

Capítulo 5 – Água subterrânea

Introdução a Hidrologia de Florestas

- A. **Introdução.** Água que entra no regolito divide-se em umidade do solo na zona areada (não saturado) e lençol freático (saturado). O lençol freático separa estas duas zonas. O sistema radicular normalmente se situa na zona de aeração pois as raízes necessitam oxigênio para crescer.
- B. **Complexo mineral do solo.** 5 classes de partículas: seixos (> 2 mm), areia grossa (0,2 – 2 mm), areia fina (0,02 – 0,2 mm), limo (0,002 – 0,02 mm) e argila (< 0,002 mm). Textura do solo refere-se a composição relativa das partículas. Estrutura refere-se ao arranjo, orientação e organização das partículas do solo (agregados prismáticos, laminares, colunares, granulares e em bloco). O espaço total de poros varia de 35% para solos pobremente agregados a 65% para solos bem agregados. Textura e estrutura afetam a distribuição dos espaços porosos do solo, que por sua vez afetam infiltração, capacidade de retenção de água, movimento de água, umidade do solo e crescimento de plantas.

C. **Umidade do solo**

$$V = V_s + V_w + V_a \quad [5.1]$$

V é volume do solo; V_s é volume da parte sólida, V_w é volume de água e V_a é volume de ar.

1. Densidade global. Uma amostra de volume conhecido é seca em estufa a 105 °C durante 24 horas e a densidade global é dada por:

$$d_g = \frac{\text{massa de solo seco (g)}}{\text{volume de solo (cm}^3\text{)}} \quad [5.2]$$

2. Densidade real. É a densidade real das partículas do solos sem ar (em torno de 2,6 g/cm³)

3. Porosidade do solo. É a fração do volume de solo que é ocupado por poros:

$$\xi = \frac{V_w + V_a}{V} \quad [5.3]$$

4. Umidade do solo. Base na quantidade de água perdida em estufa a 105°C após 24 a 48 horas (para atingir peso constante). Em base volume temos:

$$\theta_v = \frac{V_w}{V} \quad [5.4]$$

Pode-se também expressar umidade como fração de peso de solo seco (base peso):

$$\theta_w = \frac{W_w}{W_s} \quad [5.5]$$

em que W_w é o peso da água do solo e W_s é o peso do solo.

A relação entre densidade global (d_g), umidade base volume (θ_v) e umidade base peso (θ_w) é:

$$\theta_v = d_g \times \theta_w \quad [5.6]$$

Usa-se umidade volumétrica para se calcular a lâmina d'água equivalente estocada no solo, quando se quer realizar o balanço hidrológico (relacionar precipitação, água no solo, evapotranspiração e deflúvio na mesma unidade de medida).

5. Saturação do solo. Saturação ocorre quando todos os poros são preenchidos por água.

Exemplo: Uma amostra de solo de 20 cm³ e peso 30,6 g, foi secada em estufa pesando no final 25,5 g. Calcule d_g , θ_w e θ_v .

$$d_g = 25,5 \text{ g} / 20 \text{ cm}^3 = 1,275 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$\theta_w = (30,6 - 25,5) \text{ g} / 25,5 \text{ g} = 0,2 \text{ g} / \text{g}$$

$$\theta_v = (30,6 - 25,5) \text{ g} / 20 \text{ cm}^3 = 0,255 \text{ g} / \text{cm}^3, \text{ ou}$$

$$\theta_v = d_g \theta_w = 1,275 \text{ g} / \text{cm}^3 \times 0,2 = 0,255 \text{ g} / \text{cm}^3$$

Como 1 cm³ de H₂O = 1g, pode-se multiplicar a umidade base volume por 1cm³/g, para se obter uma fração adimensional, para ser usada em qualquer sistema de unidades. Neste

exemplo, quantos mm de água estão armazenados se esta amostra representa uma camada de 50 cm de solo?

$$\begin{aligned} \text{mm de H}_2\text{O} &= (\theta_v) \times (\text{profundidade da camada}) = \\ &= (0,255 \text{ g/cm}^3) \times 1 \text{ cm}^3 / \text{g} \times (50 \text{ cm}) = 12,75 \text{ cm} = 127,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

D. Medida de umidade do solo

1. Método gravimétrico. Pesagem de amostras de solo não perturbadas e uso da equação [5.7].
2. Condutância elétrica. Baseada na mudança da condutividade elétrica com a umidade (blocos porosos de nylon, fibra de vidro ou gypsum embebidos em dois eletrodos. Os blocos se deterioram rapidamente no solo (método pouco preciso).
3. Espalhamento de neutrons. Baseado no uso de uma fonte radioativa de neutrons rápidos que tem massa quase idêntica a dos átomos de hidrogênio. Os neutrons são então freados e defletidos mais pelo hidrogênio do que por qualquer outro elemento na maioria dos solos. Os neutrons lentos são absorvidos num detetor e contados eletronicamente e relacionados por calibração com uma fonte de hidrogênio (água pura). Como hidrogênio no solo esta diretamente relacionado à água, medir densidade de hidrogênio significa medir densidade da água (g/cm^3).

