

## 2 PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAERÓBIOS POR SISTEMAS DE APLICAÇÃO NO SOLO

Bruno Coraucci Filho, Cícero Onofre de Andrade Neto, Hênio Normando de Souza Melo, José Tavares de Sousa, Edson Aparecido Abdul Nour, Roberto Feijó de Figueiredo

### 2.1 INTRODUÇÃO

A aplicação de esgotos no solo é uma prática bastante antiga, sendo uma forma bem sucedida de tratamento e disposição final dos efluentes resultantes das atividades humanas.

Quando se faz esta aplicação, há a filtração e a ação de microrganismos, que possuem a capacidade de transformar a matéria orgânica em compostos mais simples. Eles realizam esta atividade buscando alimento e produção de energia. Com isso, tem-se como resultado final deste processo, um efluente tratado e um solo revitalizado, haja visto que os compostos gerados pelos microrganismos podem ser benéficos para o crescimento das plantas e vegetais.

De forma geral, existem diferentes métodos que utilizam o solo no tratamento e/ou disposição final de esgotos. Dentre eles, podem ser citados:

- Infiltração rápida
- Irrigação
- Escoamento superficial
- Infiltração subsuperficial
- Filtros de areia
- Valas de filtração
- Terras úmidas (alagados ou wetlands)

No **método de infiltração rápida**, o solo e os microrganismos formam um "filtro vivo", onde ocorre a retenção e a transformação dos sólidos orgânicos. A vegetação, quando existente, retira do solo os nutrientes transformados, evitando a sua concentração excessiva e acumulativa ao longo do tempo. A água que não é incorporada ao solo e às plantas, perde-se pela evapotranspiração ou infiltra-se, percolando em direção aos lençóis de água subterrâneos.

Para a **irrigação** com águas residuárias, são utilizadas diferentes técnicas, como por exemplo: a inundação por canais ou sulcos, o gotejamento, a subsuperficial e, com muito critério, a aspersão. Este método é o que requer a maior área superficial, mas traz o maior aproveitamento produtivo. As técnicas de irrigação por inundação, por canais ou sulcos, são as de mais simples operação e menos exigentes no que se refere ao tratamento prévio. Pode-se usar até mesmo esgoto bruto, mas os tratados são sanitariamente mais seguros.

No **escoamento superficial**, a vegetação, associada com a camada de cobertura do solo, também atua como um filtro vivo, retirando os nutrientes e dando condições para a retenção e transformação da matéria orgânica presente nos esgotos. A principal característica que diferencia este método dos outros, é o fato do efluente escoar em uma rampa horizontal, sendo a água excedente, que não é absorvida ou evaporada, coletada a jusante, para um adequado destino. Para terrenos mais permeáveis, o processo aproxima-se ao de irrigação, mas com a geração de um excedente de água.

Existem também as técnicas de **infiltração subsuperficial**, que não são destinadas à irrigação. Para este caso, temos, como exemplo, os sumidouros e as valas de infiltração, utilizados para pequenas vazões e com tratamento prévio.

Embora os métodos mais eficientes sejam a infiltração rápida e o escoamento superficial, o solo pode ser utilizado isoladamente como meio filtrante para o tratamento dos esgotos. São os casos dos **filtros de areia** e das **valas de filtração** (geralmente para pequenas vazões), e das chamadas **terras úmidas** (alagados ou wetlands), que podem ser construídos ou naturais.

Todos estes métodos são naturais e devem ser pensados para um uso sem qualquer sofisticação desnecessária, padronização excessiva ou rigidez de procedimentos, que dificultem a sua operação e elevem os seus custos. Porém, deve-se ter em mente que apesar de serem simples, há necessidade que sejam aprimorados.

Para os casos da irrigação, escoamento superficial e infiltração rápida, são, em geral, seguidas as proposições da agência ambiental dos Estados Unidos (USEPA), com adaptações à situação brasileira (CAMPOS, 1999).

## **2.2 VALA DE INFILTRAÇÃO**

### **2.2.1 Descrição**

A vala de infiltração é um método de disposição de efluentes dos sistemas de tratamento de esgotos, que consiste na sua percolação no solo, onde ocorre a depuração por processos físicos (retenção de sólidos), químicos (adsorção) e bioquímicos (oxidação).

Ela é constituída, basicamente, de condutos não estanques (usualmente tubos perfurados), envolvidos com pedras britadas e alinhados no interior de valas recobertas com solo da própria localidade de instalação, tendo na sua extensão uma baixa declividade. O conduto distribui o efluente ao longo da vala, propiciando sua infiltração subsuperficial.

As valas de infiltração são aplicadas com vantagens, quando a camada superficial do solo tem maior capacidade de infiltração que as camadas inferiores, ou quando o aquífero encontra-se em grande profundidade, propiciando maior proteção sanitária. Normalmente, são utilizadas quando a permeabilidade do solo admite a infiltração do efluente e quando são atendidas as condições exigidas para sua instalação (descritas no decorrer do texto). Tais condições devem ser aliadas às questões econômicas.

Levando-se em consideração a utilização do solo como meio filtrante, o desempenho das valas de infiltração depende bastante das características deste meio, assim como do seu grau de saturação por água, não sendo recomendado o uso das valas quando o solo estiver saturado.

A composição química do solo exerce uma influência fundamental na remoção eficiente dos agentes patogênicos e do fósforo, sendo que, a adoção de uma aplicação intermitente, pode melhorar a eficiência do tratamento na remoção de nitrogênio e pode propiciar uma maior durabilidade do sistema.

### **2.2.2 Utilização**

Este método pode ser utilizado para disposição final de efluentes líquidos de tanques sépticos, filtros anaeróbios e de outros reatores domésticos que produzam poucos sólidos suspensos. Para sua instalação, necessita-se de locais com boa disponibilidade de área e com remota possibilidade de contaminação do aquífero. Para tanto, sua utilização deve ser precedida por avaliação técnica para observação dos seguintes parâmetros:

- a característica do solo onde a vala de infiltração será instalada;
- o nível máximo do aquífero e a sua distância vertical mínima;
- a manutenção da condição aeróbia no interior da vala;
- a distância mínima do poço de captação de água;
- o índice pluviométrico.

### 2.2.3 Critérios e parâmetros do projeto e aspectos construtivos

No Brasil, o uso de valas de infiltração, para disposição no solo de efluentes de sistemas de tratamento de esgotos, vem sendo orientado, desde 1963, por normas da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, sendo sua aplicação mais usual o destino de efluentes de tanques sépticos.

A NBR 13.969/1997 recomenda que as valas de infiltração sigam o esquema apresentado na Figura 2.1 e apresenta uma série de itens que devem ser considerados na sua construção. São eles:

- a tubulação de distribuição pode ser constituída de manilhas de barro vidrado, tendo um espaçamento longitudinal de 1 cm entre os tubos. Pode ocorrer um benefício maior se ela for toda perfurada em sua extensão. Esta tubulação deve ser envolvida por um leito de pedra britada, pedregulho ou escória de coque, cujos poros permitam a livre passagem do líquido para o fundo da vala;
- o fundo, assim como as paredes laterais, não devem sofrer qualquer compactação durante a sua construção;
- as superfícies de percolação, quando houver compactação voluntária ou não, devem ser escarificadas até uma profundidade de 0,10 a 0,20 m, antes da colocação do material de suporte do tubo de distribuição de esgotos;
- todas as tubulações de transporte do esgotos, no sistema, devem ser protegidas contra cargas rodantes, para não causar problemas de extravasamento ou obstrução do sistema;
- as tubulações de distribuição na vala devem ser instaladas de modo a não causar represamento dos esgotos no seu interior;
- deve-se instalar tubos de exaustão para ventilação do interior da vala;
- deve-se prever uma sobrelevação do solo, na ocasião do reaterro da vala, de modo a evitar a sua erosão pela água da chuva.. Este item visa não causar o desprendimento dos agentes patogênicos retidos, assim como não criar condições anaeróbias. Pode-se, até mesmo, prever uma cobertura com material impermeável, sobre a camada de pedra britada ou pedregulho, antes do reaterro;
- o reaterro da vala, depois de corretamente instalada, poderá ser feito com o próprio material da escavação;
- nos locais onde o terreno tem inclinação acentuada, como nas encostas do morro, as valas devem ser instaladas acompanhando as curvas de nível, mantendo-se a declividade das tubulações;
- deve ser mantida uma distância mínima vertical, entre o fundo da vala de infiltração e o nível máximo da superfície do aquífero, de 1,5 m;
- este sistema deve manter uma distância horizontal mínima de qualquer poço de captação de água, de modo a permitir um tempo de percurso do fluxo de três dias até atingir estas áreas. Normalmente distâncias superiores a 30 m, entre o poço e as valas, são recomendáveis.
- a vala deve ser dimensionada considerando a mesma vazão adotada para o cálculo do conjunto tanque séptico + filtro anaeróbio ou outro tipo de reator, que a antecede;
- as dimensões da vala de infiltração são determinadas em função da capacidade de absorção do terreno, devendo ser considerada como superfície útil de absorção a área de fundo da vala.

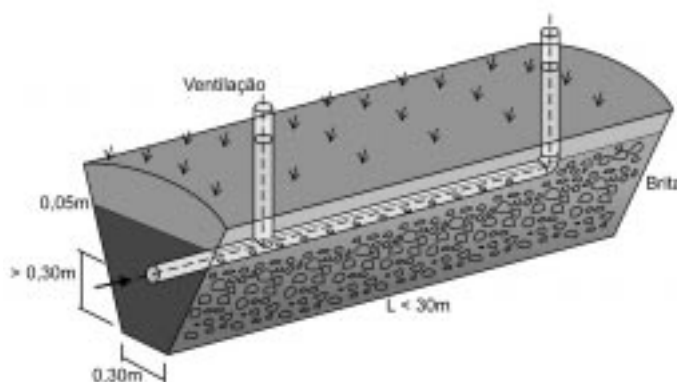


Figura 2.1 – Esquema de uma vala de infiltração  
Fonte: Adaptado de NBR 13969 (1997)

### 2.2.4 Aspectos operacionais

As valas de infiltração devem ser construídas e operadas de modo a manter a condição aeróbia no seu interior. Assim, deve-se instalar um tubo de exaustão e utilizar o sistema com intervalos entre as aplicações de, no mínimo, 6 horas. Deve-se prever o uso alternado das valas, em um prazo máximo de seis meses. Desta forma, seu número mínimo deve ser de duas, cada com 100% da capacidade total.

Caso não sejam seguidos estes critérios, poderá ocorrer a colmatção do leito, levando a uma possível desativação do sistema.

### 2.2.5 Sistema alternativo de vala de infiltração

Apoiado em pesquisas, ANDRADE NETO (1999) propôs uma forma alternativa e muito simples para a construção das valas de infiltração. Foram utilizados tijolos cerâmicos de oito furos, colocados longitudinalmente no interior da vala, em substituição aos materiais normalmente utilizados como conduto de distribuição. Esta vala constitui uma alternativa tecnológica vantajosa, tanto econômica como funcionalmente (Figura 2.2).

Comparativamente com os tubos de PVC e as manilhas de barro vidrado, os tijolos cerâmicos são mais baratos e de fácil aquisição, até nos menores povoados. Funcionalmente, o uso destes tijolos furados como conduto de distribuição apresenta as seguintes vantagens:

- boa durabilidade;
- baixo risco de obstruções;
- alta resistência a esforços;
- excelente fluxo hidráulico;
- ótima condição de distribuição do efluente ao longo da vala.

Além destes fatores, existe a possibilidade de tratamento complementar dos esgotos, devido ao lodo ativo acumulado na forma de biofilme no interior dos tijolos. Esta aderência é devida à grande área superficial interna e se constitui em flocos e grânulos que se formam no interior dos furos.

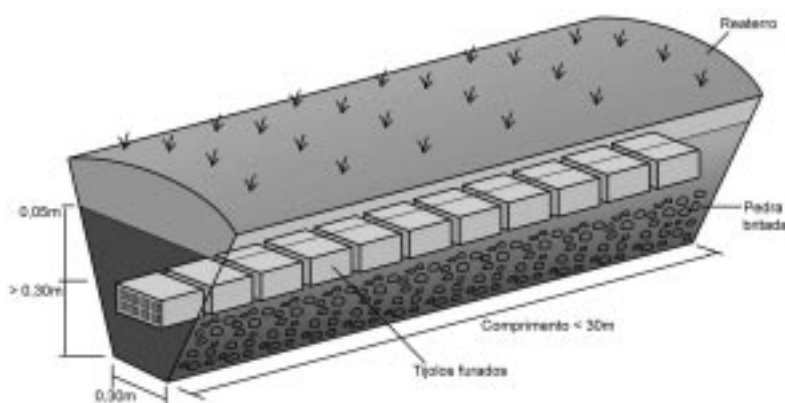


Figura 2.2 - Vala de infiltração com tijolos cerâmicos vazados  
Fonte: Adaptado de ANDRADE NETO (1999)

### 2.2.6 Capacidade de percolação do solo

Como as valas de infiltração ocupam uma superfície do terreno, poderão ocorrer diferentes tipos de solo e graus de compactação, necessitando-se determinar a capacidade de percolação dos efluentes neste local, para definição do seu potencial de infiltração. A estimativa deste valor deve ser feita de acordo com a NBR 7229/1993, que recomenda o ensaio da cova de seção quadrada de 0,30 m de lado e 0,30 m de profundidade, em pelo menos três locais distintos do terreno, adotando-se aquele de menor valor de infiltração.

### 2.2.7 Exemplo de dimensionamento

Dimensionar um sistema de aplicação no solo, constituído por valas de infiltração, para o tratamento e disposição de efluente de um conjunto tanque séptico + filtro anaeróbio, de uma residência com 5 pessoas.

#### a) Dados de entrada

- consumo *per capita* de água: QPC = 120 L/hab.dia
- coeficiente de retorno: C = 0,8
- coeficiente de reforço do dia de maior consumo: K<sub>1</sub> = 1,2
- coeficiente de infiltração do solo, constituído de argila, silte e areia: C<sub>inf</sub> = 25 L/m<sup>2</sup>.dia
- (Nota: coeficiente estimado em função de levantamentos de campo realizados pelo PROSAB. O ensaio de infiltração foi feito de acordo com a NBR 7229/1993, mediante a construção da cova de seção quadrada de 0,30 m de lado e 0,30 m de profundidade.

