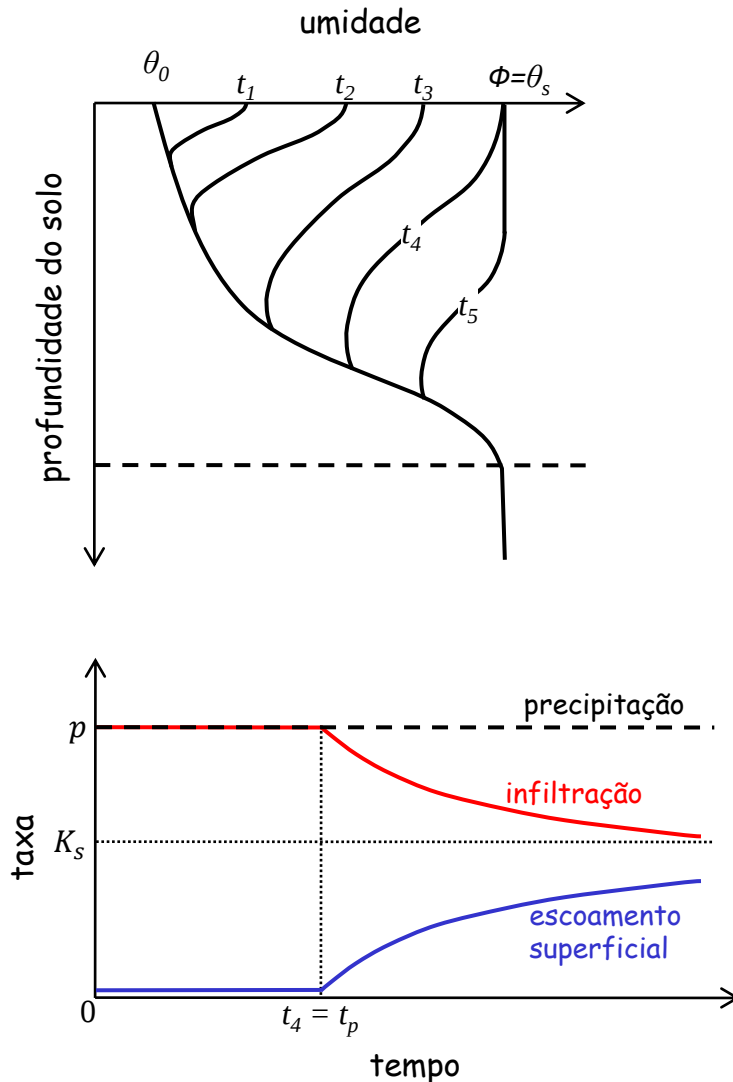
mais matéria orgânica → melhor estruturado é o solo → maior infiltração

Presença de cobertura morta e vegetação

menor cobertura → maior desagregação das partículas → menor infiltração

Outros: hidrofobia do solo, congelamento superficial

Infiltração x Escoamento Superficial



Considerando um solo cuja superfície está seca (condição inicial - t_0) e uma chuva cuja intensidade é constante p ($> K_s$):

O potencial matricial (sucção) é muito negativo na superfície gerando gradientes de potencial total muito baixos

A capacidade de infiltração é alta

Toda a precipitação transforma-se em infiltração

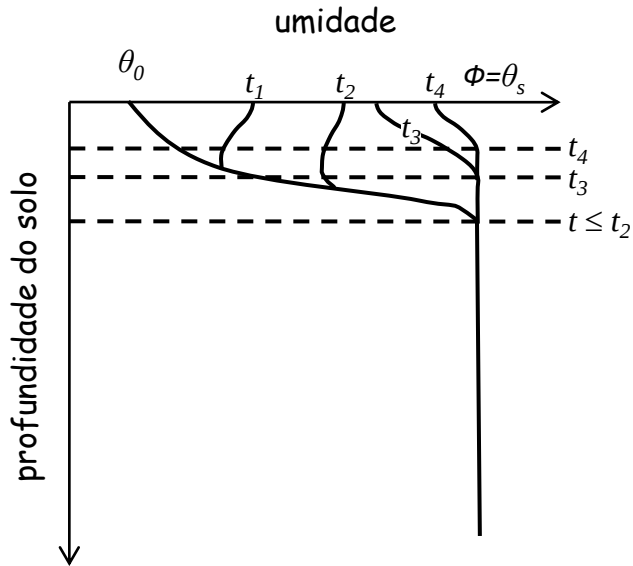
A medida que a água se distribui ao longo do perfil:

O potencial matricial torna-se menos negativo e a taxa de infiltração diminui

Há saturação da camada superficial em $t_p = t_4$

A precipitação em excesso origina escoamento superficial (Horton)

Infiltração x Escoamento Superficial

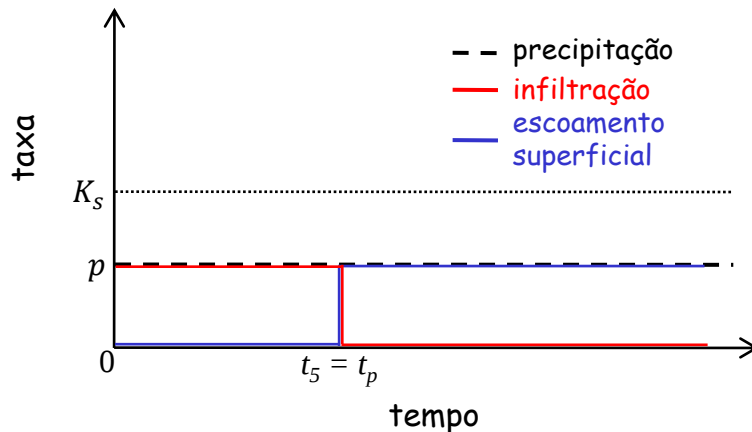


Com o lençol freático próximo a superfície:

Um pequeno volume de água infiltra e rapidamente o solo se torna completamente saturado (elevação do lençol freático)

Com a saturação, a infiltração é interrompida

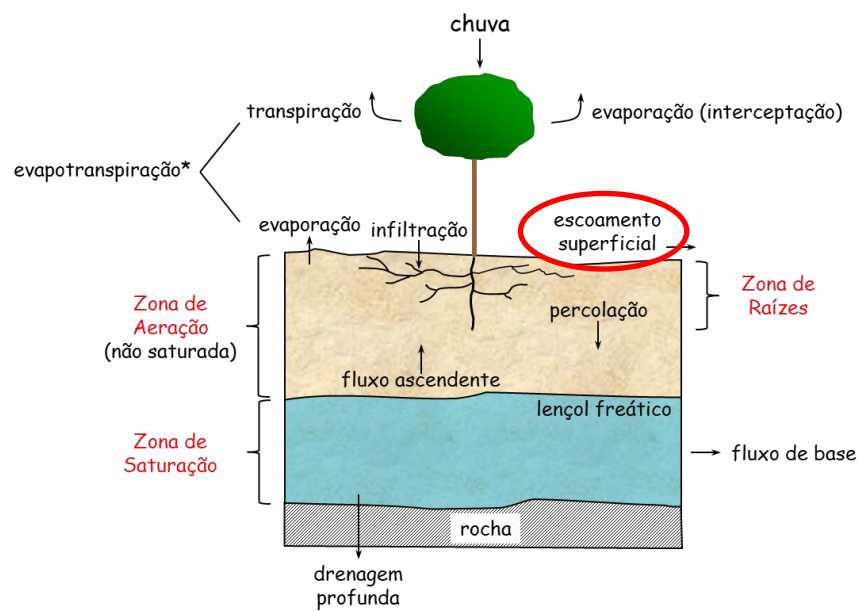
Toda a precipitação transforma-se em escoamento direto (Dunne)



Ocorre geralmente nas áreas de várzea e áreas com topografia convergente ("grotas")

Está relacionado com o conceito de área de contribuição variável (áreas de escoamento direto)

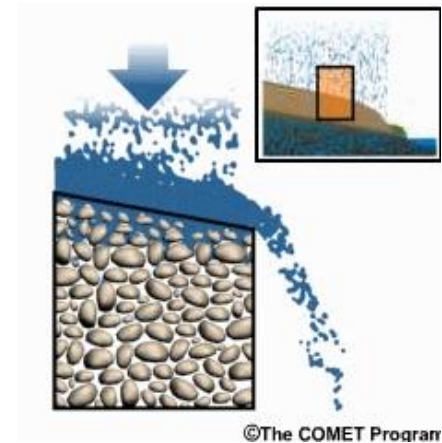
Escoamento



Tipos de escoamento

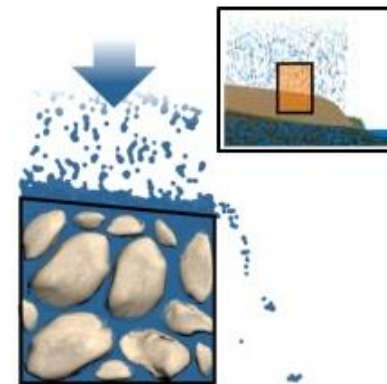
Escoamento por excesso de infiltração

Mecanismo de Horton



Escoamento por excesso de saturação

Mecanismo de Dunne



Note: Enlarged soil particles are not drawn to scale. ©The COMET Program

Escoamento por excesso de infiltração

Mecanismo de Horton

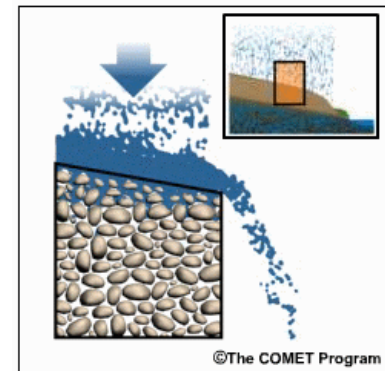
Ocorre quando a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração, podendo ocorrer mesmo com o solo seco

Associado a eventos intensos de precipitação de curta duração

Frequente em áreas pouco permeáveis: solos com elevado teor de argila (poros muito pequenos), solos compactados (ou pisoteados), áreas urbanas, solos sob ocorrência de fogo, e cobertura vegetal rala

Está intimamente associado ao fenômeno de erosão e transporte de sedimentos

Raramente ocorre em áreas de floresta natural



Escoamento por excesso de saturação

Mecanismo de Dunne

Ocorre quando o solo está saturado - importância da umidade do solo antecedente

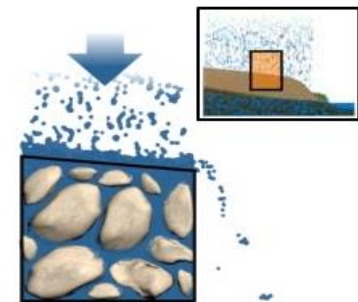
Associado a chuvas moderadas e de longa duração ou após sucessivos eventos de chuva

Frequente em clima úmido, áreas planas e terrenos pouco inclinados (áreas de várzea), próximos a cursos d' água (onde o lençol freático está próximo à superfície e é rapidamente saturado), depressões de vertentes (onde o fluxo subsuperficial ou subterrâneo convergem e retornam à superfície - fluxo de retorno), solos rasos ou com queda acentuada da condutividade hidráulica no subsolo, e pés das vertentes (áreas de fluxos convergentes)