E. Energia da água no solo. Coesão entre partículas de água e adesão entre partículas do solo e da água. Produzem pressão negativa (tensão ou sucção) no solo. Quando a água é drenada dos poros, desenvolve-se o menisco devido a coesão na superfície da água. O filme de água em torno das partículas de solo torna-se cada vez mais fino, tornando a força de adesão cada vez maior. A água em poros menores é retida mais fortemente que água em poros maiores. A pressão do ar nos poros é a atmosférica, mas a pressão no interior dos filmes de água é menor que a atmosférica.

1. Massa é qualquer quantidade de água ($M=P/a$), unidades M
A unidade de peso vem de $P = Mg$ (M.LT^{-2})

2. **Potencial de pressão (P)**. Trabalho dado por:

$$P = (\text{força}) \times (\text{distância}) = (Mg)(L) \quad \text{Unidades : } \text{ML}^2\text{T}^{-2}$$

Por convenção, no lençol freático P é positivo e negativo na zona não saturada. $P = 0$ é a pressão atmosférica padrão (1013 mb). Potencial negativo é chamado Potencial Matricial, e na faixa positiva é Potencial de Pressão (carga), ou simplesmente carga.

3. **Potencial gravitacional (Z)**. Trabalho baseado na posição, com relação ao nível do mar:

$$Z = (\text{força}) \times (\text{distância}) = (Mg)(L) \quad \text{Unidades : } \text{ML}^2\text{T}^{-2}$$

neste caso distância é vertical.

4. **Potencial osmótico (O)**. Devido a diferença de concentração de sais, em geral desprezível em solos mas fundamental em relações água-planta.

Potencial Total (Ψ) de uma partícula líquida no solo é a soma dos potenciais acima:

$$\Psi = P + O + Z \quad \text{Unidades : } \text{ML}^2\text{T}^{-2} \quad [5.8]$$

É conveniente expressar os componentes do potencial de energia em energia por unidade de peso de água. O resultado é simplesmente uma distância, geralmente medida em cm:

$$\Psi/Mg = P/Mg + O/Mg + Z/Mg \quad \text{Unidades : } \text{ML}^2\text{T}^{-2} / \text{MLT}^{-2} = \text{L}$$

A carga (Potencial de Pressão) por unidade de peso (P) é medida por manômetros ou piezômetros.

5. A tensão (Potencial Matricial) é medida por **tensiômetros** (Figura 5.2a). A água no tubo U atinge o equilíbrio com a água no solo. A quantidade $-P$ é uma medida direta do potencial matricial do solo e Z é uma medida do potencial gravitacional relativo do centro da cápsula. O potencial total Ψ é $Z - P$.

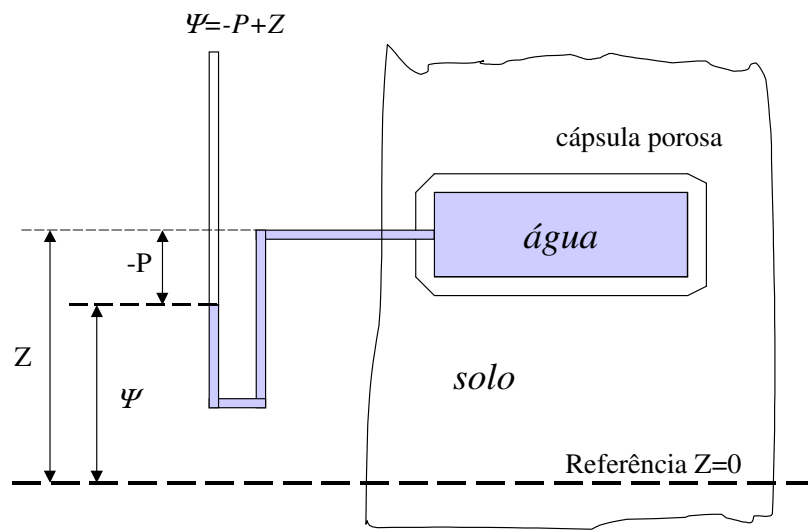


Figura 5.2a. Potencial de água no solo (sem osmótico) medida por uma cápsula porosa permeável à água

