

A água em subsuperfície

9.1 A origem e os estados da água nos solos e rochas

Conforme sua origem, distinguem-se várias classes de águas subterrâneas: de infiltração, fóssil, juvenil e de condensação.

A *água de infiltração* é originada pela infiltração da água das chuvas (águas meteóricas). Praticamente toda a água subterrânea tem esta origem.

A *água fóssil* é proveniente de tempos geológicos passados, quando se deu a deposição dos sedimentos que aprisionam essa água.

A *água juvenil* é a água de origem magmática; é ascendente, rica em sais e termal (LEINZ e LEONARDOS, 1977).

A *água de condensação* é aquela que condensa nos poros a partir do vapor de água.

Os estados da água nos solos e rochas são os seguintes: higroscópico, pelicular, livre, gelo e vapor.

A *água higroscópica* forma uma camada muito fina, considerada geralmente mono ou bimolecular, e que fica tão aderida ao grão sólido, que não se movimenta; para sua retirada é necessário o aquecimento acima de 100 graus centígrados. O solo que possui apenas água higroscópica é um solo aparentemente seco.

A *água pelicular* forma uma película de espessura variável sobre o grão sólido; pode migrar de um grão para outro, saindo de um, onde a espessura da película é maior, para outro, onde ela é menor. Pode ser retirada pelas raízes de plantas ou pela absorção, mas não movimentada pela gravidade.

A *água livre* ou *gravitacional* é aquela que não consegue mais ser retida pelos grãos sólidos e circula no solo conforme as leis da gravidade. É sobre a água neste estado que se aplicam as leis do movimento da água no subsolo.

O gelo pode ser encontrado em regiões suficientemente frias para congelar a água dentro do solo. Este gelo traz sérios problemas geotécnicos para essas regiões.

O vapor existe nos poros que contêm ar. Este vapor pode passar à fase líquida e vice-versa conforme varie a temperatura ou outros fatores.

De acordo com Feitosa e Manoel Filho (1997), a água infiltrada no solo pode ser dividida em três partes. A primeira permanece na zona não saturada ou zona de fluxo não saturado, isto é, a zona onde os vazios do solo estão parcialmente preenchidos por água e ar, acima do nível freático. A segunda parte, denominada interfluxo (escoamento subsuperficial), pode continuar a fluir lateralmente, na zona não saturada, a pequenas profundidades, quando existem níveis pouco permeáveis imediatamente abaixo da superfície do solo e, nessas condições, alcançar os leitos dos cursos d'água. A terceira parte, pode percolar até o nível freático, constituindo a recarga ou recursos renováveis dos aquíferos.

Nas voçorocas, freqüentemente se observa a ação da segunda parte da água.

9.2 Zonas e Tensões da Água em Subsuperfície

Zonas da água em subsuperfície

A ocorrência de água sob a superfície é distribuída nas zonas de saturação e de aeração.

Na *zona de saturação* todos os interstícios estão preenchidos com água sob pressão hidrostática. A *zona de aeração* consiste de interstícios parcialmente ocupados por água e parcialmente por ar. A *superfície freática* é definida como a superfície de pressão atmosférica, e pode ser revelada pelo nível no qual permanece a água em um poço que penetre o aquífero e separa a zona de saturação da zona de aeração. Às vezes, a zona saturada é limitada no topo, ou por uma superfície limítrofe ou por estratos impermeáveis sobrejacentes. Neste caso, a pressão da água nesse limite é superior à atmosférica. Esta pressão é expressa em termos de *nível piezométrico*, isto é, o nível a que subiria essa água se fosse permitida sua passagem para cima através de uma tubulação.

A água que ocorre na zona de saturação é comumente denominada de *água subterrânea*. Na zona de aeração, ocorre *água suspensa* ou *vadosa*.