É o principal mecanismo de escoamento em bacias de florestas tropicais

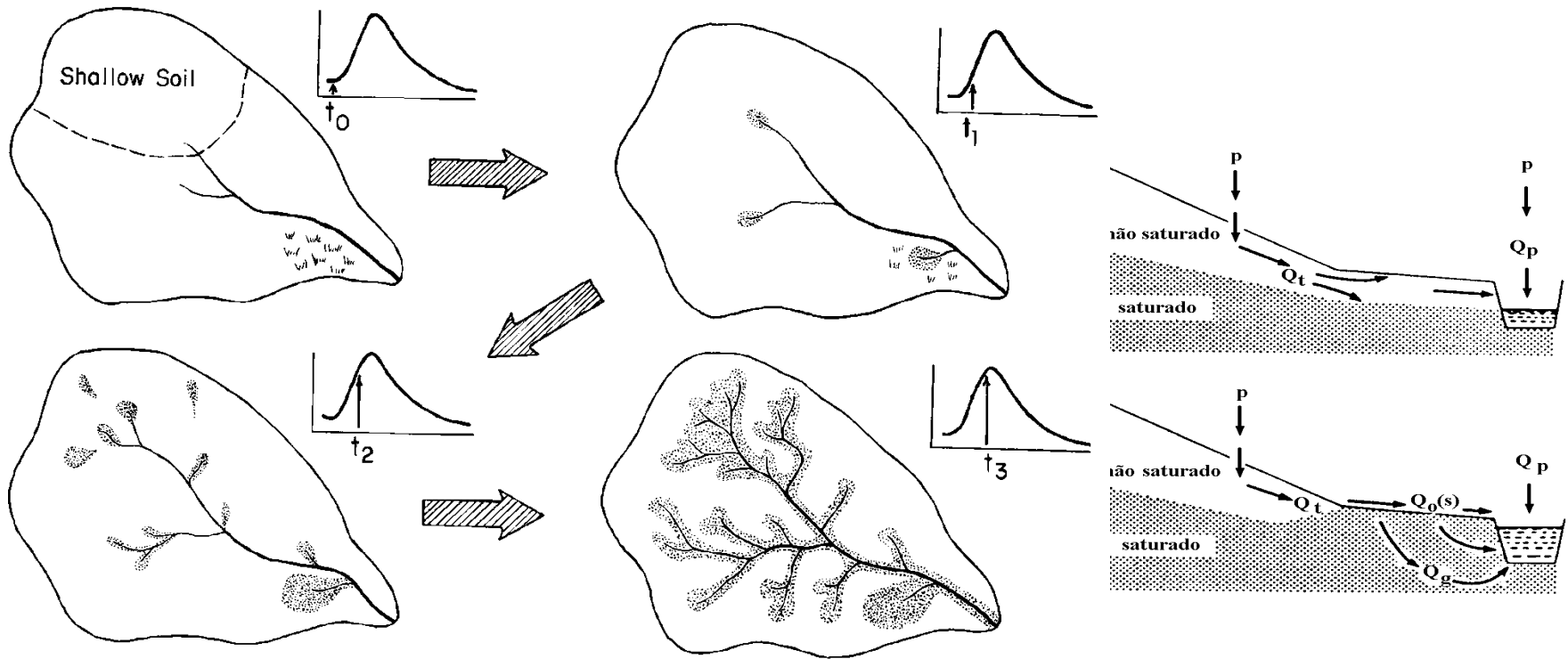


Creative Commons StripeyAnne



Note: Enlarged soil particles are not drawn to scale. ©The COMET Program

Área de contribuição variável



Com a continuação da precipitação, as áreas que originam o escoamento direto tendem a se expandir, não somente em decorrência da expansão da rede de drenagem, como também pelo fato de que as áreas saturadas e as áreas de solo raso passam também a participar da geração de escoamento direto. Este processo se reverte a medida que a precipitação diminui.

Fatores que influenciam o escoamento superficial

Fatores climáticos

- Intensidade da chuva
- Duração da chuva
- Umidade do solo antecedente

Fatores fisiográficos

- Área da bacia
- Forma da bacia
- Topografia (declividade da bacia)
- Permeabilidade do solo

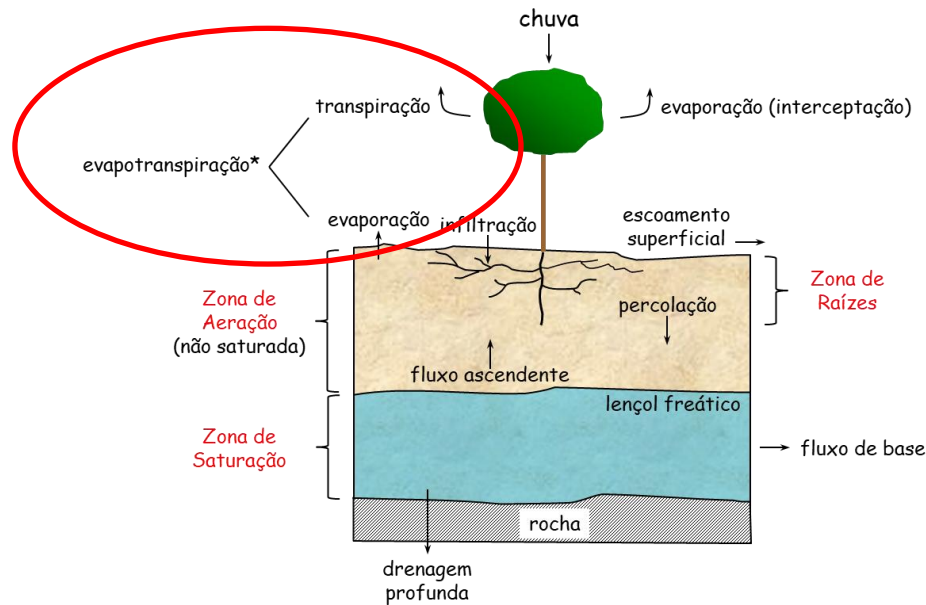
Uso da terra

- Superfícies vegetadas
- Superfícies impermeáveis - solo compactado, estradas, estacionamentos, etc

Por que estudar o escoamento superficial?

- Estabilidade de encostas - Geotecnia
- Processos erosivos - Geomorfologia/Geografia
- Perda de produtividade do solo - Agronomia
- Fluxo de contaminantes - Geotecnia ambiental
- Previsão de enchentes - Eng. Civil/Hidrologia/Desastres Naturais
- Recarga de aquíferos - Hidrogeologia
- Produção hídrica - Hidrologia de superfície

Evapotranspiração



OBS: alguns modelos hidrológicos consideram a evaporação por interceptação como parte da evapotranspiração

Definição de transpiração

O processo de transpiração, para ocorrer, necessita vencer uma série de resistências ao longo do sistema solo-planta-atmosfera, saindo do solo, passando pelas raízes, vasos condutores (xilema) e, finalmente, indo para a atmosfera

Transpiração

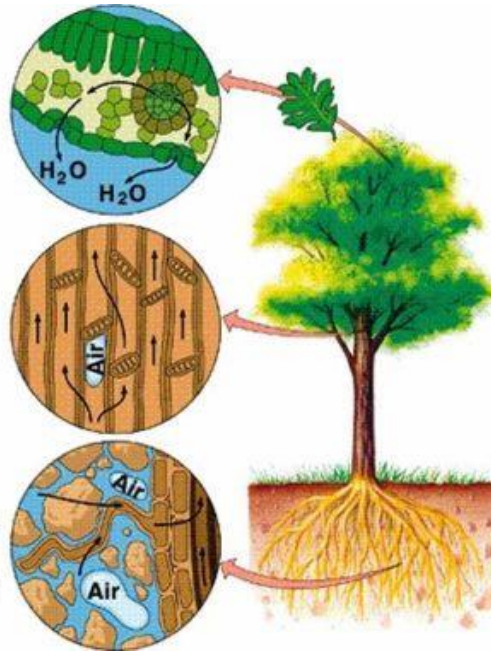
evaporação de água para o ar
diminui o potencial
hídrico na folha

Coesão

coluna de água no xilema
é mantida por coesão das
moléculas de água nos
elementos dos vasos

Tensão

baixo potencial hídrico na raiz
provoca a entrada de água do
solo, que se desloca por osmose
até à medula



MOVIMENTO
ASCENDENTE
DA ÁGUA.

DE Ψ MENOS
NEGATIVO
(SOLO-RAÍZ)
PARA
 Ψ MAIS
NEGATIVO
(FOLHA-AR)

$$\Psi_{\text{ar}} = -100 \text{ a } -1000 \text{ atm} \\ (\text{forçantes atmosféricas})$$

$$\Psi_{\text{folhas}} = -5 \text{ a } -40 \text{ atm}$$

$$\Psi_{\text{raíz}} = -1 \text{ a } -10 \text{ atm}$$

$$\Psi_{\text{solo}} = -0,1 \text{ a } -2 \text{ atm}$$

Estresse hídrico

Fatores condicionantes da ET

Processo complexo no qual 3 fatores são dominantes:

- 1) **Suprimento e demanda de água impostos pelas condições atmosféricas** - precipitação, radiação líquida, velocidade do vento, umidade e temperatura do ar
- 2) **Capacidade do solo (ou da superfície evaporativa) de transmitir água** - função da condutividade hidráulica e das características de armazenamento e retenção de água
- 3) **Influência da vegetação** - o tipo e densidade da vegetação influenciam nas taxas de transpiração, as quais, por sua vez, são condicionadas pelos processos ecofisiológicos e pela assimilação de água do solo por meio do sistema de raízes

Esses fatores não atuam como variáveis independentes, mas como um sistema fortemente acoplado.

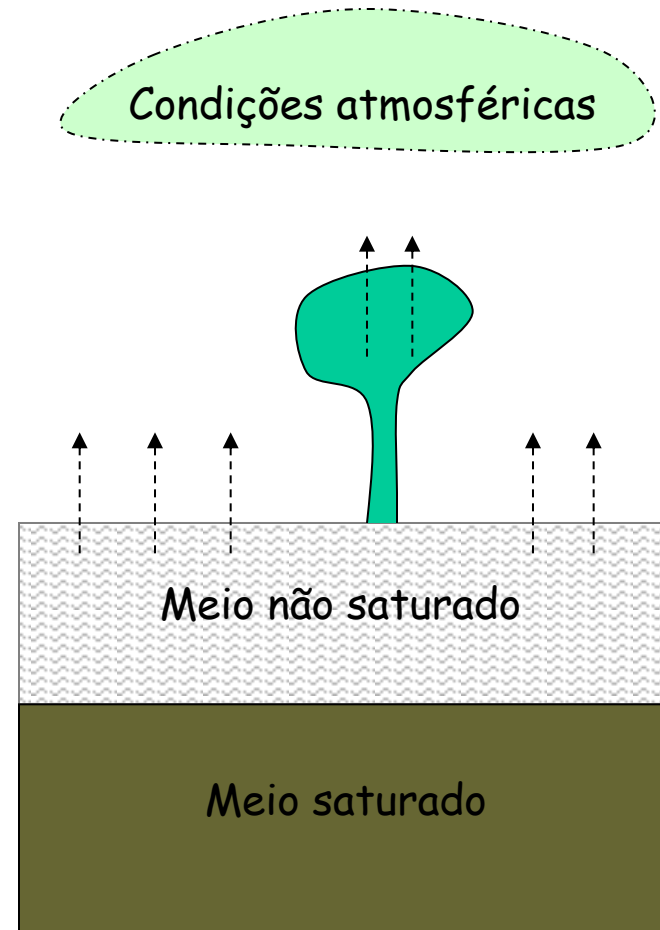
ETP e ETR

Evapotranspiração potencial - ETP

Máxima ET que pode ser transferida para a atmosfera - depende apenas das condições atmosféricas

Evapotranspiração real - ETR

Total transferido para a atmosfera de acordo com a disponibilidade hídrica existente (umidade do solo) e resistência das plantas