Na figura 5.2b é mostrado um tensiômetro comercial em que a água da coluna de medida é substituída por mercúrio (densidade 13,6 vezes a da água)

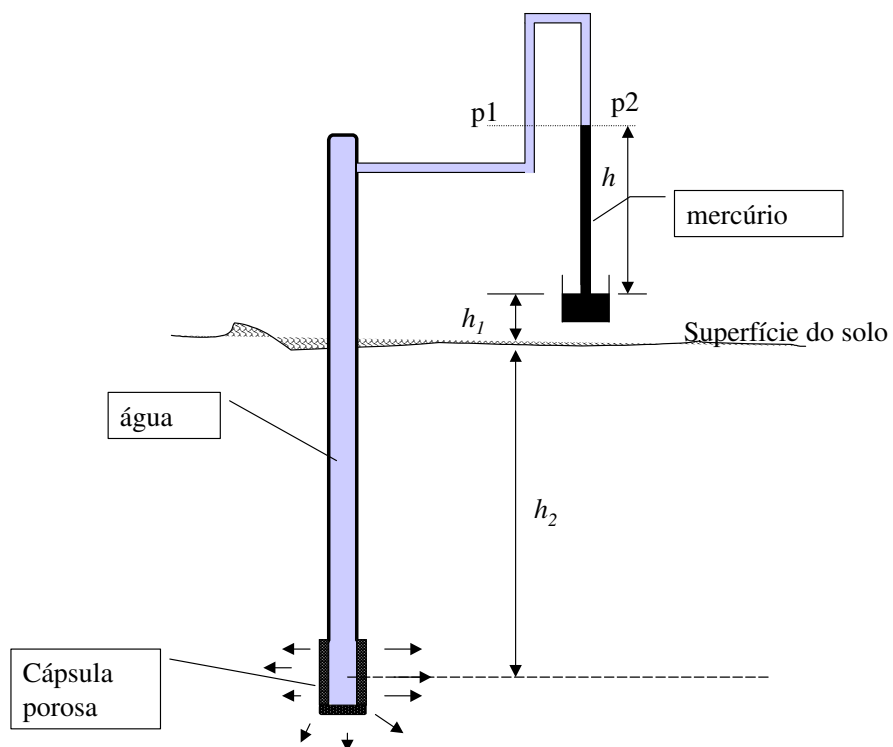


Figura 5.2b. Esquema de funcionamento de um tensiômetro comercial. Temos que

$$p_1 = p_2 = 13,6h \text{ e } \psi_p = h_2 + h_1 + h - 13,6h = -12,6h + h_1 + h_2.$$

6. **Curva característica do solo.** É a relação entre a umidade do solo e o seu potencial matricial. A medida que o potencial matricial decresce (mais negativo), poros cada vez menores são drenados e o filme de água em torno das partículas de solo se torna cada vez mais fino. Adicionando-se água no solo, os poros menores vão ser rapidamente preenchidos mas os poros maiores vão resistir à absorção por que a curvatura do menisco é muito fraca para empurrar a água para dentro. Este fenômeno é conhecido como histerese.

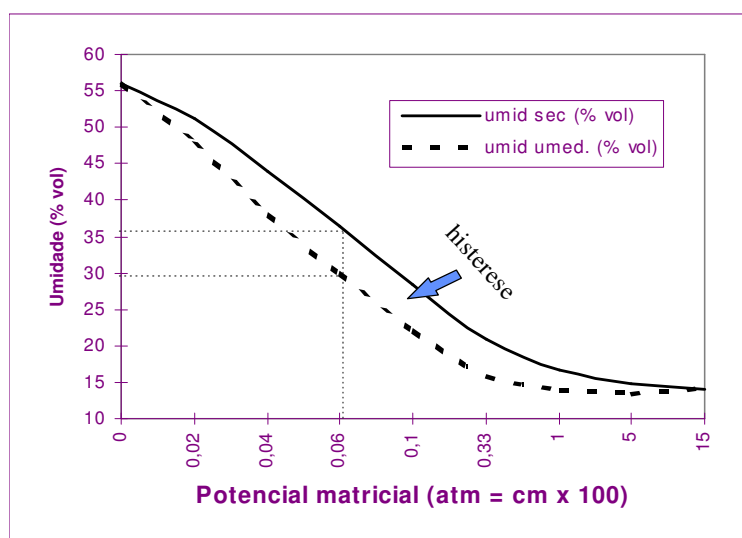


Figura 5.3. Um exemplo ilustrativo da histerese da relação $\theta=f(\psi)$, em condições de secamento e de umedecimento

F. **Terminologia usada para descrever água no solo.**

1. *Capacidade de campo, CC.* Termo muito usado em irrigação, significando o conteúdo de água no solo 2 a 3 dias depois de uma irrigação pesada (que satura o solo). Teoricamente significa a umidade que um dado solo sustenta sob a ação da gravidade. Em laboratório, é “medido” como sendo a umidade da amostra quando submetida a uma pressão de 0,33 atm.
2. *Água gravitacional.* É a água drenada antes que a CC seja atingida. Este termo equivale ao estoque de água em poros grandes, em processo de percolação.