Franja de capilaridade é a faixa acima do nível freático em que os poros do solo estão preenchidos até uma altura variável segundo o tamanho desses vazios. Na verdade, a saturação se estende ligeiramente acima do nível freático, devido à atração capilar. Entretanto, a água está aí, presa sob uma pressão menor que a atmosférica. Ocorre de fato

um decréscimo gradual da umidade com a altura, isto é, logo acima da superfície freática quase todos os poros contêm água capilar. Acima, apenas os menores poros interligados retêm água (TODD, 1959). Este esquema pode ser visto na figura 9.1. Experiências de laboratório, em canais de areia, realizadas por Mavis e Tsui (in TODD, 1959), demonstraram que ocorrem fluxos paralelos ao nível da água, na zona capilar. Numa barragem, a vazão total que passa pelo maciço de terra, corresponde à soma da vazão através da zona saturada com aquela da franja capilar.

Estados de tensão

Acima do nível freático a água está sob tração. Esta força pode ser medida pelos ensaios de sucção. Abaixo do nível freático a água está sob pressão (P). Esta pode ser medida multiplicando-se a distância vertical entre o nível freático e o ponto analisado (H) pelo peso específico de água (γ_a). Este valor é também conhecido como subpressão e pressão neutra.

$$P = \gamma_a \cdot H$$

Um esquema dessas zonas e tensões pode ser visto na figura 9.1.

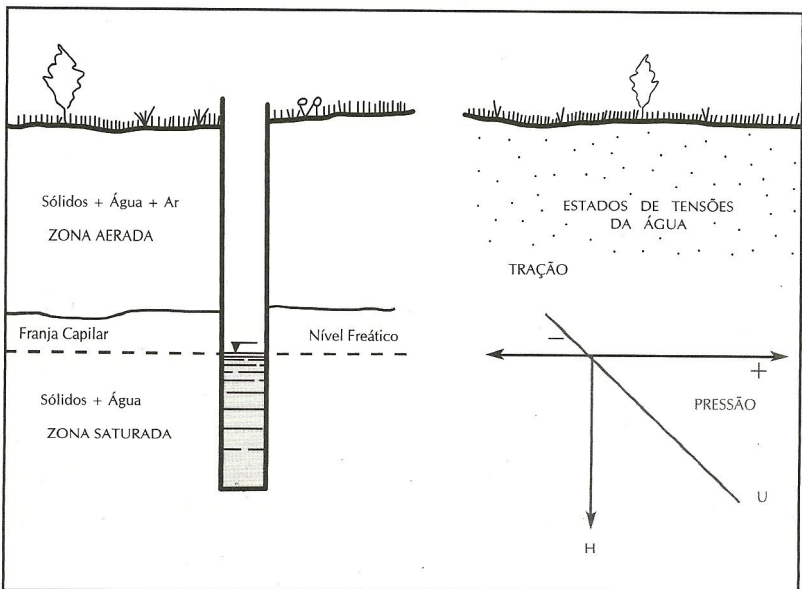


Figura 9.1 – Esquema das zonas da água em subsuperfície e de suas tensões.

9.3 Movimentos da Água Subterrânea – Lei de Darcy e Permeabilidade

Lei de Darcy

Em 1856, Henry Darcy enunciou, como resultado de experimentos, a lei fundamental do movimento da água subterrânea, conhecida atualmente como lei de Darcy e expressa pela equação:

$$Q = [K.(h_1 - h_2).A]/L \quad \text{ou} \quad Q = K.i.A$$

Onde Q é a vazão ou quantidade de líquido que passa por um meio poroso, por unidade de tempo; K é o coeficiente de permeabilidade, o qual depende da natureza do meio poroso; h_1 e h_2 são os níveis piezométricos de entrada e saída; L é o comprimento do meio poroso atravessado pela água e A é a área transversal ao fluxo e ocupada pela água. Frequentemente, usa-se a letra i para substituir $(h_1 - h_2)/L$ ou dh/dl e é denominado gradiente hidráulico.

A velocidade média da água no meio poroso, ou velocidade de Darcy, obtém-se dividindo Q por A,

$$V = Q/A \quad ; \quad V = K.(dh/dl) \quad ; \quad V = K.i$$

Esta lei é válida para fluxo laminar, tal como o escoamento da água em tubo capilar. Para fluxos turbulentos não pode ser usada. Normalmente a velocidade da água subterrânea é muito pequena, sendo seu fluxo laminar e, por isso, permanecendo dentro dos limites de velocidade da citada lei.