#### b) Solução

*Cálculo da vazão (Q)*

$$Q = P \times QPC \times K_1 \times C = 5 \text{ hab.} \times 120 \text{ L/hab.dia} \times 1,2 \times 0,80$$

$$Q = 600 \text{ L/dia}$$

*Cálculo da área de infiltração necessária*

$$A = \frac{Q}{C_{\text{inf}}} = \frac{600 \text{ L/dia}}{25 \text{ L/m}^2 \cdot \text{dia}}$$

$$A = 24 \text{ m}^2$$

*Determinação do comprimento (L) da vala:*

Considerando a largura da vala igual a 0,50 m, tem-se:

$$L = \frac{A}{l} = \frac{24 \text{ m}^2}{0,50 \text{ m}}$$

$$L = 40 \text{ m}$$

Desta forma, deve-se adotar 2 valas de 24 metros de comprimento.

Deve-se ainda considerar um período de descanso de aproximadamente seis meses, para a eventual desobstrução do leito filtrante. Portanto, o número total de valas, para este sistema, deverá ser igual a 4, utilizando-se, alternadamente, duas de cada vez.

## **2.3 SUMIDOUROS**

### **2.3.1 Descrição**

O sumidouro é uma unidade de depuração e disposição final do efluente do sistema tanque séptico, verticalizado em relação à vala de infiltração. Devido à esta característica, seu uso é favorável somente nas áreas onde o lençol freático é profundo.

Pode-se dizer, de maneira simples, que o sumidouro é um poço escavado no solo, cuja finalidade é promover a depuração e disposição final do esgoto no nível subsuperficial do terreno. O seu funcionamento é o oposto daquele existente em um poço de água.

### **2.3.2 Critérios e parâmetros do projeto e aspectos construtivos**

Como existe uma grande dificuldade de se manter as condições aeróbias no interior de um sumidouro, tem-se a obstrução das superfícies de infiltração internas mais precocemente, devido à colmatagem.

Assim como a vala de infiltração, a NBR 13969/1997 apresenta recomendações para a construção de sumidouros (Figura 2.3). São elas:

- as paredes deverão ser revestidas de alvenaria de tijolos, assentados com juntas livres, ou de anéis pré-moldados de concreto, convenientemente furados;
- o interior pode ter ou não um enchimento de cascalho, pedra britada ou coque, com recobrimento de areia grossa. Este material não pode ser rejuntado, permitindo assim uma fácil infiltração do líquido no terreno.
- as lajes de cobertura deverão ser construídas em concreto armado e dotadas de uma coluna de exaustão e de uma abertura de inspeção, com tampão de fechamento hermético, cuja menor dimensão em seção, será de 0,60 m.
- as dimensões do sumidouro são determinadas em função da capacidade de absorção do terreno, devendo ser considerada, como superfície útil de absorção, a do fundo e das paredes laterais, até o nível de entrada do efluente do tanque séptico. Um critério de dimensionamento mais prudente, considera somente a área das paredes laterais como sendo a área de infiltração;
- deve-se garantir uma distância mínima de 1,50 m entre o fundo do sumidouro e o nível máximo do lençol freático, que é atingido nas épocas de chuva.

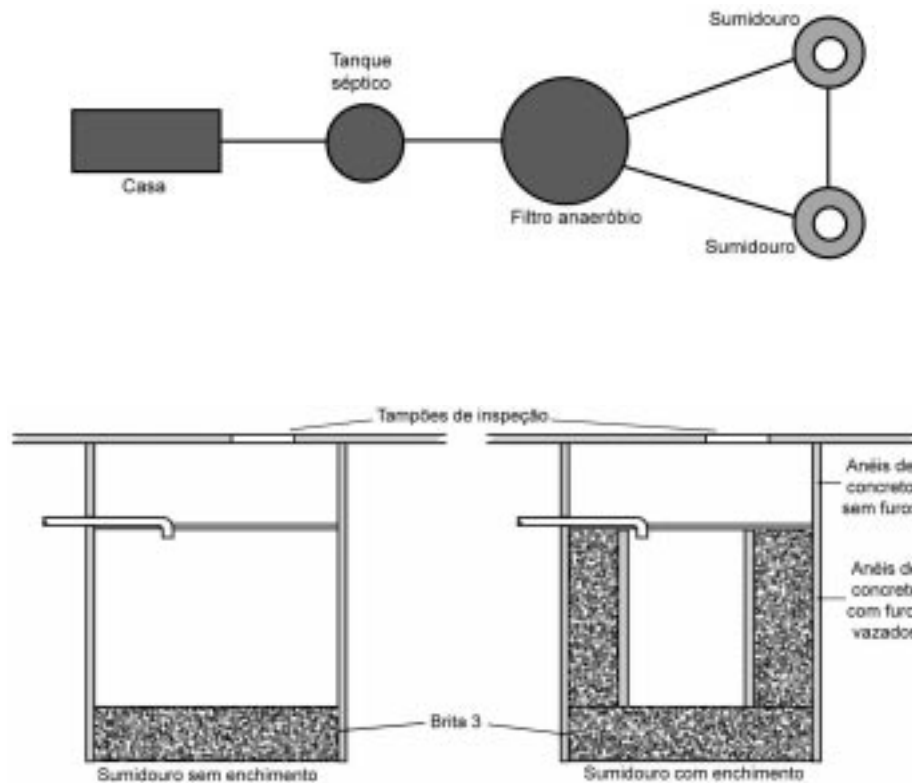


Figura 2.3 – Sumidouros (A – Esquema de instalação do sumidouro, B – Detalhes de sumidouros)

Fonte: NB41, apud DACACH (1983).

### 2.3.3 Capacidade média de percolação do solo

Como o sumidouro é constituído de uma parede vertical, freqüentemente há a ocorrência de diversas camadas de solo, com características distintas, necessitando-se determinar a capacidade média de percolação ( $K_{\text{médio}}$ ). Portanto, a estimativa da capacidade de infiltração no solo deve ser feita por camada, desde que elas sejam consideradas áreas infiltrativas no sumidouro, ou seja, situadas abaixo da tubulação de entrada do efluente.

De acordo com a NBR 13969/1997, o cálculo do valor do  $K_{\text{médio}}$  é feito pela média ponderada, ou seja, somando-se os produtos dos  $K_i$ s de cada camada pela respectiva espessura, e dividindo-se o resultado pela soma total de espessuras das camadas, de acordo com a Equação 2.1.

$$K_{\text{médio}} = \frac{\sum (K_i \cdot H_i)}{\sum (H_i)} \quad (2.1)$$

na qual:

$K_{\text{médio}}$ : coeficiente médio de infiltração

$K_i$ : coeficiente de infiltração da camada de solo “i”

$H_i$ : altura da camada de solo “i”

A NBR7229/1992 apresenta como alternativa a este cálculo, a possibilidade de realização do ensaio de infiltração, através da cova cilíndrica.

## 2.4 VALA DE FILTRAÇÃO

### 2.4.1 Descrição

A vala de filtração é um sistema alternativo de tratamento de esgotos, que teve o desenvolvimento de sua tecnologia iniciado há cerca de 100 anos. Seu funcionamento baseia-se na aplicação de efluentes em um leito de areia, onde ocorrem, naturalmente, processos físicos, químicos e biológicos, que realizam a depuração dos esgotos.

Dentro de cada vala, são instaladas, ao longo do eixo longitudinal e em níveis distintos, uma tubulação distribuidora e uma receptora. O líquido que sai pelas juntas livres da tubulação distribuidora atravessa o leito de areia para, em seguida penetrar na tubulação receptora, que também é constituída de tubos que deixam entre si juntas livres ou possuem a superfície perfurada.

Este tipo de sistema de tratamento pode ser empregado quando o grau de permeabilidade do terreno for inferior a  $25 \text{ L/m}^2 \cdot \text{dia}$ .

### 2.4.2 Utilização

Recomenda-se o uso das valas de filtração como forma de pós-tratamento de efluente, quando:

- o solo local é praticamente impermeável ou saturado de água (encharcado);
- o solo ou as condições climáticas do local não recomendam o emprego de sumidouro e de vala de infiltração, ou a instalação da vala exige uma extensa área não disponível;
- a legislação sobre as águas dos corpos receptores exige alta remoção dos poluentes dos efluentes do sistema tanque séptico – filtro anaeróbio ou outra técnica de tratamento de esgotos ;
- por diversos motivos, for considerado vantajoso o aproveitamento do efluente tratado, sendo adotado como uma unidade de polimento dos processos anteriores;
- quando o lençol freático estiver próximo à superfície.

A vala de filtração é normalmente utilizada como tratamento secundário, após o material sólido ter sido removido em um sistema de tratamento que promova a sedimentação e a retirada de sólidos (tanque séptico, tanque séptico + filtro anaeróbio, unidade aeróbia etc). Os efluentes que são tratados geralmente não apresentam cheiro ou cor e, caso sejam dispostos no solo, receberão um tratamento adicional através da absorção existente neste meio. A vala é construída no próprio solo e, dependendo das condições deste meio, pode ter suas paredes impermeabilizadas.

Pelo fato de possuir um baixo custo e ser de fácil instalação, a vala de filtração tem ampla aplicação em áreas urbanas e rurais que não são atendidas por rede coletora, como por exemplo em pequenas comunidades, condomínios residenciais e até mesmo no litoral, onde existe o problema da baixa declividade dos terrenos, o que dificulta a implantação dos sistemas dinâmicos de coleta de esgotos.

### 2.4.3 Mecanismos de funcionamento

O processo de tratamento em uma vala de filtração envolve mecanismos físicos, químicos e biológicos. O tratamento físico ocorre pela retenção das partículas, por meio da filtração, e o químico, pela adsorção. Mas, sem dúvida, o sucesso do tratamento é profundamente dependente das transformações biológicas que ocorrem no interior do leito de areia. Sem tais transformações, o filtro não funcionaria corretamente. Desta forma, segundo JORDÃO (1995), este sistema é incorretamente chamado de “filtro”, pois o processo não possui como seu principal embasamento o peneiramento ou a filtragem, mas o contato com uma cultura biológica que realiza uma oxidação bioquímica do efluente.

O bom funcionamento de um sistema de valas de filtração depende principalmente da biodegradabilidade do efluente aplicado, das condições ambientais que o envolvem e das suas características construtivas. A aeração e a temperatura são as mais importantes condições ambientais que afetam o seu bom rendimento, isso porque a presença do oxigênio gera as condições para a decomposição aeróbia do efluente e a temperatura afeta diretamente a taxa de crescimento microbiano, as reações químicas e o mecanismo de adsorção.

Outro fator que tem grande influência no funcionamento de uma vala de filtração é a área efetiva e o coeficiente de uniformidade do seu meio filtrante. A área efetiva afeta a quantidade de efluente que será filtrado, a taxa de filtração e a profundidade de penetração da matéria sólida insolúvel. Com a utilização de um leito com partículas muito grossas, tem-se baixo tempo de retenção do efluente aplicado, não atingindo o ponto adequado para a decomposição biológica. Com areia muito fina, a quantidade de efluente que será filtrada é pouca e o filtro poderá ser entupido rapidamente. METCALF & EDDY (1991) recomendam que não mais que 1% da areia deva ser mais fina que 0,13 mm.

Quando tem-se alto coeficiente de uniformidade, ou seja, uma grande desigualdade no tamanho das partículas do leito, elas estarão muito próximas entre si, o que diminui a porosidade total e a média de área dos espaços dos poros, reduzindo assim a sua permeabilidade para o efluente.

No que se refere à taxa de aplicação, ela é crítica para o bom funcionamento do processo. O sistema deve ser projetado para assegurar uma distribuição uniforme do efluente no leito do filtro. Também deve-se buscar, entre as taxas hidráulicas aplicadas, um tempo suficiente de descanso para o sistema, com o objetivo de mantê-lo em condições aeróbias.

#### **2.4.4 Critérios e parâmetros de projeto**

A NBR 13969/1997 recomenda que, para um sistema de valas de filtração, somente podem ser admitidas águas de precipitação pluviométricas diretas e deve ser impedida a percolação e a infiltração de esgotos para o meio externo. Para tanto, pode-se impermeabilizar a interface filtro/solo.

A taxa de aplicação recomendada, expressa em termos de habitantes contribuintes, é de 6 m de vala por pessoa, não sendo admissível adotar o número de valas inferior a 2, por tanque séptico ou reator anaeróbio. O comprimento mínimo total deve ser de 25 m. Deve-se manter uma distância inferior a 1 m entre as valas.

Para a NBR 13969/1997, a taxa de aplicação para cálculo da área superficial da vala de filtração deve ser limitada a 100 L/m<sup>2</sup>.dia, sendo usual, para uma maior segurança, adotar o valor de 40 L/m<sup>2</sup>.dia, quando da aplicação direta dos efluentes do tanque séptico. Para efluentes do processo aeróbio de tratamento, recomenda-se a adoção da taxa de 200 L/m<sup>2</sup>.dia. Os intervalos de aplicação de efluentes do tanque séptico em vala de filtração não devem ser inferiores a 6 h.

Em locais cuja temperatura média mensal de esgoto é inferior a 10°C, as taxas de aplicação para efluentes do tanque séptico e do processo aeróbio, devem ser limitadas, respectivamente, a 50 L/m<sup>2</sup>.dia e 100 L/m<sup>2</sup>.dia.

Segundo a EPA (1980), as taxas de aplicação de efluentes oriundos de tanques sépticos podem variar de 82 L/m<sup>2</sup>.dia a 200 L/m<sup>2</sup>.dia.

Em experimentos realizados na UNICAMP, com efluente anaeróbio de um sistema tanque séptico + filtro anaeróbio, estão sendo executadas em 2 etapas distintas. Uma, aplicando taxas hidráulicas com valores próximos de 100 L/m<sup>2</sup>.dia, e outra, com valores próximos de 40 L/m<sup>2</sup>.dia, esta última quando se almeja um efluente de excelente qualidade.

Um outro critério para dimensionamento de valas de filtração é a adoção de carga orgânica máxima de 24 gDBO/m<sup>2</sup>.dia, de acordo com VAN DUUREN (1999). Entretanto, estes valores estão sendo investigados para aplicação nas condições brasileiras.