3. *Ponto de murcha permanente, PMP.* É a umidade do solo na qual as plantas não mais conseguem manter suas folhas túrgidas. Considera-se que PMP ocorre a uma pressão de 15 atm.
4. *Água disponível.* É definido como sendo a água estocada entre CC e PMP, sendo assim um índice de disponibilidade de água para as plantas.

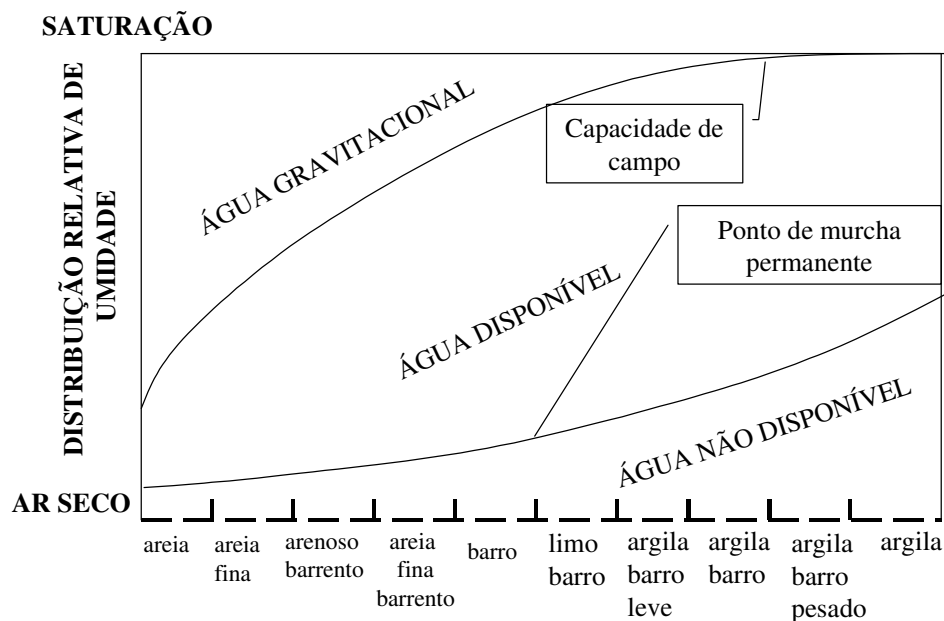


Figura 5.3b. Disponibilidade do solo em relação a textura.

5. Umidade higroscópica. Constituída de filmes finos em torno de partículas de solo abaixo do PMP. Não está disponível para as plantas.
6. Estoque de retenção. É a soma da água disponível e da água higroscópica; é a quantidade que precisa ser atingida antes que ocorra alimentação do lençol freático.

Especialistas em ciência do solo especificam CC como a umidade do solo quando submetida a -100 cm de potencial matricial (-60 e -333 são também usados).