Permeabilidade

Porosidade, apesar de relacionada à permeabilidade, não é sinônima desta, pois pode haver casos, por exemplo, de argilas que, depois de saturadas, tornem-se praticamente impermeáveis.

Permeabilidade é a capacidade que tem o solo ou rocha de permitir a passagem de um fluido qualquer pelos seus vazios ou interstícios.

A permeabilidade pode ser devida à existência de poros e também de fraturas (permeabilidade fissural), em rochas duras.

É recomendada pela IAEG (1979) a seguinte classificação semi-quantitativa para descrição aproximada da ordem de grandeza de permeabilidade nas rochas e solos, tabela 9.1.

Tabela 9.1 – Classes de permeabilidade (IAEG, 1979).

Classe	Coefficiente de permeabilidade K (m/s)	Termo
1	menos que 10^{-2}	muito alta
2	10^{-2} - 10^{-4}	alta
3	10^{-4} - 10^{-5}	moderada
4	10^{-5} - 10^{-7}	fraca
5	10^{-7} - 10^{-9}	muito fraca

(a) Abaixo de 10^{-9} é praticamente impermeável.

A determinação da permeabilidade pode ser obtida através de: a) ensaio em laboratório, pelos métodos do nível constante e de nível variável; b) ensaios de campo, pelos métodos do bombeamento em dois poços, do bombeamento em um poço (pontual), de recuperação, de infiltração ou rebaixamento.

Os *ensaios de permeabilidade* possíveis são os seguintes: infiltração, rebaixamento, bombeamento e recuperação.

O *ensaio de infiltração*, também denominado infiltração a nível constante, é realizado sustentando-se a carga constante e medindo-se a vazão necessária para mantê-la.

O *ensaio de rebaixamento*, também denominado infiltração a nível variável, é realizado da seguinte forma: estabelece-se uma coluna de água inicial, interrompe-se a introdução de água e acompanha-se, no tempo, o rebaixamento do nível do líquido.

O *ensaio de bombeamento* (pontual) realiza-se bombeando a água e medindo-se a vazão necessária para manter estabilizado o nível rebaixado.

O *ensaio de recuperação* é feito da seguinte forma: bombeia-se a água até que o seu nível esteja rebaixado do nível freático ou piezométrico e mede-se, em seguida, a velocidade de recuperação.

O coeficiente K é sempre determinado em meios saturados. K é dado em *cm/s* ou *m/s* e depende não só do meio poroso, mas também do peso específico do líquido e de sua viscosidade. Como uma e outra propriedade dependem da temperatura, corrige-se o valor de K, me-

dido a uma temperatura qualquer (K_t), mediante o uso de tabelas ou gráficos que contenham a relação K_t/K_{20} , para o valor teórico de K a 20°C (K_{20}).

Pode-se dizer que, para a água atravessar um meio poroso, deve ser impulsionada por uma pressão ou carga. A carga total corresponde à soma algébrica da carga de pressão e da carga de altura. Assim, ao percolar o solo, a água sofre uma perda de carga, a qual pode ser de pressão ou de altura.

9.4 Aquíferos, Aquicludos e Aquitardos

De acordo com Todd (1959), *aquíferos* são rochas ou solos saturados de água e permeáveis, isto é, que permitem o fluxo de água. Têm uma estrutura com capacidade suficiente de armazenamento e liberação de água subterrânea para ser retirada em poços.

Os aquíferos são normalmente alimentados por água da chuva infiltrada nos solos. A descarga natural se processa através de *fontes* que são surgências do nível freático (ou piezométrico) na superfície topográfica. Este ponto marca a passagem da água de escoamento subterrâneo para escoamento superficial.

Aquicludos são rochas ou solos impermeáveis que podem ou não conter água.

Aquitardos são estratos semipermeáveis.

Aquífero livre, não confinado, freático ou não artesianos é aquele em que o nível da água serve como limite superior da zona de saturação, ou seja, é limitado pelo nível freático. O aquífero livre corresponde à zona saturada da figura 9.1, se esta for permeável.