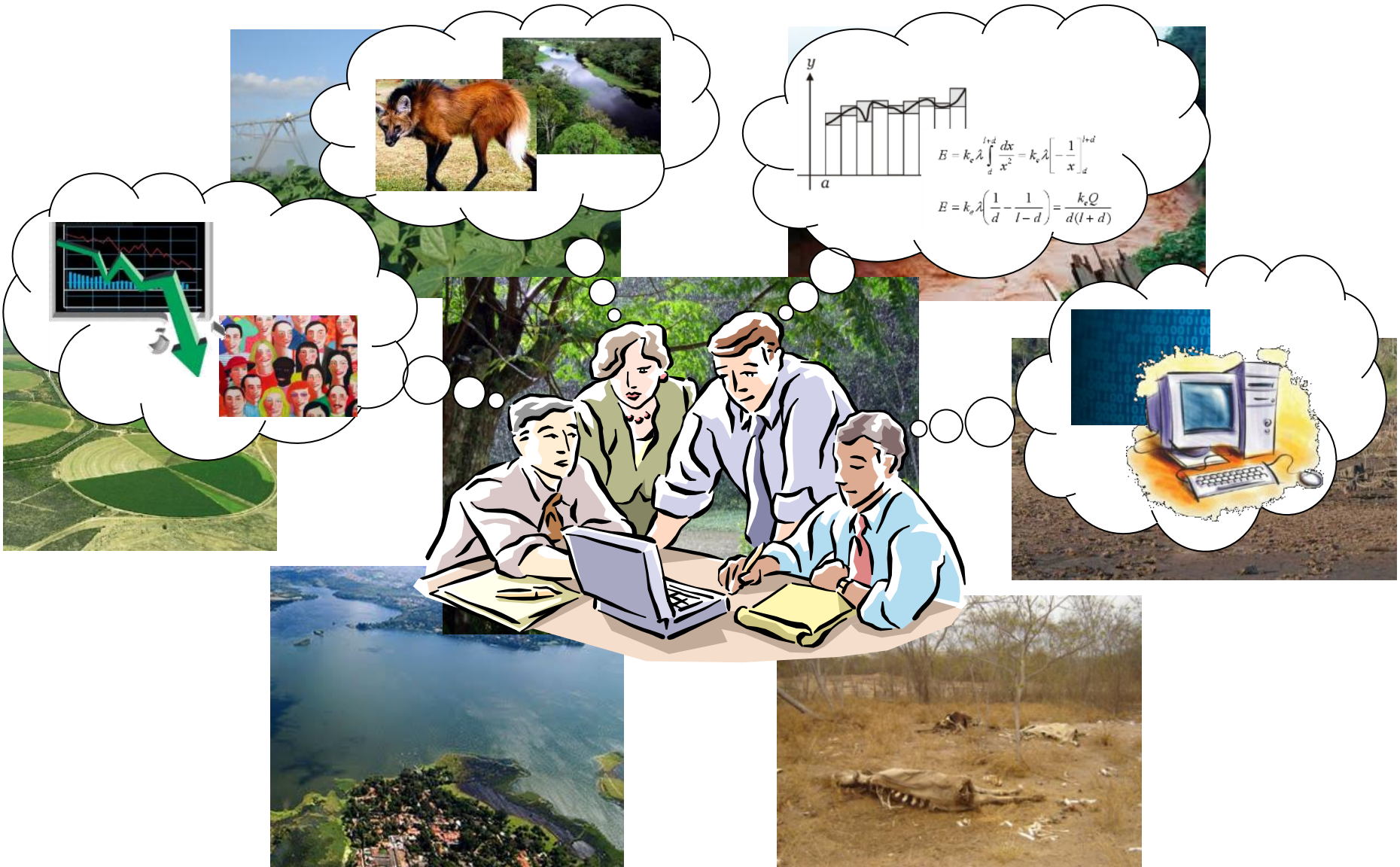


Equações para estimativa da ET

Método	Equação	Parâmetros
Dalton	$PE = B(p_{vsat} - p_v^{air})$ (mm/dia)	B = a transmission function which depends on the mean wind speed and turbulent mixing; p_{vsat} = surface saturation vapour pressure; p_v^{air} = vapour pressure at the near ground surface air.
Cons. massa	$PE = P - R$ (mm/dia)	P = precipitation, mm/day; R = runoff, mm/day.
Razão de Bowen (balanço de energia)	$PE = \frac{Q_n}{r_w L_v (1 + R)}$ (m/s)	Q_n = net radiation, J/m ² s; ρ_w = water density, kg/m ³ ; L_v = latent heat of vaporisation, J/kg; R = Bowen ratio.
Rohwer (1931)	$PE = 0.44(1 + 0.118u)(p_v - p_v^a)$ (mm/dia)	u = wind speed, miles/h; p_v = evaporating surface vapour pressure; p_v^a = vapour pressure above the surface;
Thorntwaite & Holzman (1942)	$PE(x_0, y_0) = C u_2^{0.76} x_0^{0.88} y_0 (p_v - p_v^a)$ (mm/dia)	x_0, y_0 = evaporating area, m; C = constant related to the temperature; u_2 = wind speed at 2 m, miles/day; p_v = vapour pressure at the surface; p_v^a = vapour pressure above surface unaffected by evaporation.
Thorntwaite (1948)	$PE = 1.6 \frac{L}{N} \frac{C}{12} \frac{10T_a}{30} \frac{1}{I}$ (cm/mês)	L = length of daylight, hours; N = number of days during the month; T_a = mean monthly air temperature, °C; $a = 6.75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} I^2 - 1.79 \cdot 10^{-2} I - 0.492$ $I = S_{month=1}^{12} (T_a / 5)^{1.514}$.

Método	Equação	Parâmetros
Penman (1948)	$PE = \frac{GQ_n + hE_a}{G + h}$ (m/s)	G = slope of the saturation vapor pressure versus temperature curve, mmHg/°F; Q_n = net radiation at the surface, m/s; h = psychrometric const., 0.27 mmHg/°F; $E_a = 0.35(1 + 0.15 W_w)(p_{vsat}^{air} - p_v^{air})$, m/s; W_w = wind speed, km/h; p_v^{air} = near surface air vapour pressure.
Blaney & Criddle (1950)	$PE = (0.457T + 8.13)p$ (mm/dia)	T = mean daily temperature, °C; p = mean annual fraction of day that is in daylight.
Jensen & Haise (1963)	$PE = (0.025T + 0.078) \frac{R_s}{59}$ (mm/dia)	T = air temperature, °C; R_s = incident solar radiation, mm/day.
Penman-Monteith (1965)	$PE = \frac{1}{\epsilon} \frac{\epsilon G A + r_a c_p D / r_a}{G + h(1 + r_s / r_a)}$ (MJ/m².dia)	G, h = same as in Penman (1948), kPa/°C; $A = R_n - G$, MJ/m² day; ρ_a = air vol. heat capacity, MJ/m³ °C; c_p = vapour pressure deficit, kPa; D = fraction of day that is in daylight; r_s, r_a = canopy and aerodynamic resistances to vapour transfer, day/m.
Pristley-Taylor (1972)	$PE = a \frac{G}{G + h} (R_n - G)$ (mm/dia)	a = empirical constant; G, h = same as in Penman (1948); R_n = net radiation, mm/day; G = soil heat flux, mm/day.
Hargreaves (1985)	$PE = 0.0023 S_0 \sqrt{d_T} (T + 17.8)$ (mm/dia)	S_0 = extraterrestrial radiation, mm/day; d_T = difference between the mean monthly maximum and minimum temperature, °C; T = temperature, °C.
Wilson (1994)	$AE = \frac{GQ_n + hE_a}{G + hA}$ (MJ/m².dia)	$G, Q_n, h, W_w, p_v^{air}$ = as in Penman (1948); $E_a = 0.35(1 + 0.15 W_w) p_v^{air} (B - A)$, m/s; $A = 1/RH$; $B = 1/RH_{air}$; RH = relative humidity at the surface; RH_{air} = relative humidity of the air.

Modelando um fenômeno...



Modelagem

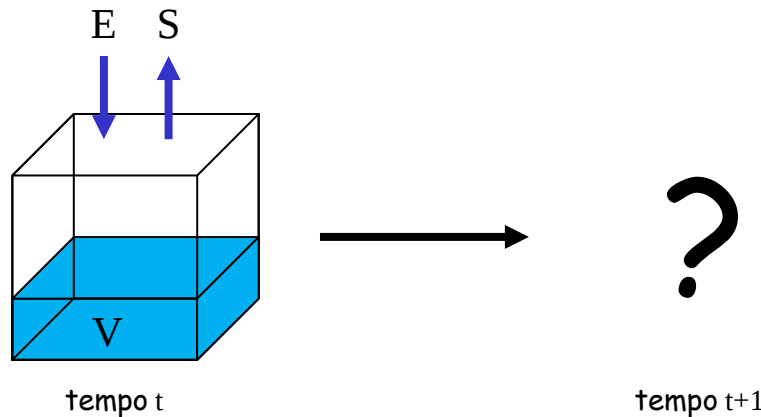
O que é um modelo?

- » É uma representação conceitual/matemática de um fenômeno
 - » Tipicamente o modelo irá tratar apenas de alguns aspectos do fenômeno estudado
- Um modelo é sempre uma simplificação da realidade!

Modelo de Balanço de Água no Solo

$$V_{t+1} = V_t + \Delta V$$

$$\Delta V = E - S$$



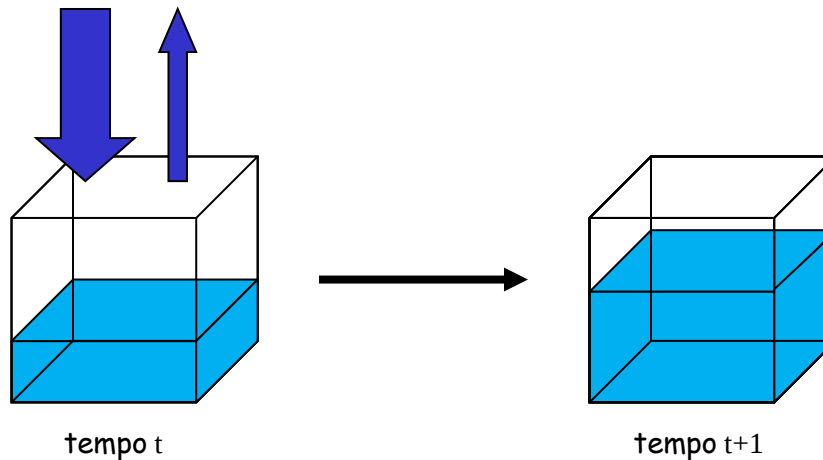
Modelagem

O que é um modelo?

- » É uma representação conceitual/matemática de um fenômeno
 - » Tipicamente o modelo irá tratar apenas de alguns aspectos do fenômeno estudado
- Um modelo é sempre uma simplificação da realidade!

Modelo de Balanço de Água no Solo

$$V_{t+1} = V_t + E_{\Delta t} - S_{\Delta t}$$



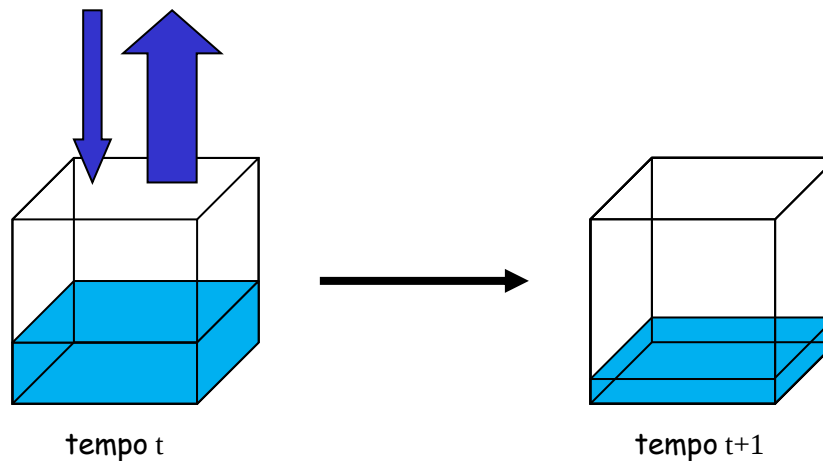
Modelagem

O que é um modelo?