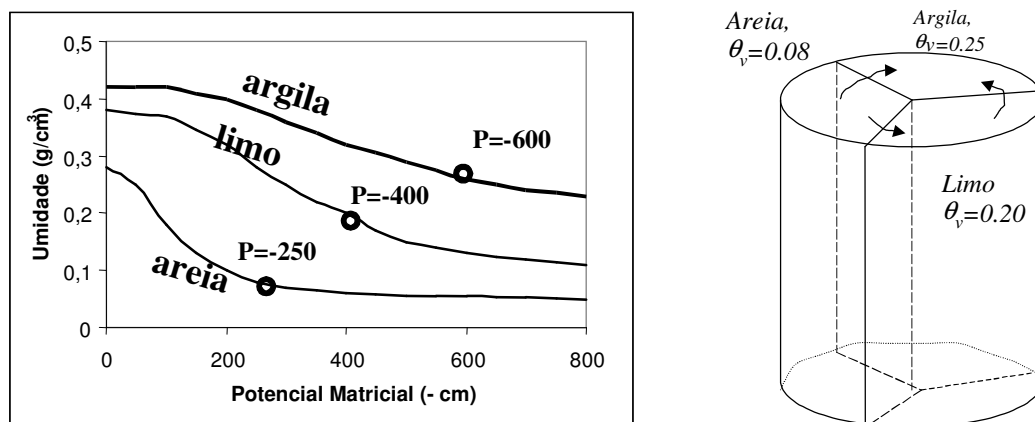


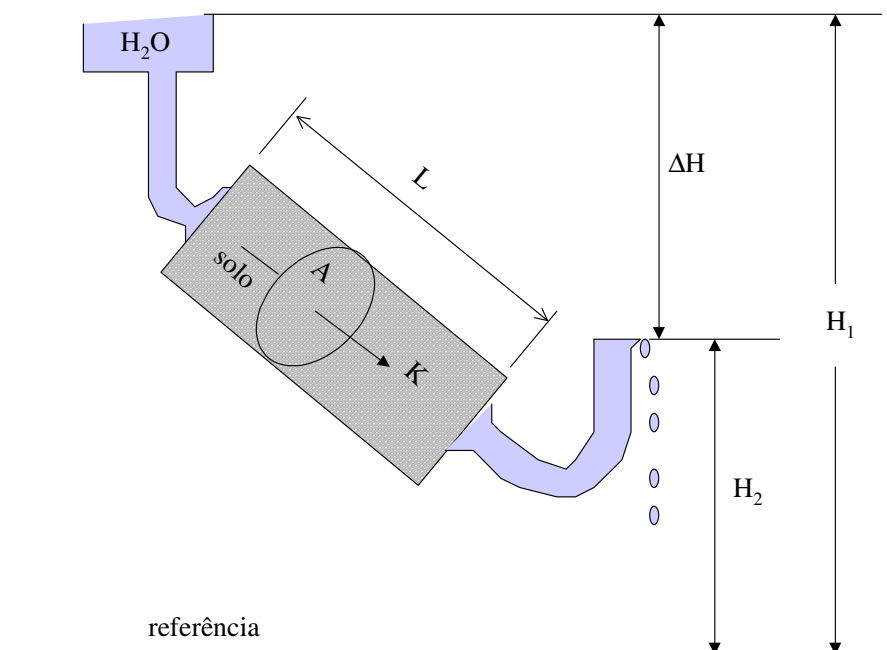
Figura 5.4. A direção do movimento da água quando 3 solos de diferentes teores de umidade são prensados é explicada pelas curvas características de cada solo.

G. **Movimento de água no solo.** A água se move do maior para o menor potencial, conforme mostra a Figura 5.4.

A combinação do potencial gravitacional (Z) e do potencial de pressão (P) é conhecido como Carga Hidráulica (H):

$$H = P + Z \quad [5.9]$$

O gradiente de carga hidráulica entre dois pontos é ΔH . Por unidade de distância entre dois pontos é $\Delta H/L$, que é a força motora da água. Sem tal força, a água não se move. Para medir a taxa de movimento de água no solo, é necessário definir a seção transversal ao movimento e a condutividade hidráulica, K , que é uma característica do solo. O diagrama abaixo mostra um experimento que ilustra estas definições (na realidade um experimento para medir a condutividade hidráulica saturada do solo):



1. Lei de Darcy. Matematicamente, a lei que Henry Darcy formulou em 1856, é:

$$V = K \frac{\Delta H}{L} \quad [5.10]$$

em V é velocidade da água, K é a condutividade hidráulica (unidades LT^{-1}) e $\Delta H/L$ é adimensional. Multiplicando-se os dois lados de [5.10] pela seção transversal, temos o volume por unidade de tempo (q):

$$q = AV = AK \frac{\Delta H}{L} \quad [5.11]$$

As unidades de q são L^3T^{-1} .

Exemplo: Qual é a condutividade hidráulica saturada do solo no diagrama se H_1 é 100 cm, H_2 é 50 cm, L é 40 cm, A é 20 cm^2 e q foi medida experimentalmente como $0,25 \text{ cm}^3/\text{s}$?