Aquífero confinado, artesianos ou sob pressão, é aquele em que o nível superior da água está confinado, sob pressão maior que a atmosférica, por estratos sobrejacentes relativamente impermeáveis (figura 9.2).

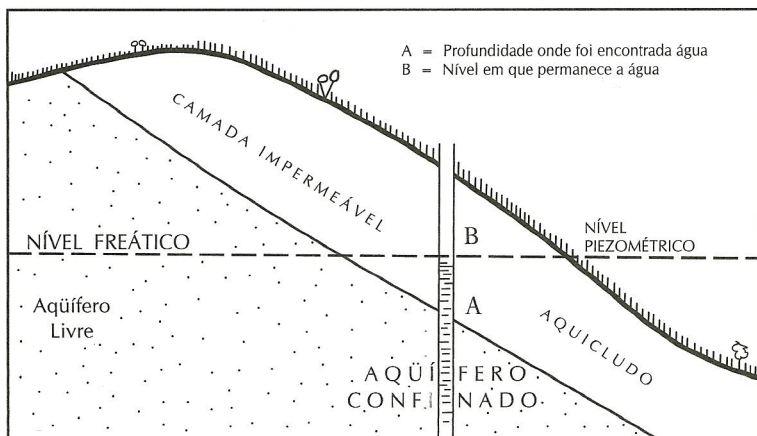


Figura 9.2 – Esquema de uma situação geológica em que se forma um aquífero confinado.

Aquífero suspenso é um caso especial de aquífero não confinado que ocorre quando o volume de água subterrânea está separado da água subterrânea principal por um estrato relativamente impermeável, normalmente em pequena extensão de área, e por uma zona de aeração, acima do corpo principal da água subterrânea. Geralmente ocorre em encosta de serra (figura 9.3).

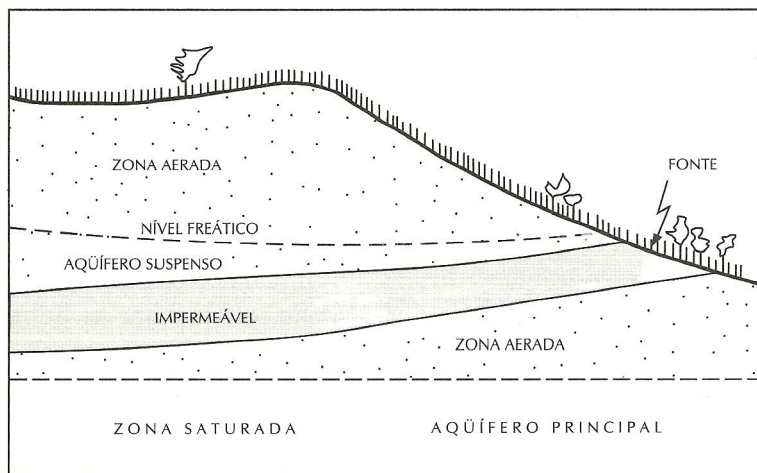


Figura 9.3 – Esquema de uma situação geológica em que pode se desenvolver um aquífero suspenso.

9.5 Rede de Fluxo e Rebaixamento do Lençol Freático

Rede de fluxo

A trajetória de uma partícula de água percolando num meio poroso corresponde a uma linha de fluxo. Linha equipotencial é aquela que une os pontos com mesma carga. Um sistema de linhas de fluxo e linhas equipotenciais constitui uma rede de fluxo. Em meios isotrópicos, as linhas de fluxo interceptam as equipotenciais a 90 graus, significando que a direção do fluxo é perpendicular às equipotenciais (LAMBE e WHITMAN, 1969).

A partir de uma rede de fluxo, pode-se determinar a taxa de fluxo, a carga e o gradiente.

A unidade mais simples de uma rede é um retângulo limitado por duas linhas de fluxo e duas equipotenciais. Uma terceira dimensão fica subentendida para se poder imaginar um prisma através do qual a água percola.