#### 2.4.5 Aspectos construtivos

Para a construção de um sistema de valas de filtração, a NBR 13969/1997 apresenta as seguintes recomendações (ver Figuras 2.4 e 2.5):

- deve-se prever uma sobrelevação do solo, na ocasião de reaterro da vala, de modo a evitar a erosão do mesmo devido às chuvas, dando-se uma declividade entre 3% e 6% nas suas laterais;
- nos locais onde o terreno tem inclinação acentuada, como nas encostas de morros, as valas devem ser instaladas acompanhando as curvas de nível;
- a camada de brita ou pedra britada, situada acima do leito de areia, deve ser coberta de material permeável, tal como tela fina contra mosquito, antes do reaterro com solo, para não permitir a mistura deste com a pedra, e ao mesmo tempo permitir a evaporação da umidade;
- dependendo das características geológicas do local, a vala de filtração deve ter as paredes do fundo e laterais protegidas com material impermeável, como por exemplo mantas de PVC, de modo a não contaminar o lençol freático;
- o leito de areia deve ter 0,70 m de altura e suas partículas devem ter diâmetro efetivo na faixa de 0,25 mm a 1,2 mm, com coeficiente de uniformidade inferior a 4;
- as tubulações de drenagem e a de distribuição devem ser envolvidas em uma camada de brita n.º 4, ter no mínimo um diâmetro de 100 mm, serem perfuradas e terem declividade entre 1 e 3%;
- deve-se levar em consideração a disponibilidade de material local para diminuir o custo de implantação do sistema, mas sempre tendo como referência os parâmetros da Norma ABNT.

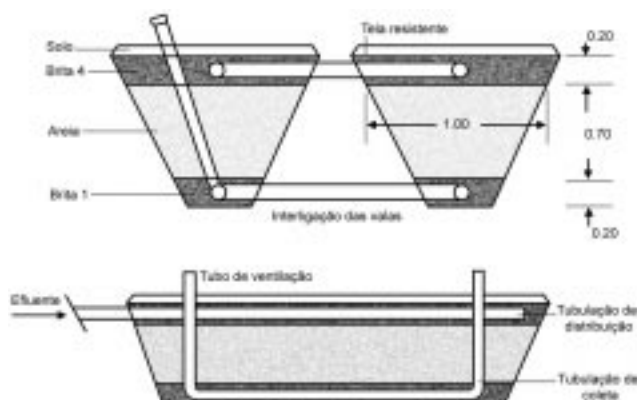


Figura 2.4 – Cortes longitudinal e transversal de uma vala de filtração.

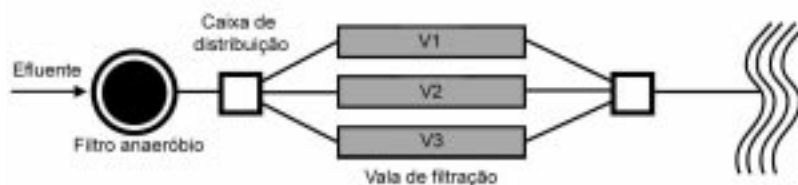


Figura 2.5 - Croquis de um sistema de tratamento com um conjunto de valas de filtração

### 2.4.6 Exemplo de Dimensionamento

Dimensionar um sistema de aplicação no solo, constituído por valas de filtração, para o tratamento e disposição de efluente de um conjunto tanque séptico + filtro anaeróbio, de uma residência com 5 pessoas.

#### a) Dados de entrada

- consumo *per capita* de água: QPC = 120 L/hab.dia
- coeficiente de retorno: C = 0,8
- coeficiente de reforço do dia de maior consumo: K<sub>1</sub> = 1,2
- coeficiente de infiltração do solo, constituído de argila, silte e areia: C<sub>inf</sub> = 40 L/m<sup>2</sup>.dia
- (Nota: coeficiente estimado em função de levantamentos de campo realizados pelo PROSAB. O ensaio de infiltração foi feito de acordo com a NBR 7229/1993, mediante a construção da cova de seção quadrada de 0,30 m de lado e 0,30 m de profundidade.

#### b) Solução

*Cálculo da vazão (Q)*

$$Q = P \times QPC \times K_1 \times C = 5 \text{ hab.} \times 120 \text{ L/hab.dia} \times 1,2 \times 0,80$$

$$Q = 600 \text{ L/dia}$$

*Cálculo da área de infiltração necessária*

$$A = \frac{Q}{C_{\text{inf}}} = \frac{600 \text{ L/dia}}{40 \text{ L/m}^2 \cdot \text{dia}}$$

$$A = 15 \text{ m}^2$$

*Determinação do comprimento (L) da vala:*

Considerando a largura da vala igual a 0,50 m, tem-se:

$$L = \frac{A}{l} = \frac{15 \text{ m}^2}{0,50 \text{ m}}$$

$$L = 30 \text{ m}$$

Desta forma, deve-se adotar 1 vala de 30 metros de comprimento.

Deve-se ainda considerar um período de descanso de aproximadamente seis meses, para a eventual desobstrução do leito filtrante. Portanto, o número total de valas, para este sistema, deverá ser igual a 2, utilizando-se, alternadamente, uma de cada vez.

## **2.5 FILTRO DE AREIA**

### **2.5.1 Descrição**

O filtro de areia segue os mesmos princípios da vala de filtração, ou seja, o tratamento ocorre quando da passagem do esgoto pela camada de areia, onde se processa a depuração por meio físico (retenção) e bioquímico (oxidação), devido aos microrganismos fixos na superfície dos grãos de areia. Sua utilização é recomendada como uma forma de pós-tratamento, nos mesmos casos apresentados para a vala de filtração.

O principal diferencial existente entre o filtro de areia e a vala de filtração é o fato do primeiro ser construído sobre a superfície ou semienterrado, e ter o seu leito de areia exposto às condições do tempo. Outros pontos diferenciais serão explicitados no decorrer do texto.

### **2.5.2 Critérios e parâmetros de projeto**

Segundo a NBR 13969/1997, as taxas de aplicação são idênticas as da vala de filtração, sendo o valor limitado a 100 L/m<sup>2</sup>.dia, quando da aplicação direta de efluentes de tanques sépticos, e 200 L/m<sup>2</sup>.dia, para efluentes de processos aeróbios de tratamento. Para locais cuja temperatura média mensal do esgoto é inferior a 10°C, estas taxas devem ser limitadas, respectivamente, a 50 L/m<sup>2</sup>.dia e 100 L/m<sup>2</sup>.dia.

A EPA (1980) recomenda uma taxa de 80 a 200 L/m<sup>2</sup>.dia, quando a alimentação provém de tanque séptico e entre 200 e 400 L/m<sup>2</sup>.dia, quando proveniente de filtro aeróbio.

#### **Areia do meio filtrante**

De acordo com a NBR 7229/1993, a areia do filtro deve ter as seguintes características:

- ser isenta de argila, terra, calcário, ou quaisquer substância capaz de ser atacada pelo esgoto, ou de endurecer formando uma massa compacta ou impermeável;
- seu diâmetro efetivo pode variar na faixa de 0,25 mm a 1,2 mm;
- o coeficiente de uniformidade deve ser inferior a 4;
- a profundidade do leito formado poderá variar entre 60 e 110 cm.

Assim como na vala de filtração, neste método a área efetiva e o coeficiente de uniformidade são determinantes para o tratamento do efluente. Quando utiliza-se uma areia muito fina (pequena área efetiva), somente será possível a aplicação de baixas taxas e a matéria sólida penetrará pouco nas camadas do leito. Consequentemente, tem-se um alto tempo de retenção do efluente, o que acarretará um curto período de vida útil para o filtro. Em contrapartida, o efluente final do sistema terá sofrido um alto grau de tratamento.

Quando utiliza-se uma areia mais grossa, tem-se um baixo tempo de retenção do efluente aplicado, impossibilitando uma adequada decomposição biológica. Para este caso, tem-se, como aspecto positivo, o fato de se poder aplicar altas taxas.

### **2.5.3 Aspectos construtivos**

A construção e implantação do filtro de areia é muito simples, quando comparada aos outros métodos. Deve-se observar que os materiais utilizados na construção da estrutura, onde serão depositados o leito de areia e a camada de brita, devem suportar a agressividade química dos esgotos. Normalmente, recomenda-se o uso de concreto, tijolo, fibra de vidro reforçada ou PVC.

Existe a possibilidade de se construir o filtro semi-enterrado. Neste caso, a estrutura em que ele se encontra deverá ser impermeável ao efluente aplicado, impedindo a sua infiltração para camadas profundas, fato que poderia causar a contaminação do aquífero.

No que se refere as tubulações, elas terão as seguintes características:

- a tubulação de drenagem, instalada na base do leito de areia, será envolvida por uma camada de pedra britada de aproximadamente 0,15 m de espessura;
- a tubulação distribuidora e a receptora, deverão ter diâmetro de 100 mm e serem perfuradas;
- para facilitar a coleta do efluente, o fundo do filtro, deve ter uma declividade entre 0,5 e 1%.

Para que seja possível uma boa distribuição do efluente sobre o leito de areia, deve-se construir, sobre sua superfície, uma placa de distribuição. A placa poderá ser feita de concreto ou qualquer outro material que seja resistente ao choque do líquido sobre sua parte superior. Uma apresentação esquemática do filtro de areia é mostrada na Figura 2.6.

Outros aspectos relevantes que devem ser observados durante a construção de um filtro de areia:

- sobre a superfície do leito de areia, somente pode-se admitir águas de precipitação pluviométrica;
- não se pode permitir a infiltração de esgotos para o meio externo do filtro.

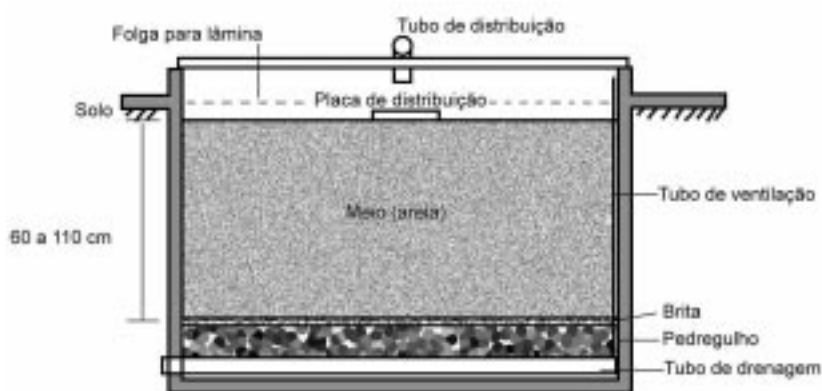


Figura 2.6 - Esquema para unidade de filtro de areia semienterrado

#### 2.5.4 Aspectos operacionais

Na aplicação dos esgotos, recomenda-se a inundação do leito com uma camada de 8 cm de efluente e, no mínimo, duas dosagens por dia, entremeadas por períodos de repouso. A distribuição do efluente sobre o leito deverá ser feita de forma uniforme, evitando-se a formação de pontos de maior concentração de efluente.

Os períodos de repouso do leito, decorrentes da aplicação intermitente dos esgotos, devem prover condições adequadas no interior do filtro, permitindo o ingresso de ar através de um tubo de coleta e a manutenção das condições aeróbias.

Alguns resultados obtidos em experimentos realizados em diversos países estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Comparação de dados da operação experimental de alguns filtros de areia

Parâmetro	Referência		
	SCHONBORN (1997)	MICHELS (1996)	PELL (1989)
Local	Suíça	Winsconsin - EUA	Suécia
Pré-tratamento	Tanque séptico	Tanque séptico	Tanque séptico
Taxa de aplicação (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia)	Média: 0,033 Pico: 0,187	0,14 a 0,23	0,067
Área efetiva	1 a 3 mm	1,5 mm	0,21 mm
Coefficiente de uniformidade	-	3,5	8,1
Profundidade (cm)	-	91,4	75
Aplicação	Dependia do fluxo de efluente	5 dias por semana, com 2 horas de aplicação	3 aplicações diárias, a cada 8 horas
Resultados da remoção de alguns compostos	DBO: 91%; P total: 90%; NH <sub>4</sub> -N: 93%; N-Total: 80%.	DBO: 5 mg/L; Sólidos Suspensos: 97%; Nitrificação: 95%.	DBO: 91%; P: 83%; Nitrificação: 88%.

### 2.5.5 Manutenção e uso

A operação e manutenção de um filtro de areia são muito fáceis de serem realizadas, devendo-se ter atenção aos períodos de aplicação de esgoto e de descanso. Após a utilização do filtro por longos períodos, pode ocorrer o aumento do tempo de retenção do efluente em seu interior. Tal fato pode ser resultante da formação de uma camada na superfície do filtro (colmatação). Quando isso ocorrer, recomenda-se uma raspagem e a remoção deste material, juntamente com uma pequena camada de areia (2 a 5 cm). Esta camada removida deverá ser reposta, imediatamente, com areia limpa, com características idênticas à anteriormente existente.

Não se deve permitir a formação de vegetação sobre a superfície do filtro. Caso ela se forme, deverá ser feita a sua retirada, imediatamente.

Deverão ser previstas duas unidades de filtro, cada uma com capacidade plena de operação. Caso seja observado um excessivo retardamento na velocidade de filtração do esgoto, deverá ser feita a substituição de um filtro pelo outro.

## 2.6 TERRAS ÚMIDAS (ALAGADOS OU WETLANDS)

### 2.6.1 Descrição

Por definição, terras úmidas são áreas onde a superfície da água está perto da superfície do solo, por um período que seja suficiente para manter sua saturação ao longo do ano, existindo no seu meio, uma vegetação característica associada.

Existem diversos tipos de terras úmidas, desde as naturais (brejos, várzeas, pântanos, lagos muito rasos e manguezais) até os construídos.

### 2.6.2 Terras úmidas naturais

As terras úmidas naturais são áreas inundadas por um curso de água, em períodos regulares, por um tempo suficiente que permita o desenvolvimento de uma vegetação, especialmente adaptada às regiões de solo saturado. Geralmente, localizam-se entre um corpo d'água permanente e uma região de mata não inundada, ou seja, uma faixa intermediária (Figura 2.7).