- » É uma representação conceitual/matemática de um fenômeno
 - » Tipicamente o modelo irá tratar apenas de alguns aspectos do fenômeno estudado
- Um modelo é sempre uma simplificação da realidade!

Modelo de Balanço de Água no Solo

$$V_{t+1} = V_t + E_{\Delta t} - S_{\Delta t}$$

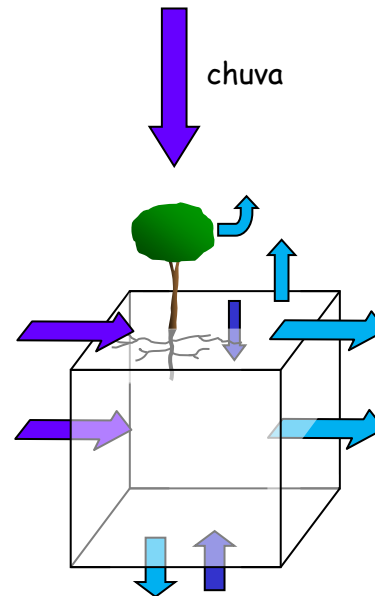
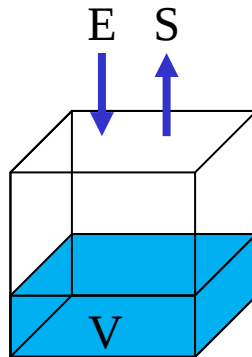


Modelagem

Dois modelos de um mesmo fenômeno deveriam ser iguais?

- » Não necessariamente
- » Cada modelo pode ter um objetivo diferente ou ainda ter diferenças conceituais ou de implementação decorrentes de decisões tomadas durante o desenvolvimento do modelo

Modelo de Balanço de Água no Solo



Modelagem

Quais as etapas da modelagem?

- » Caracterizar o sistema na qual o fenômeno se insere
- » Fazer algumas suposições sobre como os vários componentes funcionam e interagem entre si
- » Traduzir tudo em equações/procedimentos e num programa de simulação
- » Determinar os valores de cada parâmetro (medidas reais, valores de referência ou calibração)
- » Fazer a validação

O modelo é bom?

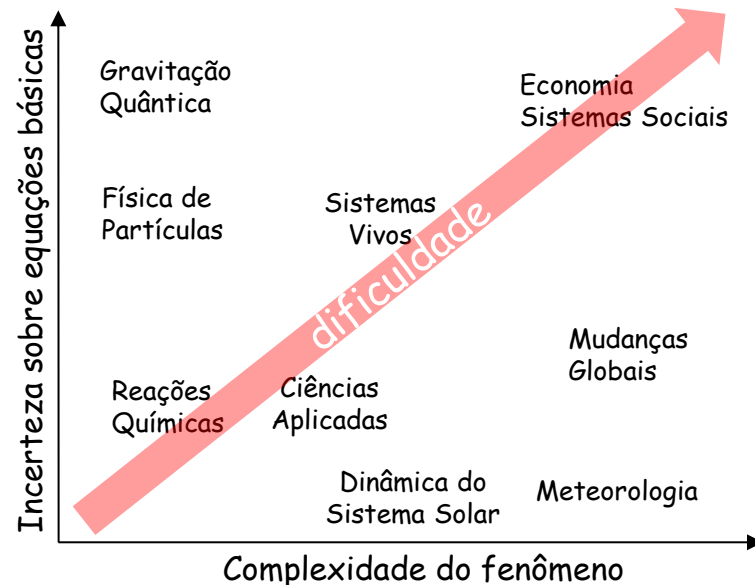
- » Explica observações passadas? Foi bem calibrado?
- » Prediz observações futuras? Foi validado?
- » É generalizável? É robusto? Pode ser aplicado em outros lugares/períodos?
- » Consegue estimar a incerteza dos resultados? Os resultados são confiáveis?
- » É simples? Necessita poucos dados de entrada?
- » É fácil de usar? Tem interface amigável?

Modelagem

E para que modelar?

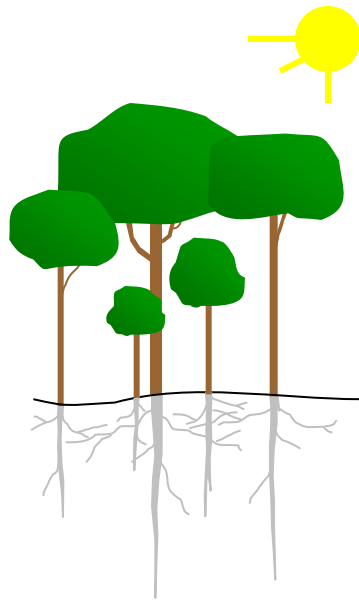
- » Explicitar hipóteses $\uparrow$ impermeabilização $\rightarrow$ $\uparrow$ enchentes?
- » Avaliar diferentes combinações de eventos $\uparrow$ desmatamento e $\downarrow$ chuvas $\rightarrow$?
- » Simular condições inexistentes ou muito raras $\uparrow$ consumo d'água e seca > 5 meses $\rightarrow$?

Há limites para se modelar um fenômeno?



Modelagem Ambiental

processos ambientais



- » fenômenos tridimensionais e dinâmicos
- » variações contínuas no espaço e no tempo
- » comportamentos não lineares
- » componentes aleatórios
- » múltiplas escalas de tempo e espaço

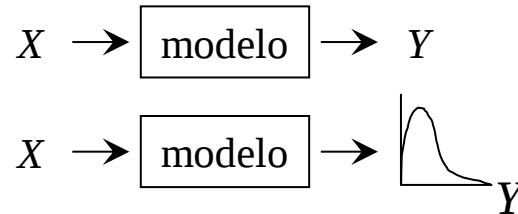
Como representar estes processos?

» simplificação <<

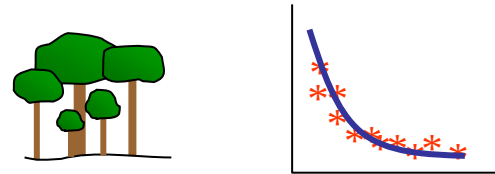
Modelagem Ambiental

Classificação

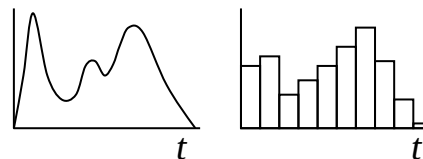
» determinístico ou estocástico



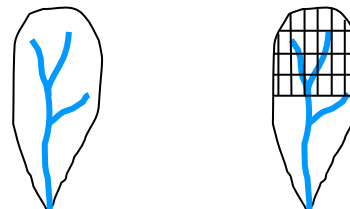
» baseado em processos ou empírico



» contínuo ou discreto (no tempo)

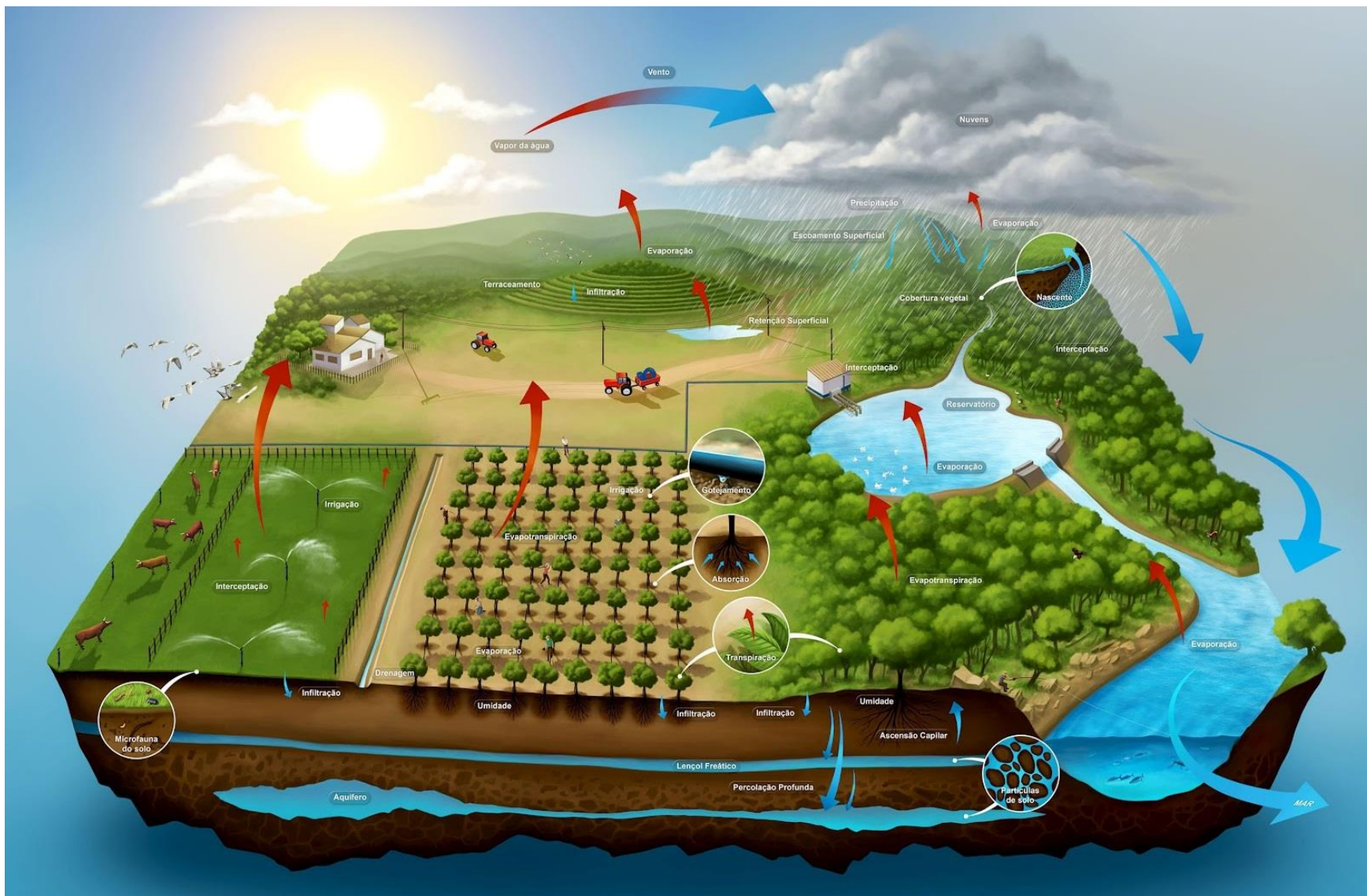


» concentrado ou distribuído (no espaço)