As soluções analíticas para a determinação da rede de fluxo numa barragem são normalmente muito difíceis e só aplicáveis a alguns casos particulares. Geralmente são usadas outras soluções, tais como modelos elétrico-analógicos, cálculos numéricos em elementos finitos, modelos hidráulicos e métodos gráficos.

A analogia elétrica baseia-se no fato de que a lei de Ohm, que rege o fluxo elétrico, é semelhante ou análoga à de Darcy, pois ambas seguem a equação de Laplace, sendo a carga hidráulica comparada à voltagem.

Para o cálculo numérico, em elementos finitos, divide-se a seção de uma barragem em certo número de quadrados e calcula-se o potencial e o fluxo em cada elemento. Este método exige, na prática, o uso de computador.

O método seguinte emprega um modelo reduzido de barragem para observações hidráulicas diretas. Por fim, o método gráfico baseia-se simplesmente em tentativas dirigidas de se desenhar as linhas de fluxo e equipotenciais que se configuram melhor.

Em barragens em funcionamento e instrumentadas, isto é, possuidoras de uma rede de piezômetros que indicam a pressão da água em diversos pontos no interior da barragem, pode-se obter um controle melhor e mais real da rede de fluxo. O controle por piezômetros é muito importante para se verificar se as pressões reais correspondem às de projeto ou exigem medidas corretivas para garantir a estabilidade da obra.

A superfície freática representa a linha superior de fluxo.

Rebaixamento do lençol freático

Para construções que necessitam escavações que atingirão profundidades superiores à do nível freático, é necessário rebaixar o nível da água durante o período de construção das fundações ou outras partes da obra, abaixo dessa profundidade.

Basicamente o método é o mesmo que o de extração de água subterrânea. Durante essa extração forma-se um cone de depleção do nível piezométrico aumentando a zona aerada, em prejuízo da saturada. Para o rebaixamento do lençol freático deverão ser calculadas: a profundidade do poço, o trecho com filtro ou canos perfurados, a intensidade de extração (vazão) que será determinada pela bomba hidráulica usada, o rebaixamento no poço, o raio de influência. Pode-se usar, para esse fim, o esquema da figura 9.4 e a fórmula abaixo (WIEST, 1965 p. 242).

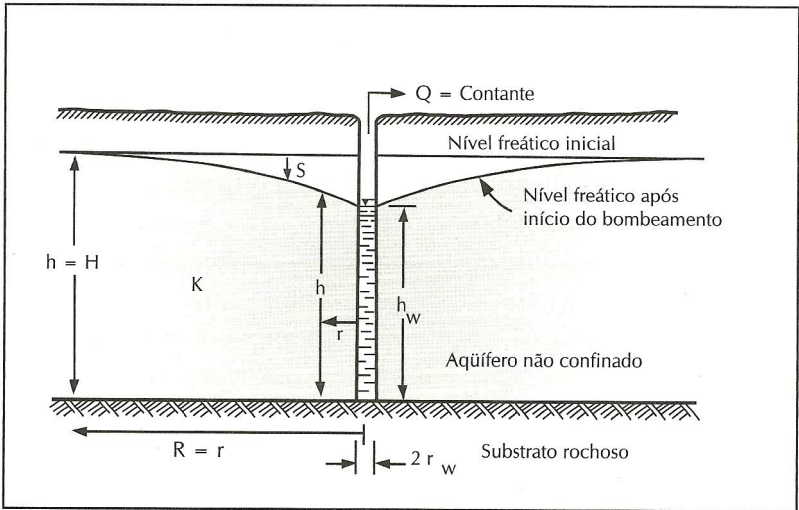


Figura 9.4 – Esquema da depleção por bombeamento (De Wiest, 1965).

$$h^2 = (Q / K) \ln r + \text{constante}$$

Depois calcula-se quantos poços serão necessários para que o cone de depleção de um emendado com o de outro deixe o lençol freático na profundidade que se deseja, conforme esquema da figura 9.5.