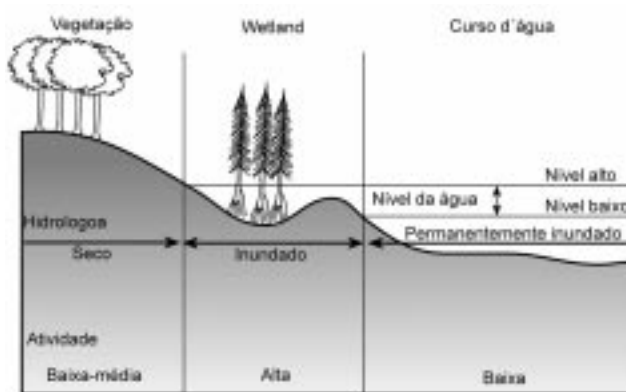


Figura 2.7 – Representação de uma região de terra úmida natural  
Adaptado de EPA (1992)

A variedade de tipos de terras úmidas existentes é tão grande quanto a variedade de solos, vegetação e clima que pode haver em diferentes regiões. Dentre os diversos fatores que o afetam, o mais determinante é a hidrologia, que permite a divisão das terras úmidas em dois grandes tipos principais:

- próximos ao litoral;
- afastados da região costeira.

O primeiro tipo, caracteriza-se pela formação de estuários, áreas onde o mar mistura-se com um rio ou riacho que desemboca numa praia. Essas regiões são ambientes de salinidade e níveis de água muito inconstantes, devido ao próprio regime de marés. Essas regiões de alagados possuem um papel importante na natureza. Elas são o habitat natural de uma variedade muito grande de peixes, animais e outros seres marinhos. Além disso, constituem uma proteção contra as enchentes e a erosão, e promovem a renovação da água disponível para a vegetação. Outra característica importante é o fato de poderem ser um meio de recreação e oferecer oportunidades de pesquisa e educação.

Já o segundo tipo, as áreas mais afastadas da região costeira, compreende locais com características peculiares, possuindo solos inundados de forma total ou parcial, devido à influência de rios e lagos, associados ao regime de chuvas.

Do ponto de vista ecológico, segundo DENNY (1997), o ecossistema das terras úmidas tem as seguintes funções:

**a) Habitat natural**

Terras úmidas são áreas onde muitas espécies de animais raros, sendo alguns em extinção, têm como seu único habitat natural. Nestas regiões, eles encontram uma combinação de condições, como clima e disponibilidade de água, que não são observadas em qualquer outro local. Estas áreas, constituem um ambiente que pode ser classificado como um dos ecossistemas mais produtivos existentes na natureza.

Os restos de plantas (raízes e folhas) que se desenvolvem neste ambiente são decompostos, transformando-se em detritos que servirão de alimento para muitos crustáceos, ostras e peixes pequenos, que por sua vez são uma fonte de alimento para outros peixes maiores, de grande interesse comercial. Pode-se perceber que nesta cadeia alimentar o homem tem uma fonte de recursos bastante frágil, mas muito produtiva.

**b) Manutenção do equilíbrio hidrológico**

Essas áreas inundadas também funcionam como uma bacia natural, armazenando as águas de chuva. Além disso, possuem a capacidade de diminuir a força das correntezas formadas, contribuindo para a minimização dos danos ao meio ambiente, principalmente a erosão e o assoreamento.

Em áreas urbanas, as terras úmidas podem ser bastante úteis na prevenção de enchentes, tendo em vista que, com a urbanização, a área de solo disponível para a infiltração das águas da chuva diminui consideravelmente.

**c) Conservação da biodiversidade**

As áreas alagadas mantêm a paisagem e a diversificação do ecossistema, com a sua diversidade de populações e de atividades microbiológicas. No Brasil, por exemplo, cerca de 100.000 km<sup>2</sup> de área de planície na Amazônia Central são inundadas anualmente. O pantanal mato-grossense, mantido pelas cheias do rio Paraguai, corresponde a uma das maiores áreas inundáveis do planeta. A Ilha do Bananal e áreas do Rio Grande do Sul são banhadas, respectivamente, pelos rios Araguaia e Gravataí.

As populações de macrófitas, nessas áreas, exercem uma alta produtividade, contribuindo sobremaneira para o grande número de nichos ecológicos, bem como para a grande diversidade de espécies animais. Tal complexidade de seres mantém o ecossistema equilibrado.

**d) Efeito climático**

O ecossistema das terras úmidas impede o aquecimento global da terra, através da fixação do carbono, mantendo assim o balanço de CO<sub>2</sub>. Desta forma, ele acaba influenciando os microclimas e também mantém a quantidade de chuvas.

Segundo ODUM (1983), cerca de 100 bilhões de toneladas de matéria orgânica são produzidas anualmente por organismos fotossintéticos na terra. Por outro lado, durante o mesmo intervalo de tempo, aproximadamente essa mesma massa é oxidada, voltando para a natureza, na forma de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O.

Cerca de 10 a 14% do carbono existente no planeta provem das áreas alagadas existentes no mundo inteiro.

**e) Preservação da qualidade da água**

As terras úmidas contribuem para a manutenção da qualidade da água, através da remoção e retenção de nutrientes, do processamento de matéria orgânica e resíduos químicos e da redução

da carga de sedimentos descartada nos corpos receptores. Conforme a água flui pela terra úmida, a vegetação age como uma barreira à manutenção do seu curso, diminuindo a velocidade de avanço, em direção ao corpo receptor, fazendo com que os sedimentos e poluentes que carrega, precipitem. Desta maneira, estes sedimentos e poluentes podem ser capturados pela vegetação e, logo após, metabolizados (Figura 2.8).

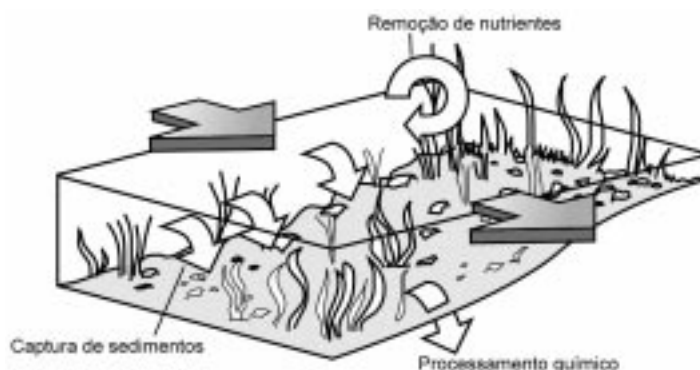


Figura 2.8 – Esquema de manutenção da qualidade da água das terras úmidas: remoção e retenção de nutrientes (nitrogênio e fósforo); redução da carga de sedimento pela sedimentação. Adaptado de EPA (1992)

Os compostos orgânicos constituintes dos esgotos são degradados por processos anaeróbios e aeróbios. No caso específico de sistemas de terras úmidas, a maior parte da matéria orgânica sofre degradação anaeróbia. O oxigênio requerido para a degradação aeróbia vem da atmosfera, pelas folhas das macrófitas aquáticas, que o transferem para as raízes e rizomas das plantas, através do próprio tecido vegetal. O oxigênio, ao chegar às raízes e rizomas, cria na rizosfera um ambiente oxidado.

Atualmente, as áreas alagadas têm sofrido processo de degradação e destruição. O desmatamento e subsequente erosão, as modificações hidrológicas por meio de canalização de cursos de água, a drenagem de solos hidromórficos e a construção de represas, são processos que poderão trazer fortes conseqüências ao meio. Uma delas, muito freqüente, é o carreamento de sedimentos das partes mais altas para as mais baixas, onde estão situadas as áreas de terras úmidas, resultando dessa forma, no aumento da demanda bioquímica de oxigênio, com altas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, além dos contaminantes.

### 2.6.3 Terras úmidas construídas

As políticas conservacionistas atuais levaram à inibição do uso das terras úmidas naturais, para fins de controle de fluxo de águas de alguma forma poluídas. Essas restrições culminaram, então, no desenvolvimento acelerado de terras úmidas construídas.

As terras úmidas construídas procuram imitar algumas das funções existentes nos naturais, em particular a capacidade de degradação da matéria orgânica e contenção de nutrientes (fósforo e nitrogênio).

Desta forma, eles são sistemas projetados, artificialmente pelo homem, para utilizar plantas aquáticas em substratos (areia, solo ou cascalho) onde, de forma natural e sob condições ambientais adequadas, pode ocorrer a formação de biofilmes, que agregam uma população variada de microrganismos. Estes seres possuem a capacidade de tratar os esgotos, por meio de processos biológicos, químicos e físicos.

Entre as funções das plantas aquáticas, destacam-se:

- a utilização de nutrientes e metais pesados;
- a transferência de oxigênio para a rizosfera;

- suporte para o crescimento e ação de microrganismos, pela presença de rizomas e de raízes, bem como a absorção de material particulado, pelo sistema radicular das macrófitas.

#### a) Escolha das macrófitas

Deve-se buscar, na construção das terras úmidas, condições muito parecidas com as existentes nos ambientes naturais, buscando o surgimento das funções de interesse, que, no caso do tratamento de esgotos, são a remoção de matéria orgânica e a retenção de nutrientes.

Entre os componentes principais das terras úmidas encontram-se: as macrófitas aquáticas, o substrato e o biofilme de bactérias, que são responsáveis direta ou indiretamente pela ocorrência dos mecanismos de remoção de poluentes. Na Figura 2.9 apresenta-se um esquema de uma unidade de fluxo superficial, em escala piloto.

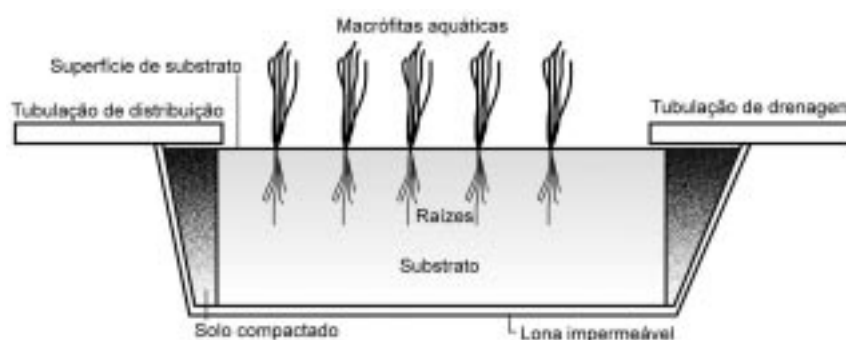


Figura 2.9 – Componentes de um sistema de terra úmida construída, de fluxo superficial

As macrófitas desempenham um importante papel no tratamento de águas residuárias, isso porque elas necessitam de nutrientes para o crescimento e reprodução. Nas terras úmidas construídas, são utilizadas diversas plantas aquáticas, emergentes e flutuantes, sendo que as mais frequentemente usadas são apresentadas na Tabela 2.2. Observa-se que as macrófitas emergentes desenvolvem seus sistemas radiculares, fixadas no substrato, já o caule e as folhas se mantêm parcialmente submersos.

Tabela 2.2 - Principais macrófitas emergentes usadas nas terras úmidas construídas

Espécie emergente	Temperatura desejável (°C)	Tolerância à salinidade (mg/L)	pH ótimo
<i>Typha</i>	10 a 30	30.000	4,0 a 10,0
<i>Juncus</i>	16 a 26	20.000	5,0 a 7,5
<i>Phragmites</i>	12 a 33	45.000	2,0 a 8,0
<i>Schoenoplectus</i>	16 a 27	20.000	4,0 a 9,0
<i>Carex</i>	14 a 32	20.000	5,0 a 7,5

Fonte: Adaptado de REED (1992).

As macrófitas aquáticas que flutuam na superfície da água (flutuantes) mais utilizadas são: *Eichhornia crassipes* (aguapé), *Sperrodela* (erva de pato), *Salvinia molesta* (salvínea) e *Hydrocotyle umbellata*.

Para a construção de um sistema de terras úmidas, deve-se selecionar as macrófitas aquáticas obedecendo aos seguintes critérios:

- ter tolerância a ambiente eutrofizado;
- ter valor econômico;
- ter crescimento rápido e ser de fácil propagação;
- absorver nutrientes e outros constituintes;
- ser de fácil manejo e colheita.

### **b) Tipos de terras úmidas**

Entre as terras úmidas construídas, têm-se dois tipos usualmente conhecidos:

- de fluxo superficial;
- de fluxo subsuperficial.

As terras úmidas de fluxo superficial constituem bacias ou canais, onde são povoadas as macrófitas que utilizam o material orgânico e nutrientes das águas residuárias a ser tratadas. Geralmente, são tipicamente longas e estreitas, para evitar curtos circuitos. A superfície da água a ser tratada se mantém sobre o substrato. Uma das suas desvantagens é a proliferação de insetos, mosquitos e produção de mau cheiro.

Nas terras úmidas de fluxo subsuperficial, a água residuária a ser tratada escoia horizontalmente, através da zona das raízes e rizomas das macrófitas, situadas a cerca de 15 a 20 cm abaixo da superfície do substrato. As principais macrófitas utilizadas nesse sistema subsuperficial são aquelas já citadas na Tabela 2.2.

A comparação destes dois tipos de fluxo, em relação a alguns parâmetros, é apresentada na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 – Critérios para construção de terras úmidas**

Parâmetros	Fluxo superficial	Fluxo subsuperficial
Tempo de detenção hidráulica (dia)	5 a 14	2 a 7
Taxa máxima de carregamento (kgDBO/ha.dia)	80	75
Profundidade substrato (cm)	10 a 50	10 a 100
Taxa de carregamento hidráulico (mm/dia)	7 a 60	2 a 30
Área requerida (ha/m <sup>3</sup> .dia)	0,002 a 0,014	0,001 a 0,007
Controle de mosquito	Necessário	Não é necessário
Relação comprimento : largura	2:1 a 10:1	0,25:1 a 5:1

Fonte: Adaptado de REED (1992).

### **c) Aspectos Construtivos**

Para a construção das terras úmidas, deve-se observar os seguintes aspectos:

- proximidade dos corpos de água receptores (rios, lagos, reservatórios etc);
- existência de solo impermeável;
- declividade do terreno entre 0 e 3%;
- distância da planície de inundação dos rios;
- disponibilidade de extensas áreas.

Estudos em escala real e de laboratório têm demonstrado que estes sistemas possuem boa capacidade de remoção de DBO, sólidos suspensos, nitrogênio, fósforo e metais. A redução dos teores destes parâmetros é resultante da ação de diversos mecanismos de sedimentação, de precipitação, de adsorção química e de interação microbiana. Na Tabela 2.4 estão apresentados alguns mecanismos de remoção para alguns constituintes.