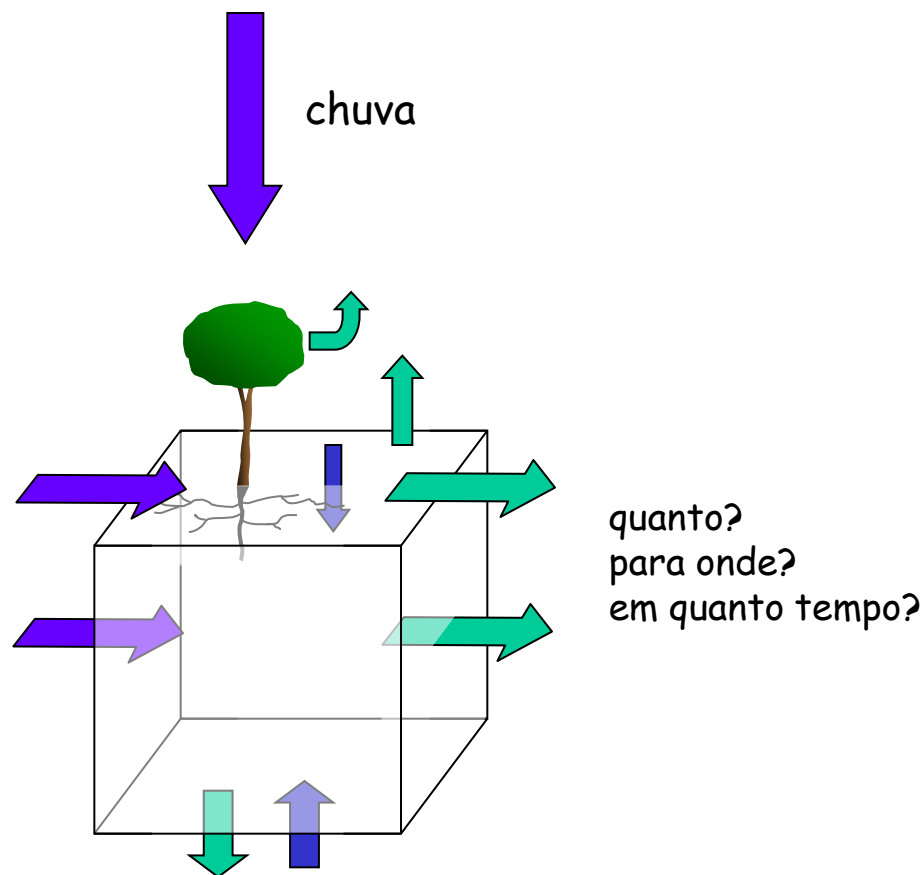
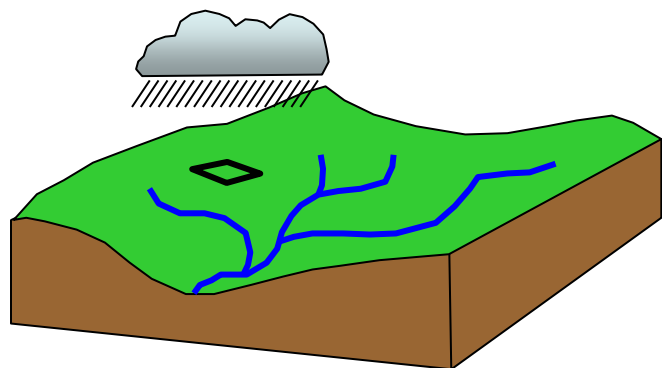


» estático ou dinâmico $X_{t+1} \stackrel{?}{=} f(X_t)$

Modelagem Hidrológica



Modelo Hidrológico Distribuído



Modelo Hidrológico Distribuído

Escolha do melhor modelo depende de:

- quais processos necessitam ser representados e/ou estimados
- qual a precisão desejada

compromisso entre escala temporal x escala espacial

Regra Geral

quanto mais processos e maior precisão
mais parâmetros serão necessários
menor deverá ser o passo de tempo do modelo
mais fina a escala espacial
implica em mais dados e maior estrutura computacional!

Se quero estudar o impacto da mudança de uso e cobertura do solo numa
bacia hidrográfica, preciso modelar a distribuição de água no solo?
provavelmente não!

Modelo Hidrológico Distribuído

Passos:

- avaliar quais modelos são usados para seu tipo de estudo
artigos de congresso e revistas especializadas
teses e dissertações (maior detalhe)
- identificar quais parâmetros/medidas serão necessários
manuais, notas técnicas e memoriais descritivos
- verificar se os dados disponíveis são compatíveis com o modelo escolhido
passo de tempo (diferentes processos pedem diferentes passos de tempo)
representação espacial: pontos ou grades? resolução espacial?
- providenciar a estrutura computacional necessária para executar o modelo
memória
espaço em disco: dados de entrada e de saída
número de processadores (processamento paralelo)

Modelo Hidrológico Distribuído

Modelo próprio ou sistema pronto?

Implementar seu próprio modelo

Vantagens:

- liberdade para representar os processos que deseja
- escolher as equações ou abordagens mais adequadas

Desvantagens:

- definir quais equações ou abordagens utilizar
- implementar soluções numéricas complexas
- compatibilizar resoluções temporal e espacial dos dados de entrada

Modelos Hidrológicos Prontos

Vantagens:

- ajuda de grupos que trabalham no mesmo modelo
- procedimentos em geral são documentados

Desvantagens:

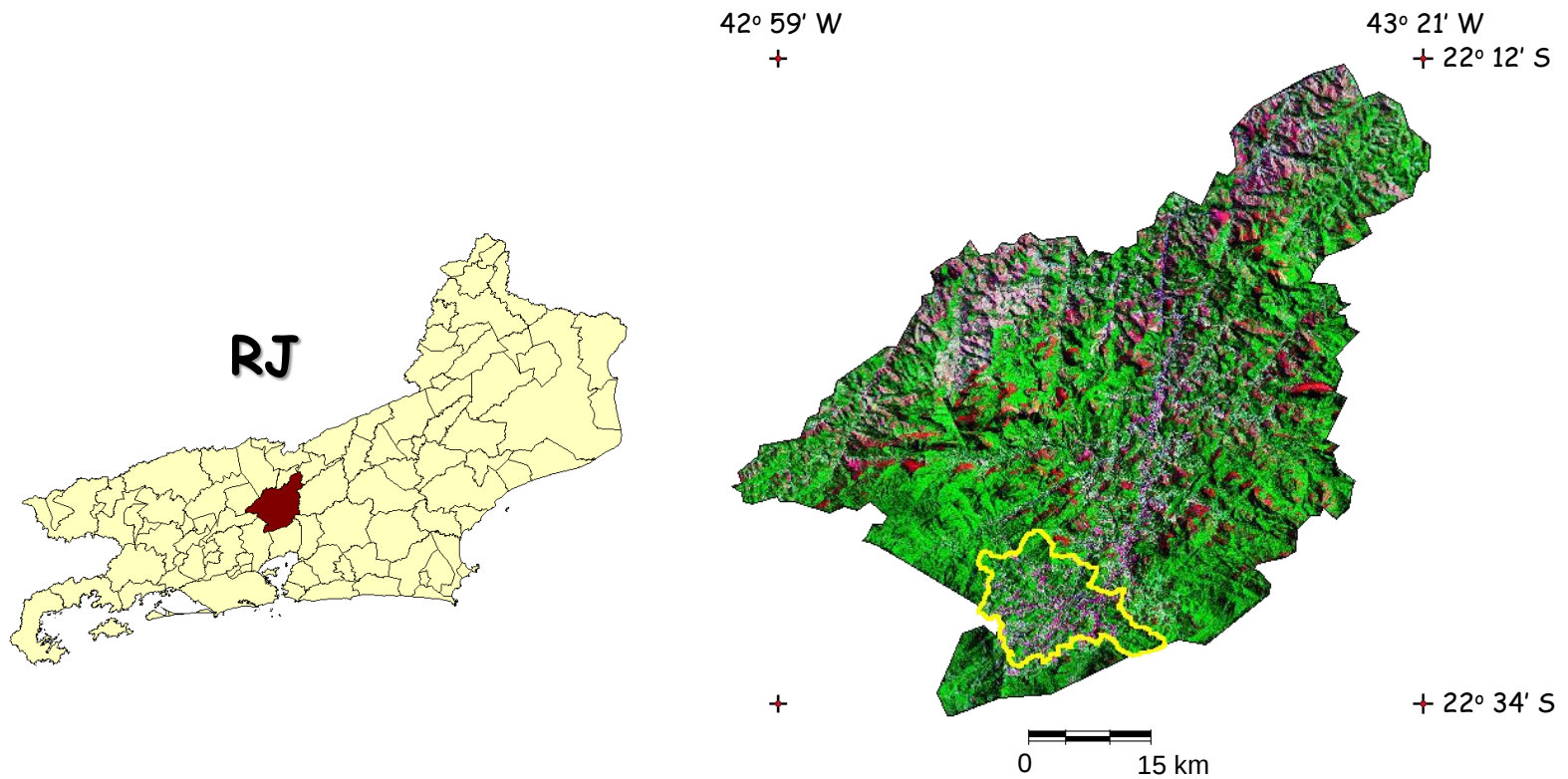
- limitar a análise dos resultados às saídas do modelo
- preparação dos dados (maior consumo de tempo!)

MODELAGEM HIDROLÓGICA DINÂMICA DISTRIBUÍDA PARA ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UMA MICROBACIA URBANA

Mestrado em Sensoriamento Remoto
Leonardo Marini Pereira
2008

Camilo Daleles Rennó
Leila Maria Garcia Fonseca
Orientadores

Área de Estudo



Petrópolis/RJ

Modelo CN-SCS

O modelo Curva-Número da *Soil Conservation Service* é um modelo chuva-vazão que visa estimar o quanto da precipitação é transformado em escoamento rápido (desconsidera fluxo de base)

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} & \text{se } P > I_a \\ Q = 0 & \text{c.c.} \end{cases} \quad \begin{aligned} I_a &= \lambda S \\ S &= 254 \left(\frac{100}{\text{CN}} - 1 \right) \end{aligned}$$

Q - o escoamento superficial em mm;
P - precipitação em mm;
I_a - absorção inicial;
S - fator de retenção;
CN - valor de Curva Número tabelado;
 λ - constante (0,2)

função de:

- uso e cobertura (tabela)
- declividade
- umidade antecedente

Condição de Umidade Prévia (AMC)

AMC 1: Solo seco (CN_1)

AMC 2: Solo intermediário (**CN_2**)