Resp. $K=0,01 \text{ cm/s}$

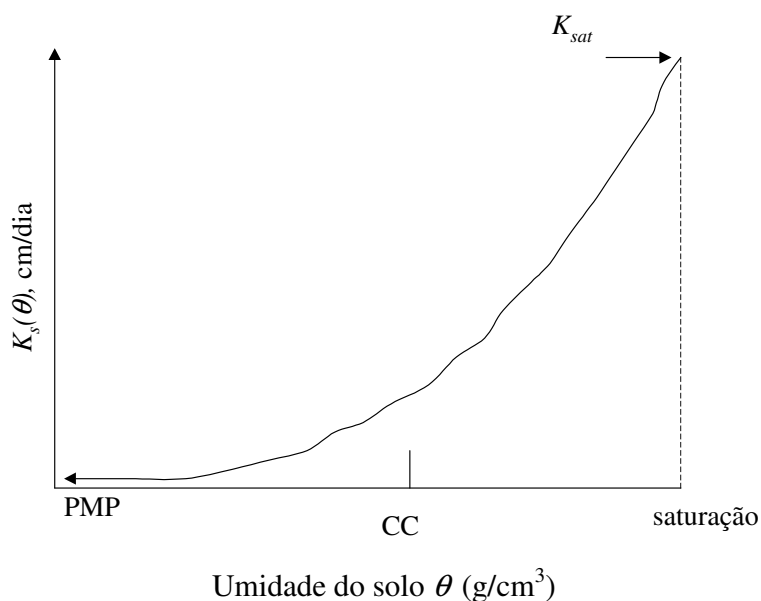
A condutividade hidráulica cai rapidamente (de várias ordens de grandeza) na faixa de interesse de crescimento de plantas (P entre 0,3-0,5 a 1,5-2,0 MPa), conforme diagrama baixo. Uma relação muito útil é:

$$K_s = (K_s(\psi_s) / K_{sat}) = (\theta / \theta_s)^{2b+3}$$

Alguns valores publicados de b são: solo arenoso (b=4, fração de argila =0,03), solo barrento (b=5,4, fração de argila=0,19) e argiloso (b=11,4, fração de argila =0,63).

Para fluxo não saturado, usa-se:

$$q = AK_s \Delta H / L \quad [5.12]$$



2. Direção de fluxo de umidade no solo. Sejam os pontos 1, 2 e 3 no diagrama abaixo, situados a 200 cm uns dos outros, nos quais medimos P com a ajuda de tensiômetros. As cargas hidráulicas são:

$$\text{No ponto 1: } H_1 = P_1 + Z_1 = -200 \text{ cm} + 2000 \text{ cm} = 1800 \text{ cm}$$

No ponto 2: $H_2 = P_2 + Z_2 = -10 \text{ cm} + 1800 \text{ cm} = 1790 \text{ cm}$

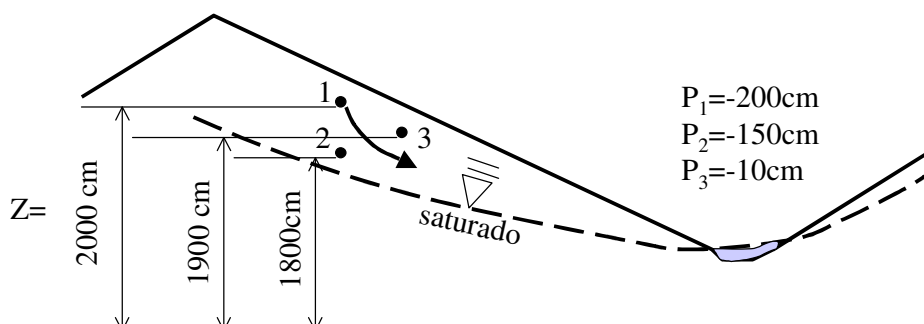
No ponto 3: $H_3 = P_3 + Z_3 = -150 \text{ cm} + 1900 \text{ cm} = 1750 \text{ cm}$

Os gradientes hidráulicos são:

Do ponto 1 para o ponto 2: $\frac{H_1 - H_2}{L} = \frac{1800 \text{ cm} - 1790 \text{ cm}}{200 \text{ cm}} = 0,05 \text{ cm/cm}$

Do ponto 1 para o ponto 3: $\frac{H_1 - H_3}{L} = \frac{1800 \text{ cm} - 1750 \text{ cm}}{200 \text{ cm}} = 0,25 \text{ cm/cm}$

A força motora entre os pontos 1 e 3 é 5 vezes maior que entre 1 e 2, de forma que o caminho da água é curvado na direção da encosta (para baixo).



H. **Infiltração e percolação.** Infiltração é o processo de passagem da água pela superfície do solo. Percolação é o avanço da água no solo.