Tabela 2.4 - Constituintes e mecanismo de remoção do sistema de terras úmidas	
Constituintes	Mecanismos de remoção
Sólidos suspensos	Sedimentação e filtração
Material orgânico solúvel	Degradação aeróbia e anaeróbia Amonificação, nitrificação e desnitrificação (biológico)
Nitrogênio	Utilização pela planta Volatilização de amônia
Fósforo	Adsorção Utilização pela planta Adsorção e troca de cátions
Metais	Complexação, precipitação Utilização pela planta Oxidação redução (bioquímica) Sedimentação Filtração
Patógenos	Predação Morte Natural Irradiação UV Excreção de antibiótico proveniente das raízes das macrófitas

Fonte: Adaptado de COOPER et al. (1996).

#### d) Vantagens e Desvantagens

O sistema de terras úmidas construídas, como todos os outros sistemas para tratamento de esgotos, apresenta suas vantagens e desvantagens, conforme apresentado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Vantagens e desvantagens das terras úmidas construídas	
Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de construção	Alta demanda de área
Fácil operação e manejo	Necessidade de substrato, como brita e areia
Remove satisfatoriamente matéria orgânica e sólidos suspensos, nitrogênio e fósforo	Susceptível a entupimento dos espaços vazios do substrato
Considerável redução de patógenos	Necessidade de manejo das macrófitas

Pode-se acrescentar, como mais uma vantagem, o fato da biomassa produzida no sistema poder ser utilizada pelo homem para vários fins econômicos, tais como:

- alimentação;

- ração para animais;
- fertilizante de solo;
- fertilizante de tanque de piscicultura;
- nas indústrias;
- construção civil.

#### **2.6.4 Experiências no âmbito do PROSAB**

No âmbito do PROSAB, a aplicabilidade de sistemas de terras úmidas construídas para o pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios foi investigada por SOUZA et al. (2000). O aparato experimental era constituído por quatro unidades de terras úmidas (10 metros de comprimento, 1 metro de largura e 0,6 m de profundidade), preenchidas com areia grossa e operadas com diferentes taxas hidráulicas (2,0 a 4,5 cm/d). Três das unidades utilizaram macrófitas emergentes (*Juncus* sp.), enquanto a quarta unidade foi operada como unidade de controle, sem a presença de plantas (Figura 2.10).

Os resultados obtidos após um ano de operação indicaram eficiências médias de remoção de DQO e SST nas faixas de 79 a 85 e 48 a 71, respectivamente. A remoção de coliformes fecais foi excelente, da ordem de 4 unidades logarítmicas. O fósforo também foi eficientemente removido (média de 90%), mas remoção de nitrogênio foi apenas parcial (45 a 70% para amônia e 47 a 70% para NTK).



Figura 2.10 – Vista do sistema de terras úmidas pesquisado por SOUZA et al. (2000)

## **2.7 IRRIGAÇÃO**

### **2.7.1 Descrição**

A crescente escassez de recursos hídricos, principalmente em regiões áridas e semi-áridas, faz com que sejam necessárias mudanças na distribuição hídrica do planeta. Assim, a utilização de esgotos na agricultura irrigada, torna-se de grande valia.

Nas civilizações ocidentais, a aplicação de esgotos em áreas agrícolas vem ocorrendo desde a Grécia antiga. Após a Segunda Guerra Mundial, ocorreu um notável aumento da aplicação deste método, não somente pelas necessidades impostas pelo pós-guerra, mas também devido ao avanço tecnológico, que possibilitou a ampliação dos conhecimentos sobre o assunto. Houve, também, a evolução das técnicas agrícolas de manejo do solo e de irrigação e o aumento do conhecimento físico-químico e microbiológico aplicado aos esgotos.

Atualmente, as preocupações com a saúde pública e com o ambiente requerem a multiplicação dos sistemas básicos de esgotamento sanitário e do seu tratamento. Tal fato, possibilita o reconhecimento da irrigação como uma forma econômica e muito produtiva de destinação final de esgotos.

### **2.7.2 Aspectos quantitativos e qualitativos**

Admitindo-se uma contribuição de 20 L/pessoa.dia, uma comunidade de 10.000 habitantes produzirá aproximadamente 200 m<sup>3</sup> de esgotos por dia. É um volume de água considerável e disponível diariamente. Assim, é fácil calcular que é enorme a quantidade de esgotos que se pode dispor para irrigação, principalmente para regiões áridas e semi-áridas, onde há a limitação dos recursos hídricos, permitindo a conservação das águas naturais de boa qualidade somente para usos mais restritivos.

Conforme FOLEGATTI (1999), em geral, os esgotos sanitários apresentam teores de macro e micronutrientes satisfatórios, para a demanda da maioria das culturas. Porém, a presença de sais e sólidos dissolvidos fixos deve ser vista com atenção, já que tais características podem gerar um efluente salino, impróprio para a irrigação.

Provavelmente, microelementos estarão presentes em concentrações abaixo dos teores tóxicos e acima da demanda nutricional da maioria das culturas. Exceção deve ser feita para o boro que, dependendo da quantidade, pode ser tóxico para diversas culturas, sendo que este elemento está presente em efluentes que contenham materiais oriundos de produtos de limpeza.

A aplicação dos nutrientes contidos nos efluentes tratados pode reduzir, ou mesmo eliminar, a necessidade de fertilizantes comerciais. Além disso, a matéria orgânica contida nos esgotos aumenta a capacidade do solo em reter água.

Na verdade, os esgotos são apreciados pelos agricultores, simplesmente porque os nutrientes, neles presentes, fazem com que o rendimento das colheitas seja muito maior.

### **2.7.3 Qualidade das águas residuárias**

Segundo GHEYI (1999), a eliminação de microrganismos patogênicos é o principal objetivo do tratamento convencional visando o reuso dos esgotos. Os padrões sobre a qualidade epidemiológica do efluente são expressos segundo o número máximo permissível de coliformes fecais. Este grupo de microrganismos tem boa representatividade como indicador de bactérias presentes na água, mas é menos satisfatório para os vírus presentes nas excretas. O grupo dos coliformes fecais tem um uso muito limitado quando se trata de protozoários e helmintos, para os quais não existem indicadores seguros e, reconhecidamente, constituem o maior risco real para a saúde pública.

Em 1989, a OMS, em conjunto com outras instituições internacionais, publicou um conjunto de diretrizes sanitárias para o uso de esgotos na agricultura e aquicultura. No mesmo, é focado o uso das lagoas de estabilização com tempos de detenção hidráulico de 8 a 10 dias, como o tratamento mais viável para a eliminação de patógenos.

O decaimento gradual e natural dos microrganismos patogênicos sobre o solo constitui outro valioso fator de segurança para reduzir os riscos potenciais para a saúde. Conforme a OMS (1989), na utilização de efluentes para a irrigação, a inativação dos patógenos por meio de raios ultravioleta, da dessecação e dos predadores biológicos naturais, pode produzir uma redução suplementar de 90% a 99%, após poucos dias de utilização.

A Tabela 2.6 apresenta as diretrizes recomendadas pela OMS (1989) para a qualidade microbiológica de esgotos sanitários utilizados na agricultura, para três grupos de cultivo.

**Tabela 2.6 – Diretrizes recomendadas para a qualidade microbiológica de esgotos sanitários utilizados na agricultura<sup>(1)</sup>**

Categoria	Condições de aproveitamento	Grupo exposto	Nematóides intestinais <sup>(2)</sup> (ovos/L) <sup>(3)</sup>	Coliformes fecais (CF/100 mL) <sup>(4)</sup>	Tratamento requerido
A	Culturas consumidas cruas, campos esportivos, jardins públicos	Trabalhadores, consumidores e público em geral	≤ 1	≤ 1000 <sup>(5)</sup>	Série de Lagoas de estabilização (ou tratamento equivalente)
B	Culturas de cereais, industriais e forrageiras, prados e árvores <sup>(6)</sup>	Trabalhadores	< 1	Não se recomenda nenhuma norma	Lagoas de estabilização por 8 a 10 dias (ou tratamento equivalente)
C	Categoria B, sem os trabalhadores e o público estarem expostos	Nenhum	Não se aplica	Não se aplica	Sedimentação Primária

<sup>(1)</sup> Em casos específicos, deve-se considerar os fatores epidemiológicos e sócio-culturais de cada região, e modificar os padrões, de acordo com a sua exigência.

<sup>(2)</sup> Espécies: *Ascaris*, *Trichuris* e *Ancilostomas*. Calculado como média aritmética do número de ovos/L.

<sup>(3)</sup> Durante o período de irrigação.

<sup>(4)</sup> Calculado como média geométrica do número de CF/100 mL

<sup>(5)</sup> Convém estabelecer uma diretriz mais restrita (<200 CF/100mL) para espaços públicos, como os hotéis, onde o público pode entrar em contato direto.

<sup>(6)</sup> No caso de árvores frutíferas, a irrigação deve cessar duas semanas antes da colheita da fruta e esta não deve ser colhida na superfície do solo. Não é conveniente irrigar por aspersão

Fonte: Adaptado de OMS (1989).

A Tabela 2.7 exemplifica a interdependência entre algumas medidas de proteção, recomendando o grau de tratamento dos esgotos necessário para afastar os riscos sanitários, em função do tipo de cultura e do método de irrigação.

Deve-se ter em mente que o tratamento de esgotos necessário não considera a remoção de sólidos, para evitar entupimentos e colmatação. Evidentemente, a viabilidade e a eficácia de qualquer combinação de medidas de proteção dependerão dos diversos fatores locais intervenientes, como endemicidade das doenças, costumes e hábitos sociais, práticas agrícolas e disponibilidade de recursos que devem ser analisados cuidadosamente.

Tabela 2.7 – Grau de tratamento dos esgotos necessário, em função do tipo de cultura e da técnica de irrigação

Tipo de cultura	Método de irrigação	Tratamento dos esgotos (grau necessário, objetivo sanitário)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimentícia, para o consumo humano direto (legumes, verduras, frutas etc)</li> <li>• Campos de desportos e áreas de recreação (gramados)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por aspersão</li> <li>• Por inundação ou sulcos</li> <li>• Localizada ou subsuperficial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exigente</li> <li>• Exigente</li> <li>• Moderado</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cerealíferas ou industriais</li> <li>• Forragens e pastos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por aspersão</li> <li>• Por inundação ou sulcos</li> <li>• Localizada ou subsuperficial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moderado</li> <li>• Baixo</li> <li>• Nenhum</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Árvores (bosques, reflorestamento etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por aspersão</li> <li>• Por inundação ou sulcos</li> <li>• Localizada ou subsuperficial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo</li> <li>• Nenhum</li> <li>• Nenhum</li> </ul>

Fonte: ANDRADE NETO (1991).

#### 2.7.4 Aspectos relativos à saúde pública

No uso de águas residuárias na irrigação, os contaminantes de importância para a saúde pública são biológicos (vermes, protozoários, bactérias e vírus patogênicos). A quantidade de patogênicos presentes é de extrema importância, devido ao alto risco que pode acarretar à saúde pública. Os contaminantes químicos não são relevantes, exceto nos despejos de certas indústrias.

Quanto ao risco da transmissão dos contaminantes, ele pode ser dividido em: potencial e real. O risco potencial, ou teórico, é inferido com base na simples ocorrência de patogênicos no meio de transmissão. O risco real é deduzido, baseando-se em evidências epidemiológicas.

Sabe-se que para uma pessoa, ou várias, efetivamente sofrer uma doença por causa do uso de esgotos ou efluentes tratados em irrigação, seria necessário que:

- uma certa concentração de uma espécie de patógeno chegue ao campo irrigado;
- dependendo da latência, persistência e capacidade de multiplicação, esta concentração atinja, e/ou se mantenha em níveis de dose infectiva;
- esta dose infectiva alcance e penetre uma pessoa sã;
- esta infecção provoque, efetivamente, um agravamento à saúde desta pessoa.

Em termos de epidemiologia, somente há risco efetivo quando ocorre excesso de incidência ou prevalência da doença ou de intensidade da infecção (risco epidemiológico), associado à rota de transmissão (no nosso caso, irrigação com esgotos) em uma determinada população.

Os fatos reais conhecidos, que consideram os vários fatores envolvidos, demonstram que a análise de risco potencial da utilização de esgotos e efluentes tratados em irrigação tem superestimado a probabilidade de ocorrência de agravos à saúde pública.

Mas, caso se queira evitar que organismos patogênicos sejam lançados nos campos irrigados, deve-se utilizar técnicas de tratamento de esgotos que sejam altamente eficazes na remoção de destes microrganismos e que sejam capazes de produzir efluentes totalmente livres de patógenos. Tal ação pode inviabilizar a utilização deste método na irrigação, devido ao grande aumento de

seus custos. No entanto, a redução da concentração de patógenos nos esgotos é perfeitamente possível, através de técnicas conhecidas de tratamento, que são capazes de propiciar determinados graus de remoção de microrganismos patogênicos.

Cabe observar que, dependendo do tipo de planta irrigada (e de sua utilização) bem como da técnica de irrigação utilizada, haverá maior ou menor possibilidade de contato entre pessoas e patogênicos e, conseqüentemente, de ocorrerem infecções.

Portanto, mediante restrições às culturas a serem irrigadas com esgotos, associadas à seleção do método de irrigação e cuidados de proteção individual, a possibilidade de contato entre os patogênicos e as pessoas pode ser reduzida ou anulada. Tais premissas permitem a utilização de esgotos sanitários em irrigação, tendo como resultado um baixo risco à saúde, de forma econômica e tecnicamente viável. Estas medidas são mais ou menos rigorosas, dependendo do grau de tratamento dos esgotos, dos fatores locais condicionantes e da suscetibilidade das pessoas expostas.

### **2.7.5 Aspectos sócio-culturais e econômicos**

A utilização controlada de esgotos sanitários brutos, ou de efluentes de sistemas de tratamento de esgotos, na irrigação, pode contribuir para a melhoria da qualidade de vida e condições sociais, de várias formas:

- propicia o aumento da produtividade agrícola, por unidade de área, devido aos nutrientes presentes, à possibilidade de recuperação de áreas improdutivas e à ampliação da área irrigada, contribuindo, significativamente, para o incremento da produção de alimentos, com influência direta sobre a nutrição, a superação da estagnação econômica e a reformulação de práticas sócio-culturais;
- como forma de disposição adequada para os esgotos sanitários, contribui para a melhoria das condições de saúde pública, evitando a transmissão de muitas doenças infecciosas, principais responsáveis pela mortalidade infantil no Brasil;
- contribui para a preservação e proteção do meio ambiente, evitando a descarga dos esgotos nos cursos de águas naturais, prevenindo a poluição, a contaminação e a eutrofização;
- possibilita a melhor conservação do solo, através da acumulação de húmus e da prevenção da erosão pela cobertura vegetal. Ainda pode contribuir para viabilizar ações de revegetação do solo, em áreas que sofreram desmatamento;
- como fonte alternativa de água para a irrigação e como medida de controle da poluição do meio natural, ajudando a preservar as águas de melhor qualidade para o abastecimento público. Deve-se observar que a disponibilidade de água de boa qualidade para o consumo doméstico e industrial é um dos condicionantes mais importantes para a melhoria do padrão de vida de uma população;
- em áreas urbanas, pode-se contribuir para amenizar as condições climáticas, estéticas e recreativas, através da irrigação e fertilização de “zonas verdes”, tais como parques públicos, jardins e campos para práticas desportivas;

### **2.7.6 Aspectos relativos a projeto**

#### **a) Relação Solo - Água - Planta**

Para a utilização dos processos de irrigação deve-se, primeiramente, entender a relação solo-água-planta, o seu comportamento e os fatores intervenientes.