AMC 3: Solo úmido (CN_3)

$$CN_3 > CN_2 > CN_1$$

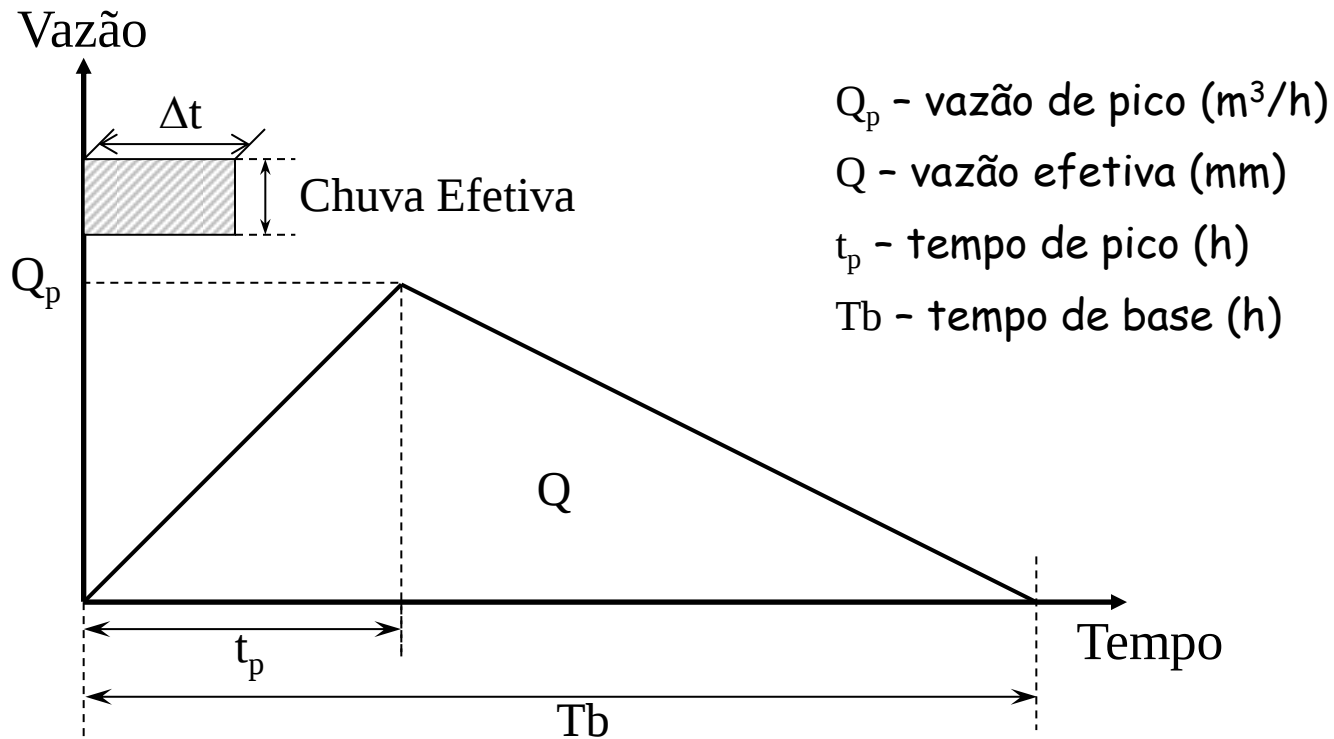
$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp[2,533 - 0,0636(100 - CN_2)]}$$

$$CN_3 = CN_2 \exp[0,00673(100 - CN_2)]$$

$$CN_{2Decl} = \frac{1}{3}(CN_3 - CN_2)[1 - 2\exp(-13,86Dec)] + CN_2$$

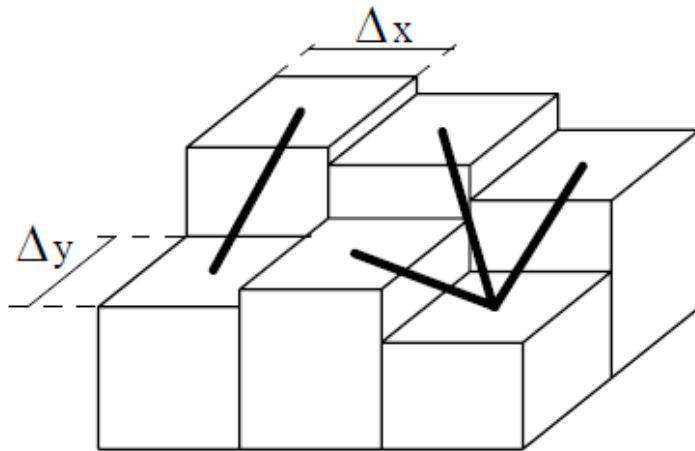
Hidrograma

O escoamento superficial calculado Q é distribuído no tempo segundo um hidrograma teórico



Linhas de Fluxo de Escoamento

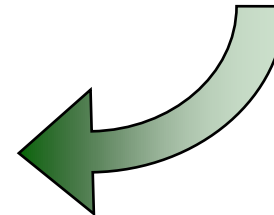
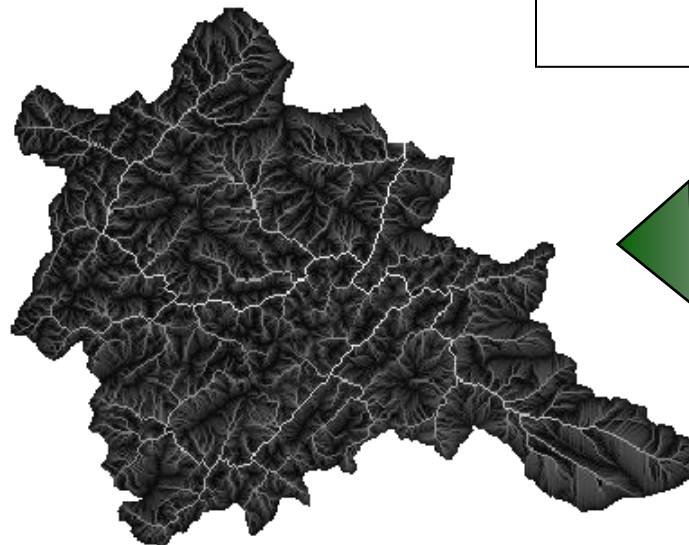
Algoritmo D8