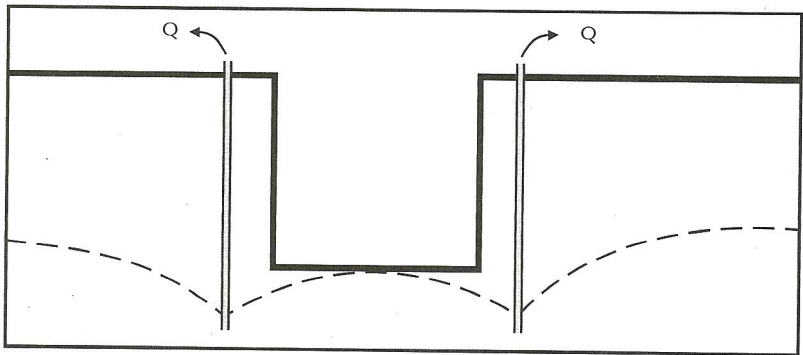


Figura 9.5 – Esquema de rebaixamento do lençol freático através de bombeamento por poços.

É muito comum o uso de poços de ponteiros com tal finalidade em areias inconsolidadas, segundo o esquema da figura 9.6. Esses vários e pequenos poços ficam dispostos em linhas situadas em degraus sucessivamente mais baixos, ligados a uma central que faz a sucção, de tal forma que os cones de depleção de uma fileira, emendados com os de cima e os de baixo, rebaixem em degraus o nível freático até a profundidade desejada. É recomendável lançar a água retirada a uma distância que impeça a nova infiltração.

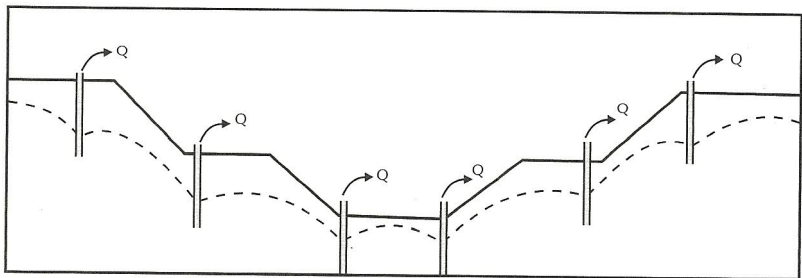


Figura 9.6 – Esquema de rebaixamento do lençol freático usando-se uma bateria de poços de ponteira.

9.6 Erosão Subterrânea

A *erosão interna*, ou *erosão subterrânea*, ou *erosão subterrânea retrogressiva*, ou *“piping”*, é um processo resultante da força de percolação da água. Pode ocorrer no solo de fundação, no corpo da barragem ou, mesmo, em outras obras e, ainda, em ambientes naturais. O

processo inicia numa surgência de água ou fonte e, através de erosão regressiva e carreamento das partículas do solo, forma uma cavidade que pode ter muitos metros de comprimento.

Para evitar este fenômeno, usam-se os filtros de proteção em barragens.

Em certas circunstâncias, o carreamento de partículas do maciço de terra para o filtro de uma barragem pode gerar esse tipo de erosão.

Terzagui e Peck (1969) indicam que a capacidade erosiva de uma fonte aumenta com o comprimento da cavidade. A erosão interna leva à formação de cavidades que captam a água percolante através do meio poroso e, à medida que engrossam seu caudal, aumentam sua capacidade erosiva. Nas concavidades onde há concentração de linhas de fluxo, a força de percolação é maior e, por isso, o perigo de erosão interna é também maior.

Zaslavsky e Kassiff (1965) formularam uma teoria sobre o mecanismo de erosão interna (*piping*) que pode ocorrer no contato do solo do núcleo com a areia do filtro. É aplicável, principalmente, aos solos coesivos. São levadas em consideração as várias forças que agem sobre um elemento do solo, nomeadamente a força de percolação, o peso submerso e a resistência dos solos coesivos à erosão interna. Admitem que

$$F_s = F_c / (F_g - F_d)$$

sendo F_s = fator de segurança; F_g = força de gravidade originada do peso efetivo das partículas do solo; F_d = força de arraste exercida sobre a partícula devido ao gradiente hidráulico; F_c = resultante das forças coesivas. F_g é uma componente perpendicular à superfície do solo. Ela pode ser somada ou subtraída de F_d , conforme a posição da superfície do solo.