Neste sistema, o solo tem como função fornecer à planta os nutrientes e a água necessária ao seu metabolismo, conforme VIEIRA (1995), sendo a textura e a estrutura do solo fundamentais para

a capacidade de retenção de água, pois definem a quantidade, a forma e a distribuição dos poros onde o líquido é armazenado.

Observa-se que solos arenosos tem menor porosidade, por isso possuem baixa capacidade de retenção, já os solos argilosos possuem uma alta capacidade de retenção, pois possuem maior porosidade. Para a irrigação, tem-se que o ideal é um solo intermediário, devendo-se ter em mente que a matéria orgânica presente no seu interior aumenta a sua capacidade de reter água.

Assim, observa-se uma das vantagens da aplicação do efluente anaeróbio em um solo com baixa capacidade de retenção, porque ele pode atuar como um condicionador do solo, melhorando sua estrutura e, conseqüentemente, sua capacidade de campo.

### **b) Potencial matricial do solo**

A água é retida no solo por forças de adsorção e de capilaridade. A ação destas duas forças recebe o nome de Potencial Matricial da Água no Solo ( $\Psi_m$ ), que é uma força, contra a qual a planta deve exercer um esforço superior, para poder absorver a água que necessita, através do seu sistema radicular, satisfazendo assim o seu metabolismo e a demanda evaporativa.

Como a água sempre caminha de locais mais úmidos para locais mais secos, isto é, de potenciais maiores para menores, à medida que ela vai sendo retirada pela absorção radicular, o teor da água vai se reduzindo e a planta, cada vez mais, exerce um esforço maior para suprir a demanda evaporativa. Desta forma, tem-se que o conjunto evaporação - transpiração local exerce uma grande influência sobre a umidade necessária para a maior produtividade da planta.

### **c) Capacidade de campo e ponto de murchamento**

Defini-se Capacidade de Campo (CC) como a capacidade máxima de retenção de água no solo, acima da qual a água não mais será retida, sendo percolada pela força da gravidade a caminho do lençol freático. Ela varia de  $-0,1\text{ atm}$  a  $-0,33\text{ atm}$ , para solos arenosos de textura média, e é de aproximadamente  $2,0\text{ atm}$ , para solos extremamente argilosos, nos quais não seria possível a irrigação.

O Ponto de Murchamento (PM) corresponde à tensão matricial do solo para a qual ocorre a murcha das plantas normais que nele vivem. O ponto de murcha corresponde ao potencial matricial de  $-15\text{ atm}$ .

Ao intervalo entre a CC e o PM corresponde uma faixa de umidade denominada Água Disponível (AD).

Utilizando o solo como tratamento do efluente anaeróbio, deve-se buscar taxas adequadas de irrigação, de forma a garantir valores intermediários para a umidade do solo, situados entre a CC e o PM, viabilizando o tratamento do efluente pelo conjunto solo-planta, sem riscos de contaminação do lençol freático por nitratos e patógenos. Isso aumenta a produtividade e a qualidade da cultura, através da escolha de um valor que facilite a aquisição de nutrientes e água pela planta.

### **d) Potencial matricial crítico e curva característica**

A relação entre a umidade de um solo e o seu respectivo potencial matricial crítico é denominado Curva Característica de Água no Solo. Existe um valor de potencial matricial para o qual o esforço da planta não chega a causar prejuízos à qualidade e à produtividade do solo. A este valor dá-se a denominação de Potencial Matricial Crítico do respectivo cultivo e a ele está associada uma Umidade Crítica, ponto em que deve-se irrigar o solo para que não haja prejuízo no metabolismo da planta. A Tabela 2.8 apresenta o potencial matricial crítico para diversas

culturas, e a Figura 2.11 apresenta a Curva Característica de Água em um solo denominado de latossolo vermelho-amarelo.

Tabela 2.8 – Potencial matricial crítico de água no solo, para obtenção de altas produções em algumas culturas econômicas

Cultura	Potencial matricial de água no solo (bar)
Alface	0,2
Arroz	0
Banana	0,3 a 1,5
Batata	0,3 a 0,7
Cana-de-açúcar <sup>(2)</sup>	0,8 a 1,5
Citros	0,3 a 0,6
Côco	0,2 a 0,6
Ervilha	0,6
Feijão <sup>(2)</sup>	0,6
Fruteiras	0,6 a 1,0
Fumo	0,3 a 0,8
Grama	0,4 a 0,6
Laranja	0,2 a 1,0
Melão	0,3 a 0,8
Milho <sup>(2)</sup>	0,5 a 1,0
Ornamentais (flores)	0,1 a 0,5
Pepino	1,0
Soja	0,5 a 1,5
Sorgo <sup>(2)</sup>	0,6 a 1,3
Tomate	1,0
Trigo <sup>(1,2)</sup>	0,35 a 0,7
Uva	0,15 a 0,50

(1) De 15 dias, após a germinação, até 30 dias, a cultura tolera um estresse de até 0,8 a 1,5 bar para uniformização do perfilhamento.

(2) Valores mais altos que os citados acima, podem ser aplicados no período de amadurecimento.

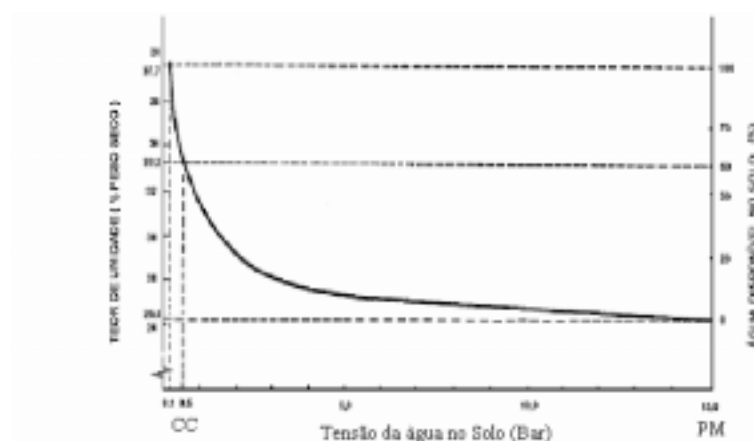


Figura 2.11 – Curva de retenção da água no solo para um latossolo vermelho-amarelo, textura argilosa.

### e) Condições básicas para uma irrigação eficiente

A irrigação, segundo VIEIRA (1995), é a aplicação artificial, oportuna e uniforme de água no solo, para repor a umidade que foi consumida pelas plantas, na evapotranspiração ou na drenagem entre duas regas consecutivas, a fim de manter a produtividade e a qualidade da cultura. A utilização desta técnica é eficiente quando se adotam as seguintes medidas básicas:

- aplicação da quantidade de água necessária;
- irrigação com água de qualidade aceitável;
- estabelecimento de uma frequência apropriada de irrigação;
- emprego das técnicas convenientes de irrigação;
- prevenção da salinização na zona radicular, por meio da lixiviação;
- controle do acúmulo de água sobre a superfície do solo, mediante uma drenagem apropriada;
- manejo adequado dos nutrientes para os cultivos.

### f) Seleção da técnica de irrigação

As principais técnicas de irrigação com esgoto são:

- aspersão;
- inundação;
- sulcos;
- localizada (gotejamento e microaspersão);
- subsuperficial.

Na Figura 2.12, tem-se a apresentação da mais aconselhável de todas estas técnicas, que é a irrigação por sulcos. A aspersão deverá ser evitada e somente considerada quando se conhecer a qualidade exata do efluente doméstico tratado.

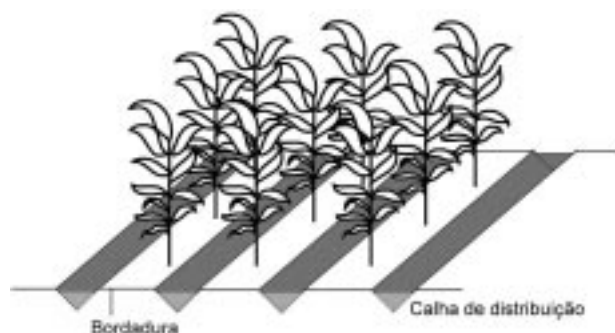


Figura 2.12 – Técnica de irrigação mais aconselhável para tratamento de esgotos domésticos: irrigação por sulcos

Para evitar-se o entupimento nos equipamentos de irrigação, é necessário um tratamento simples para remoção dos sólidos dos esgotos. Na técnica de inundação ou por sulcos, é necessário um simples gradeamento para a retirada dos sólidos grosseiros. Neste caso, interessa correlacionar o grau de tratamento necessário, em relação à técnica de irrigação utilizada, em função do risco de transmissão de doenças.

Ressalta-se, novamente, que, para a saúde pública, a irrigação com esgotos sanitários por aspersão é a técnica mais perigosa. Os aerossóis, contendo micróbios, podem ser transportados pelo vento a distâncias de mais de 1 km (FEACHEM, 1980 e PEARSON, 1986). Embora HESPANHOL (1988) relate que a distância mínima de 50 a 100 metros de estradas públicas e residências seja suficiente como proteção a possíveis problemas reais à saúde, é prudente salientar que as bactérias são mais infectivas quando inaladas do que quando ingeridas e, assim,

trabalhadores do campo e moradores vizinhos podem ser infectados por inalação. Além disto, o sistema de aspersão contamina toda a área irrigada, incluindo as folhas e frutos.

Nas técnicas de irrigação por inundação e por sulcos, também existe o risco de contato direto com a cultura e com os trabalhadores. Porém, estes sistemas são os que apresentam os menores riscos de contaminação.

Nas técnicas de irrigação localizada, o contato direto com folhas e frutos pode ser evitado e os riscos para o agricultor são também baixos. Porém, problemas de entupimento são frequentes neste sistema e podem piorar quando são aplicados esgotos sanitários. Normalmente, as obstruções são geradas por partículas minerais, orgânicas e precipitados químicos.

A irrigação subsuperficial praticamente não oferece quaisquer riscos sanitários, tendo-se em conta um mínimo de cuidados.

As principais vantagens e desvantagens de cada uma destas técnicas de aplicação de esgotos sanitários estão mostradas na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Fatores que afetam a seleção da técnica de irrigação e medidas necessárias quando se utilizam esgotos sanitários

Método de irrigação	Fatores que afetam a seleção	Medidas especiais para esgotos sanitários
Irrigação por inundação	Custo baixo de implantação, não requer a sistematização do terreno, do tipo de efluente e do grau de tratamento.	Proteção completa para os trabalhadores do campo, para os que manipulam as colheitas e para os consumidores.
Irrigação por sulcos	Custo reduzido, às vezes precisa do nivelamento do terreno.	Proteção para os trabalhadores do campo, para os que manipulam as colheitas e para os consumidores.
Irrigação por aspersão	Aproveitamento médio da água, não requerendo a sistematização do terreno.	Não devem ser cultivados alguns produtos da categoria B <sup>(1)</sup> , sobretudo frutíferas. Deve-se manter uma distância mínima de 50 a 100 m para vilas e estradas públicas. Ao serem utilizados efluentes que produzam maus odores, existe a necessidade de tratamento específico.
Irrigação subsuperficial e localizada	Custo elevado, maior aproveitamento de água e colheitas com maiores produtividades.	Deve-se providenciar a filtração do efluente, para evitar problemas de entupimentos nos emissores.

(1) Categoria B (ver também Tabela 2.6): Neste grupo de cultivo, os trabalhadores do campo são também o primeiro grupo de risco, porém podem existir riscos indiretos para o consumidor. Nesta categoria incluem-se: cultivos de pastagens e forrageiras consumidas verdes; cultivos cujos produtos para o consumo humano não entrem em contato direto com os esgotos sanitários; cultivos cujos produtos sejam ingeridos cozidos; cultivos cujos produtos sejam consumidos após serem descascados; qualquer cultivo irrigado por aspersão.

Fonte: Adaptado de GHEYI (1999).

É importante salientar que muitas recomendações sanitárias com relação aos esgotos sanitários utilizados para fins de irrigação nem sempre podem ser atendidas. Portanto, é prudente que seja

assegurada a proteção à saúde por meio da associação de restrições às culturas, método de irrigação e tratamento dos efluentes.

Na Tabela 2.10 estão sintetizados diferentes fatores físicos, agronômicos e de caráter geral que devem ser considerados na seleção do sistema de irrigação. Para uma condição particular definida por uma linha da tabela, o número zero (0), para uma dada coluna, indica que aquela condição não influencia na escolha daquele sistema específico. O sinal positivo (+) indica existir vantagens na seleção deste sistema, com respeito ao fator analisado. O sinal negativo (-) indica que o sistema não é conveniente no que se refere àquele fator, devendo-se optar por um outro sistema de irrigação. Entretanto, não deve ser interpretado como se o sistema fosse totalmente inadequado para uma determinada condição, visto que podem haver limitações que também inviabilizem a seleção de outros sistemas.