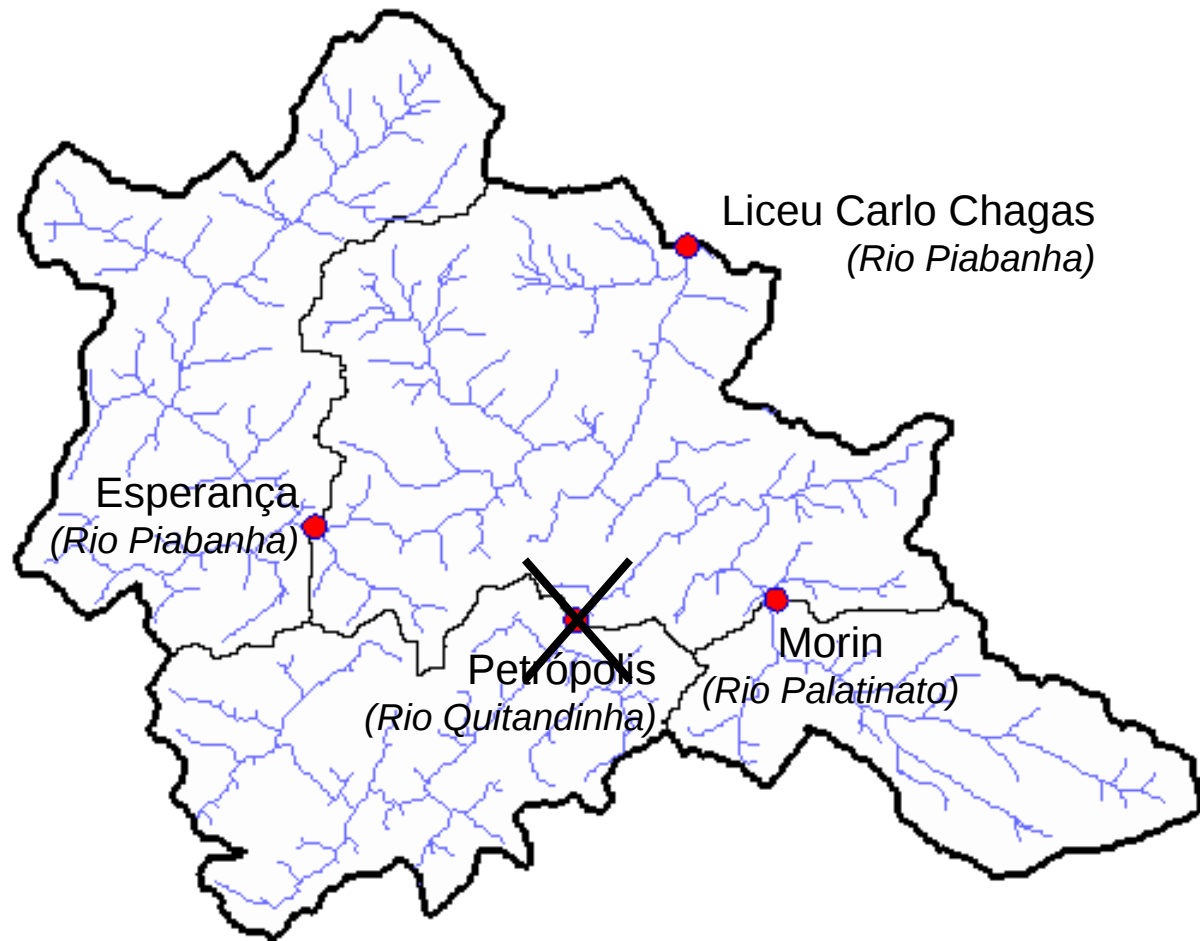
■ Codificação LDD

4	3	2
5	0	1
6	7	8

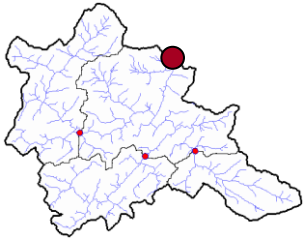
Grade
Acumulada



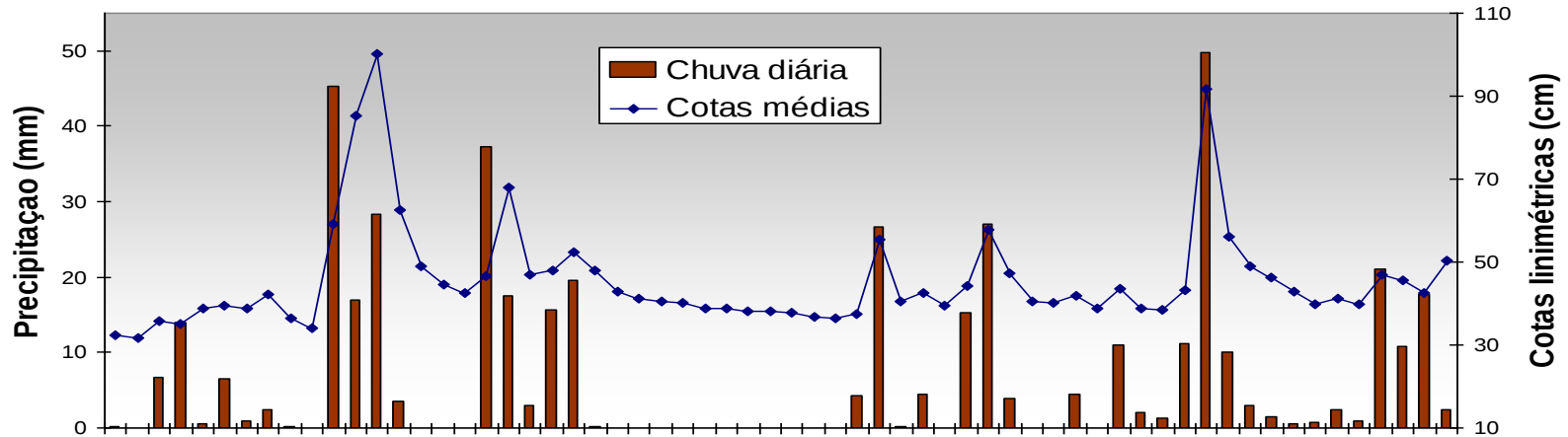
Estações de Monitoramento



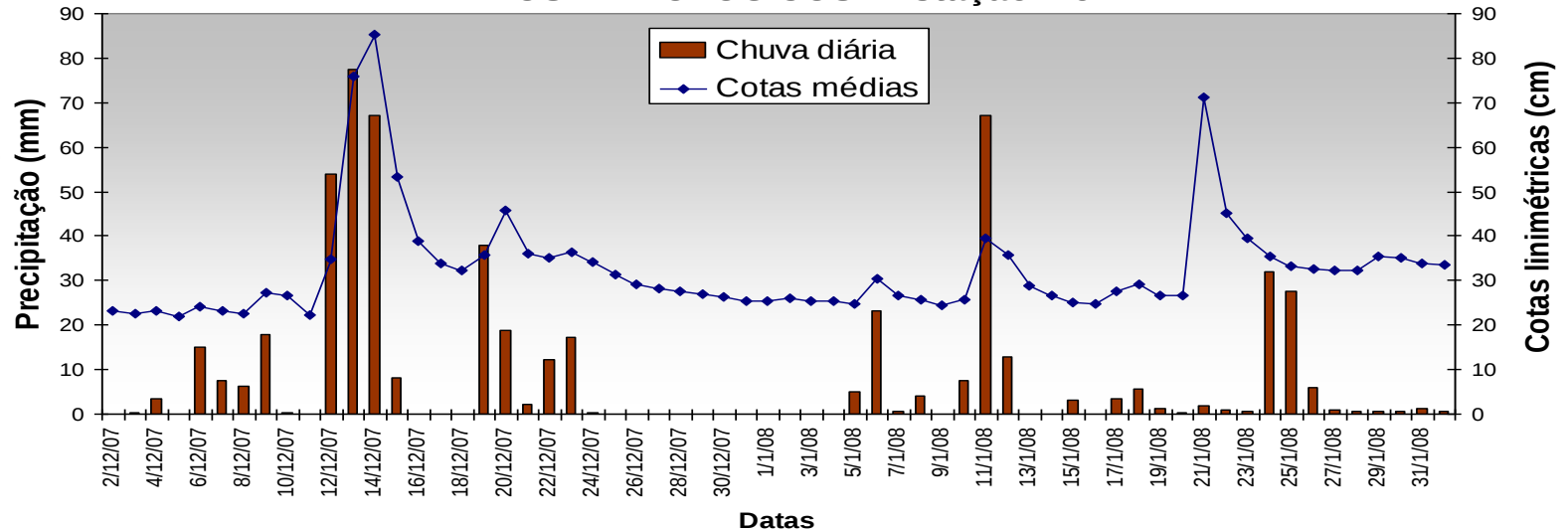
Dados Hidrológicos



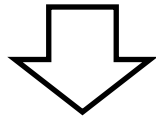
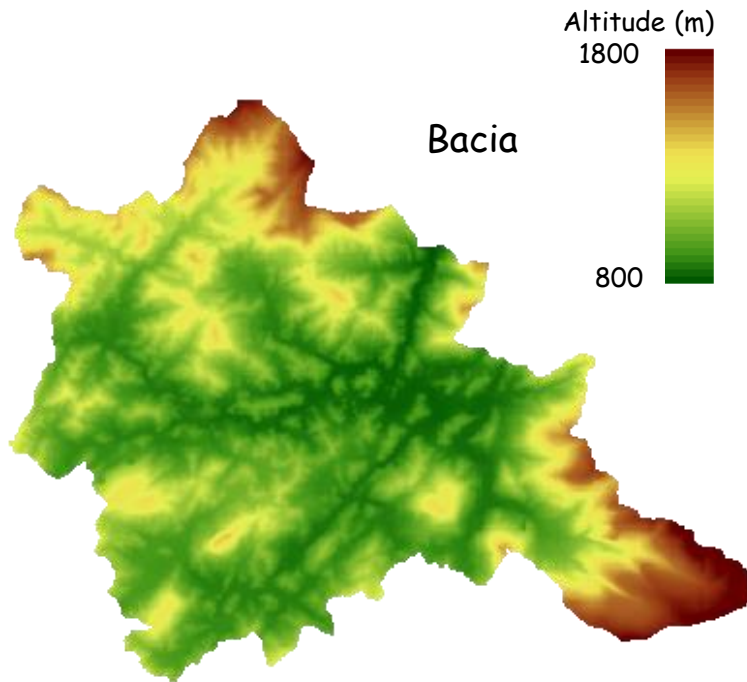
DADOS HIDROLÓGICOS - Estação Lceu Carlos Chagas



DADOS HIDROLÓGICOS - Estação Morin

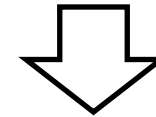
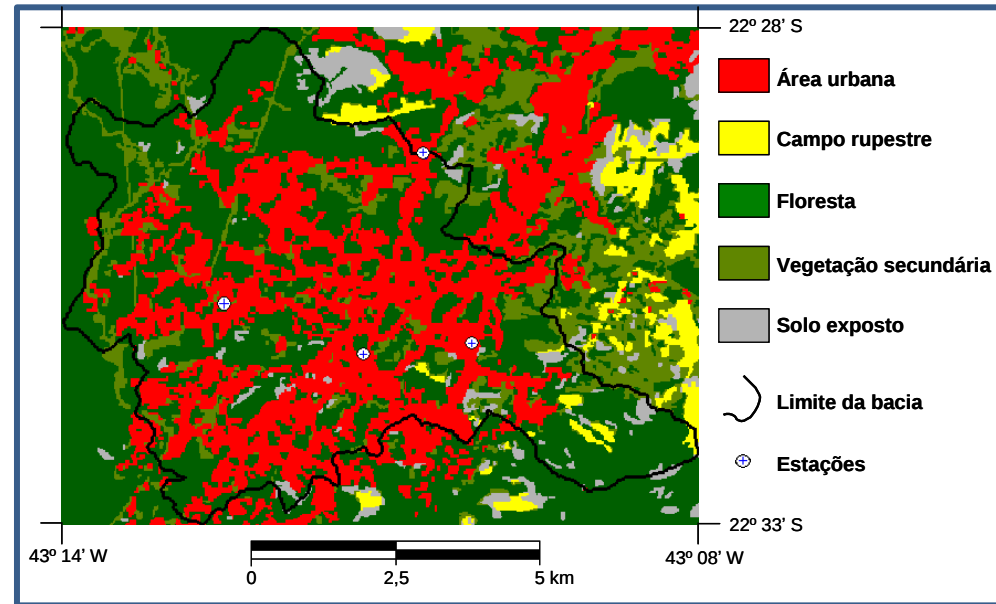


Altimetria e Mapa de Uso e Cobertura



Direção
de Fluxo

Declividade



CN

Calibração dos parâmetros (14)

Valores iniciais de Curva Número para
as classes de uso e cobertura do solo.

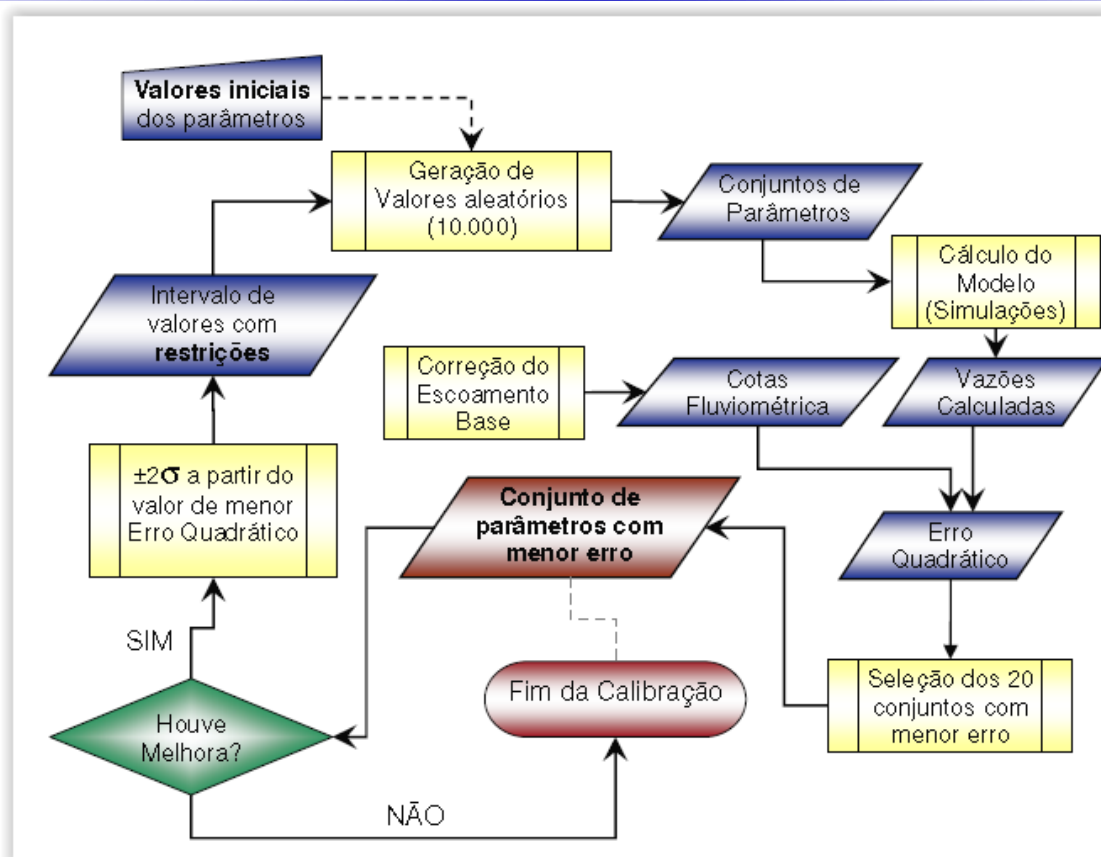
Classe	Curva Número
Área Urbana	95
Campo Rupestre	74
Floresta	70
Vegetação Secundária	76
Solo Exposto	86

- Valores de CN para as classes de uso e cobertura do solo (5);
- Limite das condições AMC (I e III) (2);
- λ (1);
- Escoamento Base para as três estações (3);
- Ponderação para a chuva de cada uma das estações (3);

Calibração dos parâmetros (14)

Parâmetro	Descrição	Limite Inferior	Limite Superior
1) CN_ArUrb	Valor de CN para Área Urbana	80	100
2) CN_Camp	Valor de CN para Campo Rupestre	60	80
3) CN_Floresta	Valor de CN para Floresta	60	80
4) CN_VegSec	Valor de CN para Vegetação Secundária	60	80
5) CN_Solo	Valor de CN para Solo Exposto	70	90
6) Lim_Inf_AMC	Limiar de chuva acumulada nos últimos 5 dias abaixo do qual considera-se AMC I	0	50
7) Lim_Sup_AMC	Limiar de chuva acumulada nos últimos 5 dias acima do qual considera-se AMC III	50	100
8) λ (Ia/S)	Razão entre a absorção inicial e o fator de retenção	0,05	0,3
9) EBase_Liceu	Inclinação da reta do escoamento base da estação Liceu	0	0,5
10) EBase_Esp	Inclinação da reta do escoamento base da estação Esperança	0	0,5
11) EBase_Morin	Inclinação da reta do escoamento base da estação Morin	0	0,5
12) P_ChuvaLiceu	Peso da chuva medida na estação Liceu	0	1
13) P_ChuvaEsp	Peso da chuva medida na estação Esperança	0	1
14) P_ChuvaMorin	Peso da chuva medida na estação Morin	0	1

Calibração dos parâmetros (14)



$$\varepsilon = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (CFn_i - Qn_i)^2$$

CFn_i são as cotas fluviométricas normalizadas;

Qn_i são as vazões diárias calculadas normalizadas;

n é a quantidade de eventos chuvosos; e

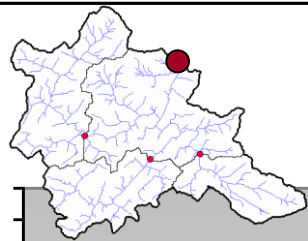
N é a quantidade de estações de controle utilizadas na avaliação.