Os autores concluem, após analisar cada um dos fatores que influem nessas forças, que quanto menor o diâmetro da partícula e mais coeso for o solo, tanto menor a probabilidade de haver erosão, cujo mecanismo se processa pelo deslocamento de partículas floculadas (agregado).

Os solos normalmente adensados comportam-se como solos arenosos em relação à erosão interna, enquanto os pré-adensados são muito resistentes a esse fenômeno.

Maciços de terra bem compactados associados a filtros com devida gradação normalmente evitam a erosão interna no maciço.

Vargas e Hsu (1970) citam exemplos de seis barragens, Terzaghi, Santa Branca, Ponte Coberta, Euclides da Cunha, Limoeiro e Graminha, onde se formaram fissuras através das quais houve alguma percolação que poderia colocar em risco a estabilidade da obra. Este fato é atribuído à natureza dos materiais empregados e provavelmente à compactação diferencial. Filtros verticais, existentes em todas elas, interceptaram a infiltração que, do contrário, teria emergido como minas de água no talude à jusante e/ou nas ombreiras, comprometendo assim a estabilidade da estrutura.

9.7 Condicionantes Geológicos à Infiltração de Poluentes

Um dos problemas da urbanização e das indústrias é a escolha de locais para deposição de resíduos, tais como esgoto fecal, de águas usadas, lixo, rejeitos industriais e semelhantes. Fora os problemas que causam na atmosfera, como cheiro e atração de insetos e outros animais, e fora a inutilização de áreas muitas vezes valorizáveis, causam geralmente a poluição da água tanto superficial quanto a subterrânea. A poluição da água superficial é imediatamente sentida, mas reversível se for eliminada a fonte poluidora. A poluição da água subterrânea é lenta e só sensível depois de vários anos, mas, em contraposição, é quase irreversível.

Entende-se por *poluição* toda a alteração artificial das qualidades físicas, químicas e biológicas naturais de uma água ou, mais precisamente, uma deterioração pejorativa que a distancie das normas. *Contaminada* é a água que contém organismos patogênicos, substâncias tóxicas ou resíduos radioativos.

Entre as substâncias químicas poluidoras líquidas podem-se citar: urina, detergentes, desinfetantes, inseticidas, derivados de petróleo, derivados da decomposição do lixo (tais como amoníaco, nitritos, nitratos, sulfatos, cloretos), fertilizantes, herbicidas, fungicidas, fenóis. Essas substâncias devem ser divididas em biodegradáveis e não biodegradáveis.

As modificações físicas se verificam principalmente na cor, turbidez, temperatura, tensão superficial (modificada pelos detergentes, sabões, óleos). As modificações químicas são salinização, pH, consumo de oxigênio dissolvido, toxidez, sabor e cheiro, dureza.

A poluição da água subterrânea pode-se dar por introdução de um poluente a partir da superfície ou também por passagem de água de um aquífero contaminado superficial a outro não contaminado, por falta de vedação do espaço externo à tubulação de um poço, a qual deveria ter um revestimento com cimento. A poluição pode-se dar, também, por canalizações subterrâneas de esgoto rompidas, poços abandonados, pedreiras ou minas, fossas sépticas.

Estudos sobre infiltração de algumas substâncias mostraram que detergentes de cadeia linear (LAS, linear alkyl-benzeno sulfonado) degradam-se nos primeiros metros; outros, de cadeia ramificada (ABS), vão para o aquífero e em parte são adsorvidos pelas argilas e matéria orgânica; DDT é adsorvido mais pelas montmorillonitas. As bactérias com tamanho de 0,2 a 15 micra em grande parte são eliminadas nos primeiros centímetros do solo, por filtragem mecânica, obstruindo os poros. No entanto, em porosidade grosseira, as bactérias nocivas podem percorrer até 8 m de distância. Em zona aerada, esta distância diminui para cerca de 3 m. Os vírus com tamanho de 0,08 micron até 0,07 micron podem percorrer até 15 m no solo mas, em grande parte, perecem a aproximadamente 3 m de distância.