Tabela 2.10 - Guia para pré-seleção de sistemas de irrigação

Parâmetro	Superficial			Aspersão						Microirrigação	
	Sulcos	Faixa	Inun- dação	Desloc. Lateral	Pivô Central	Auto Propelido	Ramal Rolante	Conv. Portátil	Conv. Per- manente	Micro Aspersão	Gote- jamento
<b>Tipo de Hortaliza</b>											
Alho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Batata	0	-	-	+	+	0	0	0	+	0	0
Batata-doce	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
Beringela	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
Brássicas	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
Cebola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cenoura	0	-	-	+	+	0	+	0	+	0	0
Feijão-de-vagem	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Melancia	+	-	-	0	0	0	0	-	0	0	+
Melão	+	-	-	0	0	0	0	-	0	-	+
Milho-doce	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0
Pimentão	+	-	-	-	-	-	-	-	-	0	+
Tomate para mesa	+	-	-	-	-	-	-	-	-	0	+
Tomate para processamento	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
Práticas culturais											
Rotação de cultura	0	0	-	0	0	-	0	0	0	0	0
Pulverizações constantes	+	+	0	-	-	-	-	-	-	0	+
Cultivo protegido	+	-	-	-	-	-	-	-	0	0	+
Cobertura do solo – plástico	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Modificação microclimática	-	-	0	0	0	0	0	0	+	+	0
<b>Terreno – solo</b>											
Lençol freático elevado	-	-	0	0	0	0	0	0	0	+	+
Ondulado e raso	0	0	-	+	+	0	0	+	+	0	0
Infiltração alta – arenoso	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
Infiltração moderada – siltoso	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
Infiltração baixa – argiloso	0	0	+	-	-	-	0	0	0	0	0
Muito desuniforme	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
Baixa retenção de água	-	-	0	0	0	0	0	0	+	+	+
Salino	-	-	0	0	0	0	-	-	-	+	+
<b>Fonte de água</b>											
Subterrânea	-	-	-	0	0	0	0	0	0	+	+
Fornecimento sob demanda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fornecimento período fixos	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Fornecimento contínuo	-	-	-	0	0	0	0	0	0	+	+
Taxa e período variável	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Muito sedimento	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Muita matéria orgânica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
Muito salina	0	0	0	-	-	-	-	-	-	0	0
Água servida (poluída)	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	-
Vazão grande	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0
Vazão pequena	-	-	-	0	0	0	0	0	0	+	+

\* Inundação temporária em pequenos tabuleiros ou bacias.

(0) indica que o fator não tem influência na seleção do sistema;

(+) indica possível razão para preferência;

(-) indica possível razão para escolher um sistema alternativo

Fonte: Adaptado de CLEMMENS & DEDRICK (1994)

### **g) Taxas de aplicação hidráulica**

Segundo a EPA (1976), quanto à taxa de aplicação, existem dois tipos de sistemas de irrigação:

- o primeiro, objetiva a maximização da produção da cultura agrícola (baixa taxa), deixando o tratamento do efluente em segundo plano;
- o segundo, objetiva o tratamento do efluente, através da irrigação (alta taxa).

No primeiro caso, o sistema opera com baixas taxas de aplicação. Devido a isto, são necessárias grandes áreas, o que propicia grande dispersão de poluentes, minimizando os impactos adversos no solo e na vegetação. Devido à alta porcentagem de evapotranspiração, a concentração de sólidos dissolvidos inorgânicos no líquido percolado pode ser indesejável. Nesta técnica, a taxa de aplicação hidráulica varia de 0,7 a 3,7 m/ha.ano.

No sistema operando a alta taxa, para a remoção eficiente de nutrientes, a colheita escolhida deve ser tal que assimile a alta concentração de esgoto, de forma a evitar a percolação de nutrientes ao lençol freático. Este processo requer menor área para a aplicação, porém o impacto sobre o meio é maior. A taxa de aplicação hidráulica varia de 0,7 a 7,5 m/ha.ano.

Este segundo sistema poderá ser utilizado com reservas em culturas secundárias, como por exemplo a de eucaliptos, que tem a característica de alta evapotranspiração. Objetivando evitar a contaminação do lençol freático, CAMPOS (1999) recomenda a aplicação desta técnica em áreas que possuam uma distância mínima do lençol freático de 1,5 m. Deve-se observar também, que o solo deve ter boa capacidade drenante, de forma a evitar problemas de colmatção, recomendando-se os solos argilo-siltosos.

Visando o reuso do efluente anaeróbio em culturas irrigadas, estudos em desenvolvimento buscam a definição de uma lâmina hídrica que atenda às condições agrícolas e sanitárias. Esta taxa deve possibilitar o tratamento do esgoto sem riscos ao lençol freático e sem afetar a produtividade e a qualidade da cultura irrigada.

### **2.7.7 Aspectos econômicos dos métodos de irrigação**

A Tabela 2.11 relaciona os sistemas de irrigação com custos, fornecendo informações para uma análise de custo/benefício dos sistemas.

Tabela 2.11 - Características dos diferentes sistemas de irrigação, passíveis de serem utilizados para hortaliças

Método	Sistema	Eficiência de irrigação (%)	Investimento inicial <sup>(a)</sup> (R\$/ha)	Consumo de energia <sup>(b)</sup> (kWh/mm.ha)	Mão-de-obra <sup>(c)</sup> requerida (h/ha irrigado)
Superficial	Sulcos	40 a 70	600 a 1500	0,3 a 3,0	1,0 a 3,0
	Corrugação	40 a 70	600 a 1500	0,3 a 3,0	1,0 a 3,0
	Faixas	50 a 75	800 a 1500	0,3 a 3,0	0,5 a 2,5
	Inundação	50 a 70	800 a 1200	0,3 a 3,0	0,3 a 1,2
Subsuperficial	Lençol freático fixo	40 a 70	600 a 1200	0,0 a 0,5	0,5 a 2,0
	Lençol freático variável	50 a 75	600 a 1200	0,0 a 0,5	0,7 a 3,5
Aspersão	Convencional portátil	60 a 75	800 a 1500	3,0 a 6,0	1,5 a 3,5
	Convencional semiportátil	60 a 75	1200 a 2000	3,0 a 6,0	0,7 a 2,5
	Convencional permanente	70 a 80	3000 a 5000	3,0 a 6,0	0,2 a 0,5
	Autopropelido	60 a 70	1500 a 2200	6,0 a 9,0	0,5 a 1,0
	Ramal rolante	65 a 85	1500 a 2200	3,0 a 6,0	0,7 a 1,5
	Pivô central	75 a 90	1500 a 3000 <sup>(d)</sup>	2,0 a 6,0	0,1 a 0,7
	Deslocamento linear	75 a 90	2000 a 3500	2,0 a 6,0	0,3 a 1,0
Microirrigação	Gotejamento	85 a 95	4000 a 8000 <sup>(e)</sup>	1,0 a 4,0	0,1 a 0,3
	Microaspersão	80 a 90	4000 a 8000	1,5 a 4,0	0,1 a 0,4
	Borbulhador ("Bubbler")	75 a 90	2000 a 6000	0,5 a 3,0	0,1 a 0,4

<sup>a</sup> Depende do nível de automação, tipo de hortaliça, qualidade de equipamento, tamanho da área, dentre outros.

<sup>b</sup> Estimado para uma altura de recalque entre 0 e 50 m, exceto para irrigação subsuperficial (0 a 10 m).  
Dividir kWh/mm.ha por 3,2 para estimar litros de diesel/mm.ha.

<sup>c</sup> Depende do nível de automação do sistema, eficiência gerencial, de mão-de-obra, dentre outros fatores.

<sup>d</sup> Para pivôs com áreas em torno de três hectares, o custo varia entre R\$ 5.000 e 6.000/ha.

<sup>e</sup> Para pequenas áreas de estufa, este valor pode ser superior a R\$ 15.000/ha.

Obs.: São apresentados valores de eficiência de irrigação, para os sistemas por aspersão para condições onde as perdas por evaporação e deriva são inferiores a 1%.

Fonte: Adaptado de PAIR et al. (1983), SCALOPPI (1985) e CLEMMENS & DEDRICK (1994).

## 2.7.8 Riscos sanitários e ambientais

### a) Preliminares

Apesar de todas as vantagens da aplicação de efluentes no solo, é necessário considerar os riscos sanitários e ambientais dessa alternativa. Uma aplicação inadequada ou descontrolada de despejos no solo poderá afetar significativamente o próprio solo, a água subterrânea, as águas superficiais, e ainda trazer problemas de saúde pública à população exposta.

Ao avaliar esses riscos, é fundamental considerar a possibilidade da contaminação do aquífero subterrâneo a longo prazo. O método de irrigação por aspersão possui uma eficiência média de 80%, ou seja, apenas 80% da água aplicada será utilizada pelas plantas na evapotranspiração. Os 20% restantes irão percolar para as camadas profundas do solo. Assim, as substâncias químicas presentes no despejo de irrigação estarão na água de percolação profunda, em uma concentração cinco vezes maior (BOUWER, 1998).

Além disso, o movimento dessa água percolando no solo será muito lento. Considerando, por exemplo, uma irrigação com taxa de aplicação de 100 cm/ano e uma eficiência de 80%, 20 cm/ano percolarão para as camadas profundas do solo. Admitindo que a zona insaturada do solo possui 15% de água, a velocidade de percolação será de 133 cm/ano. Assim, se o lençol

freático estiver a 50 m da superfície, os poluentes presentes no lixiviado levariam 37 anos para atingir a água subterrânea.

Estudos recentes, efetuados pela EPA, têm apresentado o alto nível do impacto nas águas subterrâneas, após decorrer um tempo entre 30 e 40 anos, principalmente pelo elevado teor de nitrato.

### **b) Nitrato**

No solo as espécies de nitrogênio passam por vários processos químicos e biológicos, indo para as plantas, para a atmosfera ( $N_2$ ) ou para o aquífero subterrâneo (CAMPOS, 1999).

O nitrogênio, na forma de nitrato, é solúvel em água e, uma vez presente no solo, possui grande potencial de atingir o lençol freático. Esse potencial é maximizado quando for aplicado efluente em solo de característica arenosa, com maior permeabilidade.

A contaminação da água subterrânea com nitratos pode afetar a saúde humana, se ela for utilizada para abastecimento público. A presença de nitratos em concentrações elevadas, pode causar a metahemoglobinemia, principalmente em crianças. Além disso, pode ocorrer a formação de nitrosaminas cancerígenas (DI BERNARDO, 1993). Tem-se que seus valores limites, apresentados pela OMS, devem ser inferiores a 10 mg/L, em  $N-NO_3$ .

A aplicação de cargas excessivas de nitrogênio no processo de irrigação pode trazer outros problemas. Culturas forrageiras, contendo grande quantidade de nitrato, podem intoxicar animais ruminantes. O processo de silagem de plantas, contendo elevadas concentrações de nitrato, pode levar a graves intoxicações nos trabalhadores, devido à formação de  $NO_2$ , através da redução do nitrato (MANAHAN, 1994).

### **c) Subprodutos da desinfecção**

Vários compostos orgânicos refratários podem atingir a água subterrânea quando da aplicação de despejos no solo. Tais substâncias, muitas das quais sequer identificadas, podem ser formadas na operação de cloração da água de abastecimento público ou na desinfecção do próprio efluente a ser aplicado (BOUWER, 1998).

No método de irrigação, a preocupação com a possível contaminação das culturas por organismos patogênicos pode levar à implantação de desinfecção dos despejos tratados, o que pode ocasionar a geração dos compostos orgânicos mencionados anteriormente.

Além disso, a aplicação no solo de despejos com elevada carga de nutrientes e de matéria orgânica, através da irrigação, aumenta a bioatividade do solo e o crescimento das plantas. Esse excesso de matéria vegetal pode se decompor sobre o solo, formando ácidos húmicos e fúlvicos, que podem atingir o lençol freático. Se a água subterrânea passar por processo de desinfecção com cloro no abastecimento público, pode permitir a formação de trihalometanos, de ácidos haloacéticos e de outros compostos orgânicos tóxicos e biorefratários (BOUWER, 1998).

## 2.8 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

### 2.8.1 Descrição

O escoamento superficial é um método de tratamento, no qual o esgoto é filtrado e estabilizado, ao escoar pela superfície de um terreno recoberto por uma vegetação, sendo que geralmente utiliza-se a grama (CORAUCCI FILHO, 1999).

Normalmente, ele é constituído de uma série de rampas uniformes (Figura 2.13), nas quais existe um sistema de distribuição de esgotos em sua parte mais alta. O efluente é distribuído intermitentemente no topo e escoar, através de um fluxo laminar pela superfície vegetal, até chegar em um canal coletor. A sua disposição final é realizada através de uma calha coletora e pela evapotranspiração, que ocorre durante o percurso na rampa. Também ocorre a percolação, porém em menor taxa (EPA, 1992).

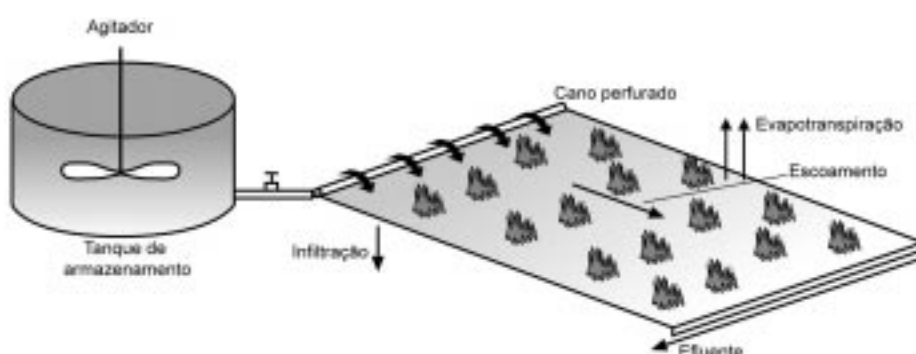


Figura 2.13 – Esquema de um sistema de escoamento superficial

A vegetação existente na superfície da rampa permite uma proteção ao solo, contra a erosão, e também cria uma camada suporte, na qual os microrganismos se estabelecerão.

Este método foi desenvolvido para dar polimento ao efluente dos outros sistemas de tratamento e atualmente está sendo investigado pela UFMG, UNICAMP, UFRN, entre outras. Ele difere dos outros métodos de tratamento no solo, pelo fato de não ser dependente da infiltração, e o efluente tratado poder ser descartado numa fonte pontual (EPA, 1984).

### 2.8.1 Utilização, vantagens e desvantagens

O escoamento superficial é mais adequado para ser usado em superfícies de terrenos de baixa permeabilidade ou que tenham uma camada restritiva, como, por exemplo, solos argilosos até profundidades de 0,3 a 0,6 m.

É possível projetar este sistema em solos muito permeáveis, através da construção de uma barreira artificial que previna o deslocamento da água para níveis inferiores. Com a utilização de tal medida, haverá o encarecimento da construção, fato que pode inviabilizar o seu uso em pequena escala. Entretanto, um estudo mais criterioso da aplicação de taxas hidráulicas menores, pode propiciar o seu emprego nas condições iniciais.