1. Fatores que afetam infiltração e percolação. Água infiltra e percola no solo forçada pelos potenciais matricial e gravitacional. Se a água empoça na superfície, a carga de pressão torna-se uma força adicional causando infiltração. Inicialmente, o potencial matricial domina, mas a medida em que a água percola, o potencial matricial torna-se menos importante. Quando se aproxima da saturação, o potencial gravitacional predomina. A taxa máxima com que a água penetra no solo é

denominada capacidade de infiltração. A taxa instantânea é a taxa de infiltração. Os principais fatores que afetam a taxa de infiltração são:

Qualidade da água (limo, químicos,...) em geral o fator mais limitante. Em solo seco a energia da água da chuva dispersa substâncias coloidais que tendem a entupir os poros do solo reduzindo a infiltração.

Textura e estrutura do solo (porosidade)

Umidade do solo antecedente

Atividade biológica e matéria orgânica

Presença de cobertura morta e vegetação

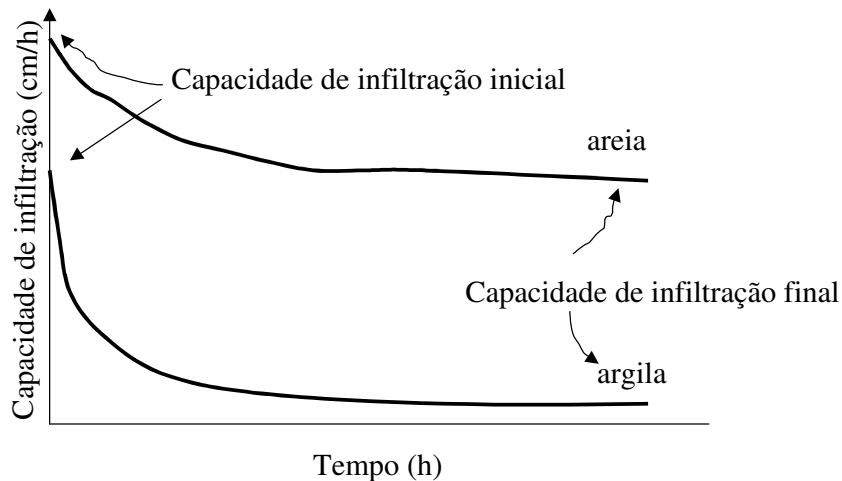
Hidrofobia do solo

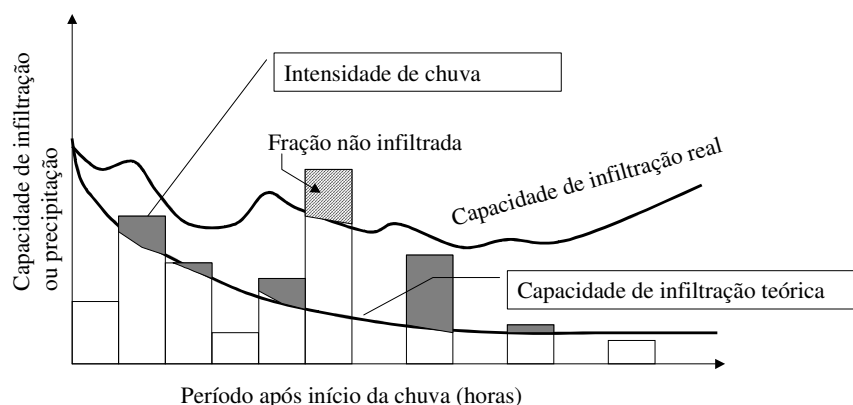
Congelamento do solo

Ar retido no solo

Compactação e impacto da gota d'água.

O diagrama abaixo apresenta curvas típicas de infiltração para areia e argila.





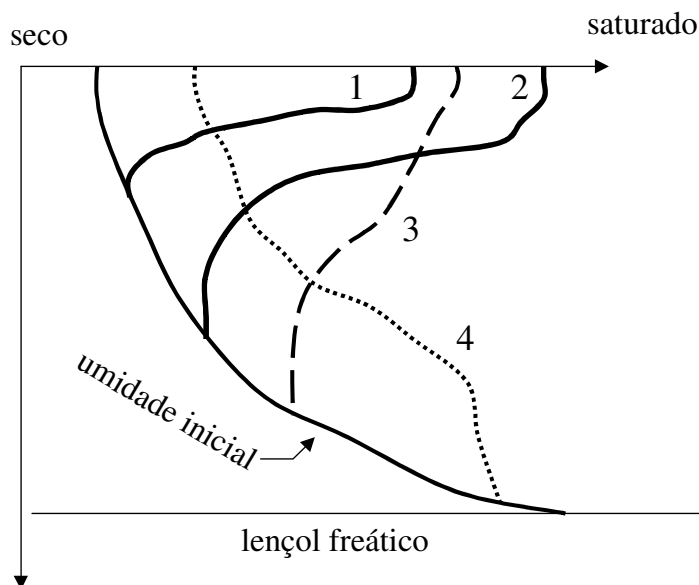
2. Medição de infiltração.