Resultado da Calibração

PARÂMETRO	VALOR	PARÂMETRO	VALOR
1) CN_ArUrb	97,38283	8) λ (la/S)	0,05048
2) CN_Camp	74,38872	9) EBase_Liceu	0,149 mm/dia
3) CN_Floresta	69,92489	10) EBase_Esp	0,088 mm/dia
4) CN_VegSec	76,87716	11) EBase_Morin	0,067 mm/dia
5) CN_Solo	83,97503	12) P_ChuvaLiceu	0,610
6) Lim_Inf_AMC	20,28 mm	13) P_ChuvaEsp	0,355
7) Lim_Sup_AMC	52,94 mm	14) P_ChuvaMorin	0,035

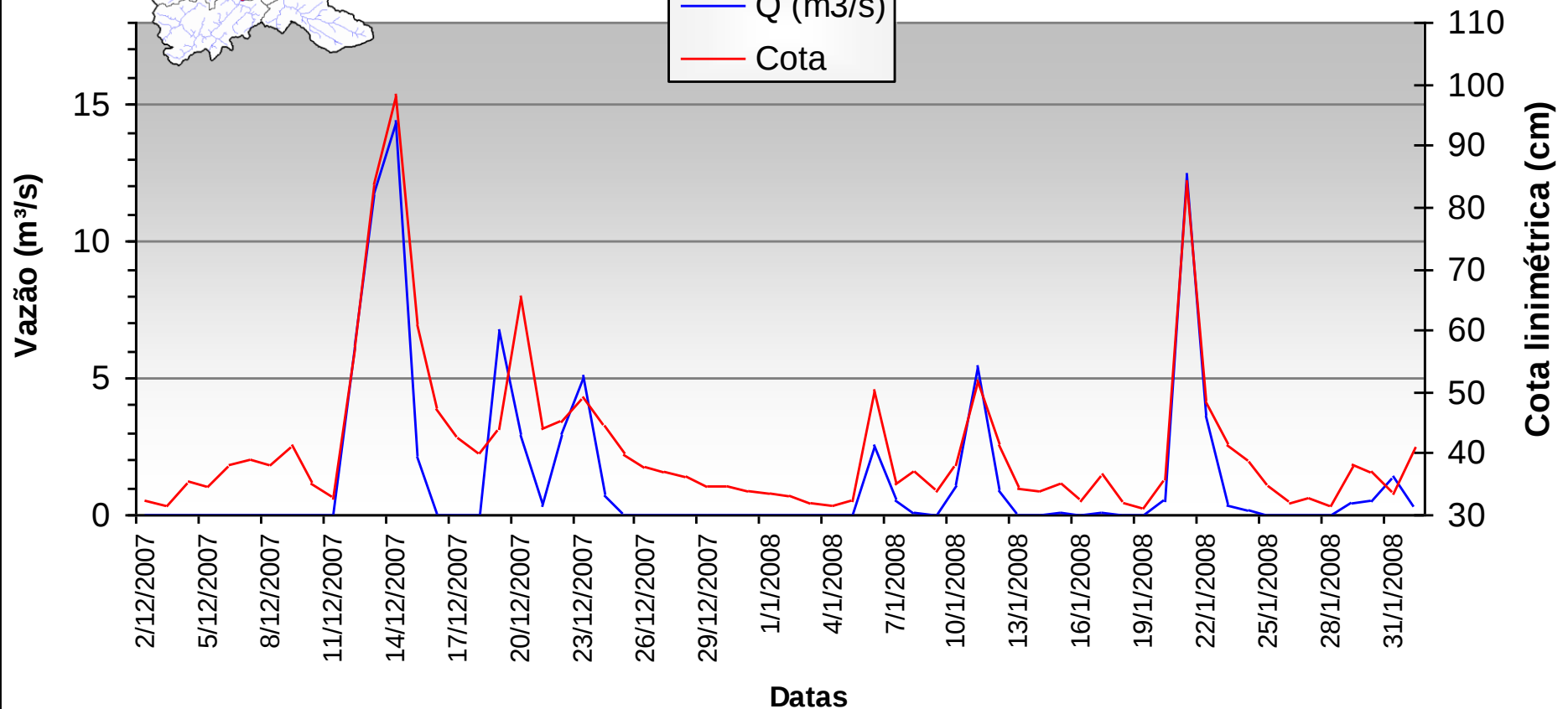
$$\varepsilon = 1,8037$$

Calibração - Est. Liceu

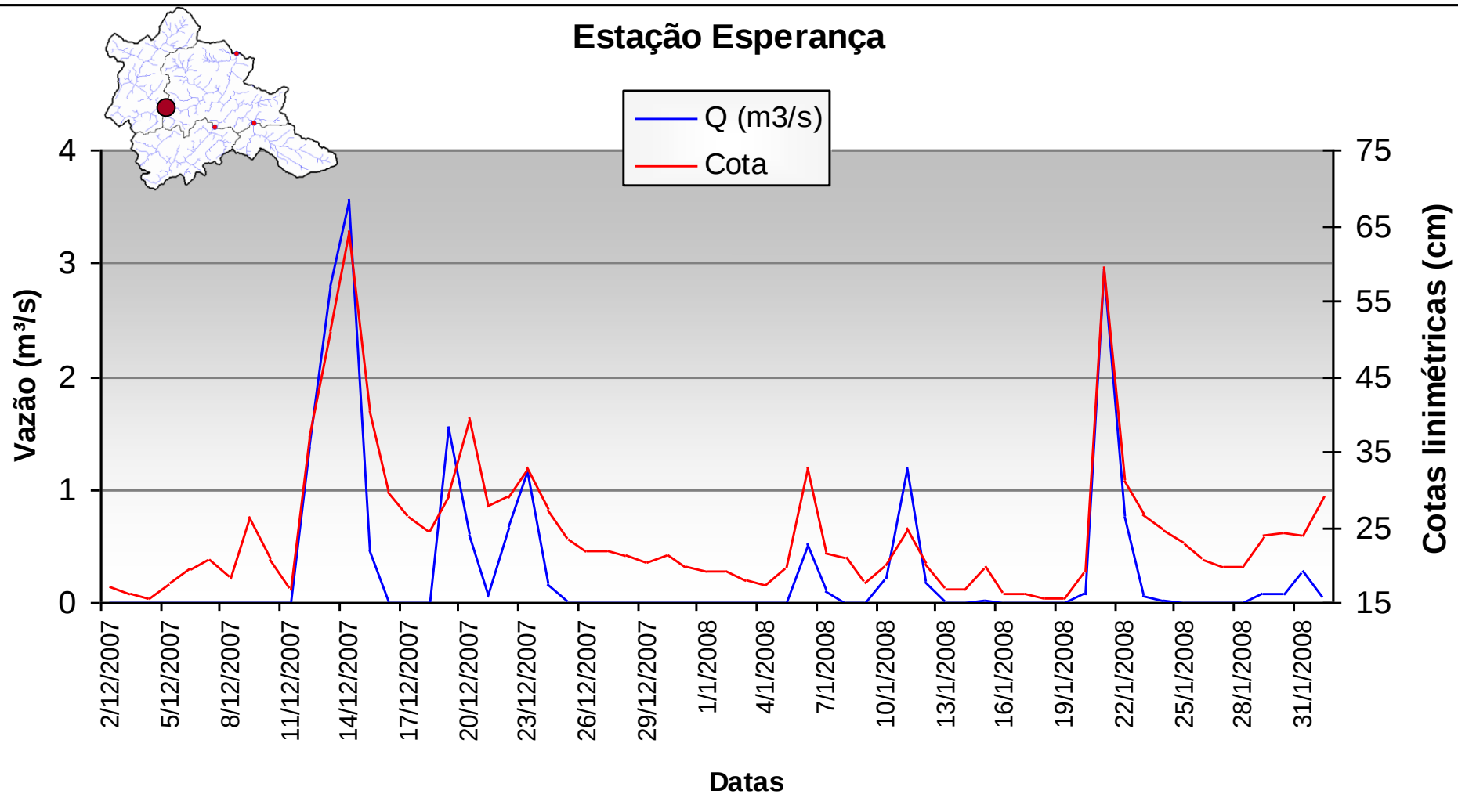


Estação Liceu Carlos Chagas

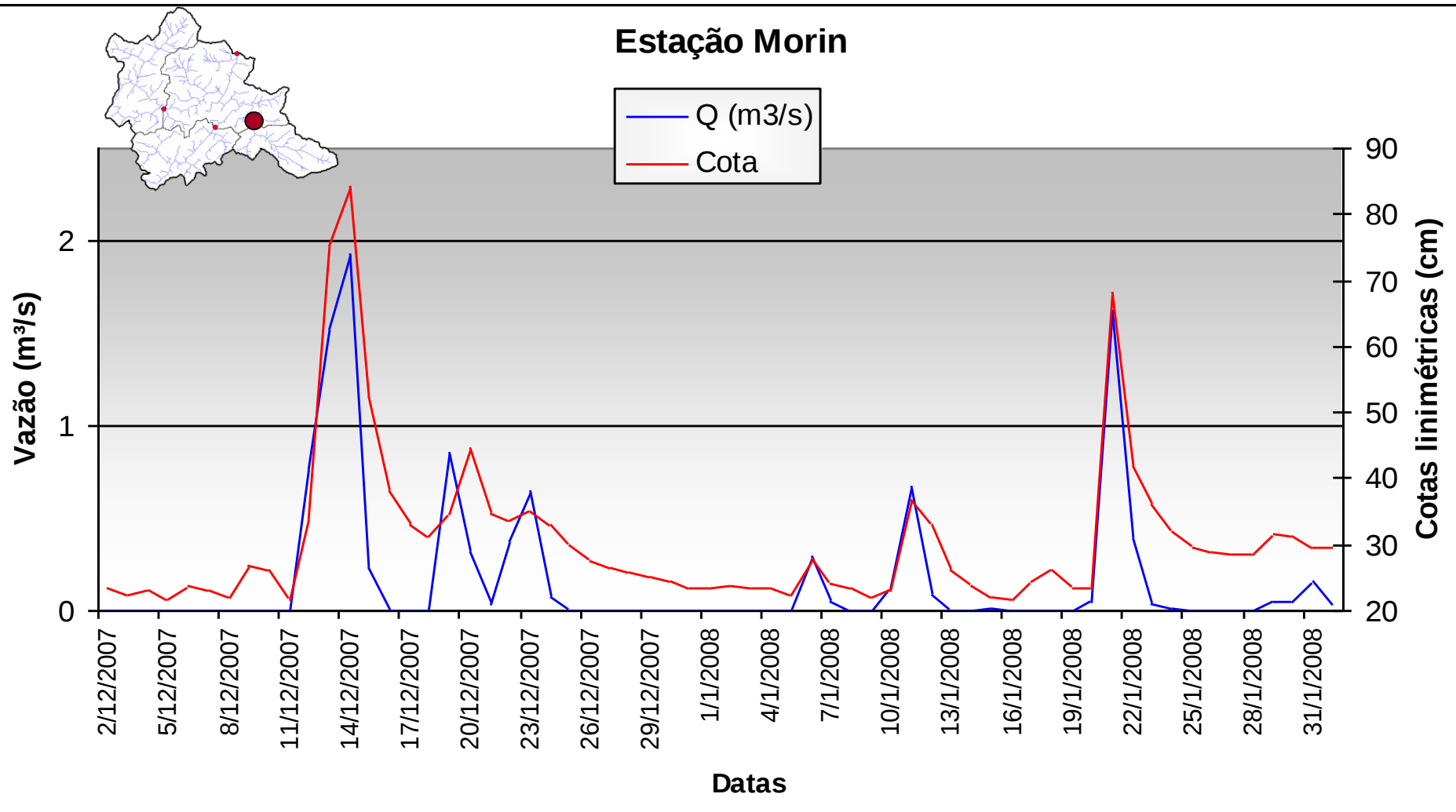
— Q (m³/s)
— Cota



Calibração - Est. Esperança



Calibração - Est. Morin



Validação

Estação Liceu Carlos Chagas