A vulnerabilidade do terreno considera, por um lado, a penetração dos poluentes, propagação, persistência. Por outro lado, considera a litologia do subsolo, a profundidade do lençol freático, a modalidade de drenagem, a densidade da rede hidrográfica.

As classes de terrenos adotadas segundo sua vulnerabilidade podem ser as seguintes: 1) aluviões, onde a poluição pode ser muito importante; 2) terrenos onde a poluição se propaga muito rapidamente, como karst em calcários e dolomitos; 3) terrenos onde a poluição se propaga rapidamente, como calcários, dolomitos e basaltos fissurados; 4) terrenos onde a poluição se propaga mais lentamente, como areias, arenitos, projeções vulcânicas; 5) terrenos onde a propagação é muito variável, como em misturas de rochas; 6) terrenos onde a água de superfície não afeta o aquífero, como em argilas e margas; 7) terrenos cristalinos complexos, onde pode existir poluição nas fissuras, mas esta geralmente é localizada dependendo da comunicação entre as fissuras.

A ABNT - NBR-7229 "Norma para construção e instalação de fossas sépticas" estabelece também o método do ensaio de infiltração do solo, indicando um mínimo de capacidade de infiltração, ou seja, de permeabilidade do solo para que o sistema possa funcionar. Se, no entanto, houver um excesso de permeabilidade poderá haver contaminação do aquífero ou, se este estiver a pouca profundidade, poderá ocorrer o mesmo fato.

Pedroto e Barroso (1984), depois de considerações sobre a depuração biológica dos efluentes, propõem os seguintes critérios:

A profundidade do lençol freático é um fator básico no projeto de instalação de fossas sépticas, já que para haver uma purificação do efluente é necessário que o fundo do sumidouro ou vala de infiltração esteja pelo menos a 1,5 m acima do lençol freático. Resulta disso que, para se evitar a contaminação da água subterrânea, a profundidade do lençol freático deve ser maior que 2 m, no caso de valas de infiltração, ou de 3 m, se utilizado sumidouro.

O conhecimento do sentido do fluxo da água subterrânea é fundamental para que se evite a sua contaminação. Para lotes individuais o problema é de fácil solução locando-se o poço à montante da fossa séptica; porém quando se trata de uma área maior loteada, sem que haja um controle de distribuição, é possível que poços e fossas resultem alinhados na direção do fluxo da água subterrânea sem guardar a distância mínima necessária, pelas próprias dimensões do lote. Há ainda a considerar as modificações de fluxo devido à disposição do efluente e ao bombeamento de poços. A disposição do efluente pode causar uma elevação local do lençol freático, resultando num fluxo radial divergente, significativo quando o movimento da água subterrânea é lento. O bombeamento de poços gera também um fluxo radial convergente.

A distância mínima entre poços e valas de infiltração ou sumidouros depende de muitos fatores, como se depreende do parágrafo anterior. Romero (1970) recomenda que, na ausência de estudos prévios, seja mantida uma separação de 30m.

Os fatores geológico-pedológicos mais significativos são a espessura e a permeabilidade do solo. A espessura mínima de solo para depuração do efluente é de 2 m, no caso de valas de infiltração, e de 3 m, em sumidouros. A permeabilidade do solo não é função apenas da textura granulométrica, mas, também, das estruturas pedogênicas resultantes da agregação de partículas, separadas entre si por vazios (macroporos) determinantes da permeabilidade maior dos solos. As estruturas herdadas da rocha matriz (horizonte C), como xistosidade e fraturas, funcionam como caminhos preferenciais de percolação da água subterrânea, importantes quando são instaladas fossas sépticas em áreas de maior declividade; onde a atitude dessas estruturas pode ocasionar o escoamento superficial do efluente.

Para instalação de rejeitos, segundo Zuquette e Gandolfi (1987), devem ser considerados os seguintes atributos do terreno: a) declividade, b) solo (tipo de material inconsolidado), c) profundidade e características do substrato rochoso, d) profundidade do nível freático, e) evaporação, f) escoamento superficial, g) pluviosidade, h) camadas compressivas.