Infiltrômetro de anel. Lâmina d'água constante e medida da variação da lâmina por intervalo de tempo (em geral 5 minutos).

Simulador de chuva. Simula taxas e energia da gota d'água.

3. Percolação e redistribuição.

Durante e depois da infiltração a água se redistribui no perfil do solo. No diagrama abaixo são ilustrados casos de redistribuição. Curva 1: infiltração é rápida e a chuva continua adicionando água nas camadas superficiais. Curva 2: a superfície se aproxima da saturação, e a água percola mais profundamente no solo. Curva 3: a chuva pára e a água se redistribui em poucas horas percolando no solo. Curva 4: em um dia ou mais, os potenciais gravitacional e matricial puxam a água mais para baixo competindo por suprimento com a superfície. A redistribuição é geralmente interrompida pela chuva e pela evaporação antes que o equilíbrio se estabeleça.



4. Infiltração em florestas. Húmus e liteira dos solos florestais absorvem a energia da gota d'água, de forma que a água que vai para o solo é limpa. Assim, em geral, a capacidade de infiltração de solos florestais é maior que a taxa de precipitação. Compactação, colheita, mecanização, etc...podem reduzir a capacidade de infiltração, causando fluxo superficial, etc...

I. **Água subterrânea.** A superfície da zona de saturação na área não confinada é o lençol freático. O nível d'água em uma cisterna revela o lençol freático. O lençol freático está submetido à pressão atmosférica, a menos que esteja confinado. O lençol freático geralmente emerge em minas ou cursos d'água. Um curso d'água alimentado pelo aquífero é chamado curso efluente. Um curso que perde água para o aquífero é um curso influente. Um aquífero elevado é um caso especial que ocorre na presença de uma camada de impedimento como uma lente de argila. Dão origem a minas e cursos d'água intermitentes. Um poço bombeado num aquífero não confinado forma um cone de depressão. Um aquífero confinado (ou artesiano) ocorre quando a água é confinada abaixo de formação geológica relativamente impermeável. A água está sob pressão, o que faz com que ela se eleve em poços que penetrem a formação confinante. Uma linha imaginária passando pelas superfícies d'água de uma série de poços artesianos é chamada superfície piezométrica. Um poço efluente ocorre quando a superfície piezométrica se encontra acima da superfície do solo. A recarga dos aquíferos

confinados geralmente ocorre quando a formação confinante emerge na superfície em geral em áreas elevadas a quilômetros de distância.

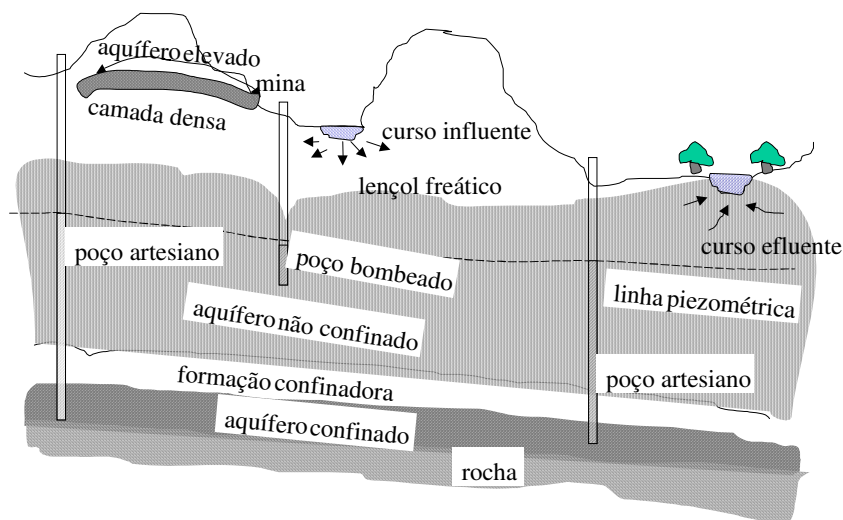


Figura 5.5. Nomenclatura e características da água subterrânea.

Florestas e água subterrânea. Como florestas apresentam taxas de infiltração elevadas, solos florestais possuem água subterrânea de alta qualidade. Ao mesmo tempo, a floresta dificulta a recarga pela alta taxa de evapotranspiração. Em planícies costeiras, florestas fazem baixar o lençol freático por evapotranspiração. Quando ocorre o corte, o lençol freático pode se elevar, em função da redução da evapotranspiração.

Lençol freático elevado apresenta um efeito adverso no crescimento de plantas.