Em comparação com outros métodos de aplicação no solo, o escoamento superficial apresenta como principais vantagens as seguintes características:

- é apropriado para o tratamento de esgotos de comunidades rurais e indústrias sazonais, que geram resíduos orgânicos (indústrias cítricas e usinas de açúcar e álcool);

- proporciona um tratamento secundário avançado, com uma operação relativamente simples e barata;
- a cobertura vegetal pode ser reaproveitada ou utilizada comercialmente;
- apresenta a menor restrição quanto às características do meio, necessitando apenas de um solo relativamente impermeável para a sua instalação.

Como desvantagens, tem-se que:

- o método é limitado pelo clima, tolerância da cultura em relação à água e declividade do terreno;
- a aplicação pode ser limitada durante o tempo úmido e quando as temperaturas ficarem abaixo do congelamento;
- as taxas de aplicação podem ser restritas pelo tipo de crescimento da cultura;
- o terreno íngreme, ou plano, não é adequado a este tipo de tratamento;
- é necessária a desinfecção do efluente, antes da descarga em um curso d'água.

### **2.8.2 Critérios e parâmetros do projeto**

Para o desenvolvimento de um projeto adequado, deve-se utilizar os corretos parâmetros de controle do sistema. Desta forma, deve-se primeiramente determinar o comprimento das rampas e as taxas de aplicação, em função da carga orgânica e da vazão de efluente.

De maneira geral, os principais parâmetros de projeto e suas definições são:

#### **a) Comprimento da rampa**

É a extensão longitudinal da superfície física do solo, definida pelo sentido do escoamento do efluente. Para a técnica de distribuição de baixa-pressão, o comprimento desta declividade está na faixa de 30 a 45 m, e para a de alta-pressão, entre 45 e 60 m.

#### **b) Declividade do terreno**

Recomenda-se uma declividade do terreno entre 1 e 12%, sendo que o intervalo ótimo está entre 2 e 8% (ARAÚJO,1998). Uma declividade inferior a 1% não é recomendada, devido à possível formação de poças do líquido e, conseqüentemente, à proliferação de moscas.

#### **c) Caracterização do solo**

O escoamento superficial foi desenvolvido, inicialmente, para solos com baixa permeabilidade, menor que 15 mm/h. Apesar disso, o sistema pode se utilizado em locais com permeabilidade moderada (15 a 50 mm/h). Isto se deve ao fato de que, ao longo do tempo, pode ocorrer o preenchimento dos vazios pelos sólidos do afluente (colmatação), e pelo crescimento vegetal. A permeabilidade também pode ser alterada pela compactação do solo durante a construção do sistema.

#### **d) Ciclo de operação**

A sua operação é intermitente, com período de aplicação entre 8 e 12 h/d, seguido de um período seco, na faixa de 16 a 24 h/d. Tem-se que ciclos de operação de 4 dias de aplicação e de 2 dias secos, evitam a propagação de insetos.

#### **e) Taxa de aplicação**

É considerada o principal parâmetro para dimensionamento do sistema. A taxa de aplicação é definida como o volume aplicado ao módulo de tratamento, dividido pelo período de aplicação, em horas. Existe uma tendência em uniformizar este parâmetro expressando-o em termos de

largura unitária do módulo pela largura do terreno,  $\text{m}^3/\text{h.m}$  (CORAUCCI FILHO, 1992 e PAGANINI, 1997).

Ela depende das limitações da descarga do efluente, do nível de pré-tratamento, da profundidade e da declividade do terreno, além das informações referentes ao clima. As taxas típicas para esgoto com tratamento primário são de 0,2 a 0,4  $\text{m}^3/\text{h.m}$  de largura do terreno. Para esgoto secundário, tem-se a taxa de 0,6  $\text{m}^3/\text{h.m}$  (EPA, 1992).

Em estudos realizados por CORAUCCI FILHO et al. (1999), foram utilizadas as taxas 0,15  $\text{m}^3/\text{h.m}$  e 0,25  $\text{m}^3/\text{h.m}$ , chegando-se à conclusão que a primeira taxa não foi suficiente para promover o escoamento na rampa.

### **2.8.3 Aspectos construtivos**

No que se refere aos aspectos construtivos, deve-se levar em consideração os seguintes itens:

#### **a) Armazenamento**

Existe a necessidade da construção de um tanque de estocagem que seja suficiente para o armazenamento do efluente, nos dias em que não há aplicação. Deve-se prever, durante este período, a agitação do líquido.

#### **b) Distribuição**

A aplicação uniforme do esgoto em toda a largura do terreno é um ponto crítico da performance do sistema. Sua aplicação, por aspersores, de baixa ou alta pressão, ou por tubos perfurados, deve iniciar-se no topo de cada rampa.

A distribuição do efluente, pode ser feita por meio de três técnicas distintas:

- *tubulação com aberturas intervaladas*: são tubulações semelhantes às usadas para irrigação. O afluente é aplicado em baixa-pressão (2 a 5  $\text{N}/\text{cm}^2$ ). Deve-se fazer um ajuste para se obter uma distribuição uniforme. Este tipo de distribuição não é recomendado para afluentes com elevada concentração de sólidos suspensos, devido ao potencial de deposição dos sólidos próximos ao ponto de descarga;
- *aspersores de baixa pressão*: são utilizados com pressões entre 5 e 15  $\text{N}/\text{cm}^2$ . Neste tipo de distribuição, os sólidos podem causar o entupimento das aberturas do aspersor
- *aspersores de alta pressão*: são utilizados com pressão entre 35 e 60  $\text{N}/\text{cm}^2$ . Este tipo de distribuição abrange áreas maiores que as apresentadas anteriormente. Como o efluente pode atingir distâncias maiores, recomenda-se a construção de rampas com maior comprimento, permitindo-se assim, um adequado tratamento. Todavia, fica expresso o cuidado na utilização deste tipo de aspersor no caso de esgotos domésticos, tendo em vista os riscos de contaminação pelos aerossóis.

Na Tabela 2.12 estão apresentados, comparativamente, os tipos mais comuns de distribuição do esgoto.

Tabela 2.12 – Métodos de distribuição: vantagens e limitações

Método	Vantagens	Limitações
Tubulações com aberturas reguláveis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidade de limpeza</li> <li>• Baixo consumo de energia</li> <li>• Pouca geração de aerossóis</li> <li>• Menores áreas de segurança</li> <li>• Controle do balanço hídrico facilitado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de congelamento e sedimentação dentro dos tubos</li> <li>• Dificuldade de distribuição uniforme</li> <li>• Possibilidade de erosão</li> <li>• Entupimento dos orifícios</li> </ul>
Tubulações recortadas ou perfuradas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixos custos de energia</li> <li>• Pouca geração de aerossóis</li> <li>• Menores áreas de segurança</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade em assegurar distribuição uniforme</li> <li>• Possibilidade de erosão</li> <li>• Dificuldade em controlar balanço hídrico</li> <li>• Entupimento dos orifícios</li> </ul>
Orifício borbulhante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo consumo de energia</li> <li>• Pouca geração de aerossóis</li> <li>• Menores áreas de segurança</li> <li>• Menos suscetível à sedimentação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade de conseguir distribuição uniforme</li> <li>• Possibilidade de erosão</li> <li>• Difícil manutenção quando entupido</li> </ul>
Canais de distribuição	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo consumo de energia</li> <li>• Pouca geração de aerossóis</li> <li>• Menores áreas de segurança</li> <li>• Fácil operação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto custo inicial de implantação</li> <li>• Possibilidade de erosão</li> <li>• Formação de caminhos preferenciais</li> </ul>
Aspersores de baixa pressão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distribuição mais uniforme do esgoto</li> <li>• Baixo custo de energia</li> <li>• Produz menos aerossóis que os aspersores de alta pressão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de obstrução do orifício por partículas grandes</li> <li>• Geração de aerossóis</li> </ul>
Aspersores de alta pressão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distribuição mais uniforme do esgoto</li> <li>• Menores requisitos de manutenção</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto custo de energia</li> <li>• Maior geração de aerossóis</li> <li>• Grandes áreas de segurança</li> </ul>

Fonte – Adaptado de ARAÚJO (1998)

### c) Canais de coleta

Estes canais devem ser projetados com capacidade e declividade suficientes para comportar a o efluente que chega até a base da rampa. A Figura 2.14 apresenta alguns exemplos de canais de coleta.

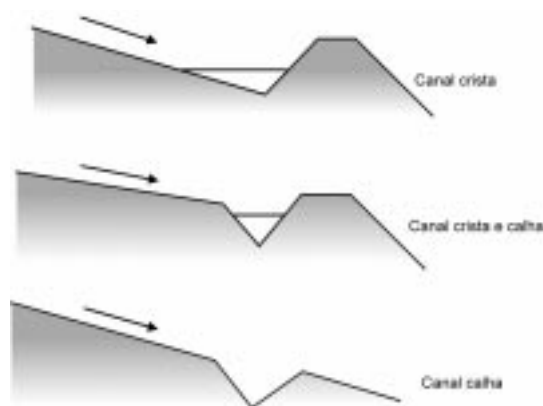


Figura 2.14 – Tipos de canais de coleta

#### d) Seleção da vegetação

A cobertura vegetal é essencial ao bom desempenho do sistema. Gramíneas perenes e tolerantes à água são as que melhor se adaptam aos sistemas de escoamento superficial. Suas principais funções são: proteção contra erosão, redistribuição do fluxo (o que evita o curto-circuito), suporte para microrganismos e remoção de nutrientes.

#### e) Monitoração

Deve-se monitorar constantemente a vazão, as taxas aplicadas, o período e a frequência de aplicação do esgoto e a qualidade do afluente e do efluente. Se há uma infiltração significativa no solo, também há necessidade de se monitorar a água subterrânea.

Este sistema de tratamento tem propiciado uma redução de DBO que pode chegar a 90%, enquanto as reduções de nitrogênio e fósforo, embora ainda não completamente estabelecidas, têm chegado a 80 e 60%, respectivamente. No entanto, este processo está sendo submetido a pesquisas que virão a esclarecer o assunto.

### 2.8.4 Experiências no âmbito do PROSAB

CHERNICHARO et al. (2000) e CORAUCCI FILHO et al. (2000) vêm desenvolvendo pesquisas com sistemas de escoamento superficial, aplicados ao pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, utilizando diferentes espécies de gramíneas como cobertura vegetal das rampas.

Nos estudos desenvolvidos por CHERNICHARO et al. (2000), o sistema de escoamento superficial era constituído por 3 rampas com 25 metros de comprimento, 3 metros de largura e declividade de 4% (Figura 2.15). O sistema foi operado com taxas de aplicação linear variando de 0,20 a 0,60 m<sup>3</sup>/h.m (6,4 a 19,2 cm/d) e períodos de aplicação de 8 horas/dia (frequência de 5 dias/semana). O sistema de pós-tratamento apresentou resultados muito bons quando foi operado com taxas de aplicação de até 0,50 m<sup>3</sup>/h.m, tendo sido observadas baixas concentrações de sólidos suspensos e de matéria orgânica no efluente final (resultados médios variando entre 98 e 119 mgDQO/L; 48 e 62 mgDBO/L; 17 e 57 mgSST/L). Em relação à qualidade microbiológica, foi observada uma excelente remoção de ovos de helmintos no sistema UASB/Escoamento Superficial, que apresentou uma concentração média de 0,2 ovo/L no efluente final. Todavia, a remoção de coliformes fecais no sistema foi apenas satisfatória, apresentando eficiências médias de remoção de 2 a 3 unidades logarítmicas.

Nos experimentos desenvolvidos por CORAUCCI FILHO et al. (2000), o sistema de escoamento superficial era constituído por 3 rampas com 35 metros de comprimento, 4,2 metros de largura e

declividade de 3,5 % (Figura 2.16). O sistema foi operado com taxas de aplicação linear de 0,10 e 0,20 m<sup>3</sup>/h.m (2,0 a 4,0 cm/d) e períodos de aplicação de 8 horas/dia (frequência de 5 dias/semana). Os resultados do sistema de pós-tratamento (Filtro Anaeróbio/Escoamento Superficial) apresentaram concentrações médias de DQO, DBO, SST, NTK e P no efluente final da ordem de 116 mgDQO/L, 33 mgDBO/L, 40 mgSST/L, 13 mgNTK/L e 0,5 mgP/L, respectivamente.

Na tabela 2.13 é apresentado um resumo dos principais resultados obtidos em experimentos conduzidos na UNICAMP e na UFMG.

Tabela 2.13 – Resultados obtidos em experimentos com escoamento superficial				
Parâmetro	UNICAMP	UNICAMP	UFMG (ARAÚJO, 1998)	UFMG (COTA, 2000)
Efluente	Filtro anaeróbio	Filtro anaeróbio	Reator UASB	Reator UASB
Largura da rampa (m)	4,2	4,2	3,0	3,0
Comprimento da rampa (m)	35	35	25	25
Declividade da rampa (%)	3,5	3,5	4	4
Taxa hidráulica (m <sup>3</sup> /h.m)	0,10 e 0,20	0,30 e 0,40	0,20 a 0,60	0,48 <sup>(a)</sup>
Período de aplicação (horas/d)	8	8	8	8
Frequência (dias por semana)	5	5	5	5
Cobertura vegetal	<i>Tifton 85</i>	<i>Tifton 85</i>	<i>Brachiara humidícola</i>	<i>Tifton 85</i>
DBO do efluente (mgDBO/L)	30	60	48 a 62	60

(a) Taxa média (vazão variável ao longo do dia, devido regime hidráulico transiente de alimentação das rampas)



Figura 2.15 – Vista das rampas de escoamento superficial pesquisadas por CHERNICHARO et al. (2000)

2.16 – Vista das rampas de escoamento superficial pesquisadas por CORAUCCI FILHO et al. (2000)

## 2.8.5 Exemplo de dimensionamento

Dimensionar um sistema de aplicação no solo, constituído por rampas de escoamento superficial, para o tratamento e disposição de efluente de um reator UASB, em uma cidade com as seguintes características:

### a) Dados

- População:  $P = 10.000$  hab
- Vazão afluyente média:  $Q_{\text{méd}} = 1.478 \text{ m}^3/\text{d}$
- Vazão afluyente máxima diária:  $Q_{\text{máx-d}} = 1.670 \text{ m}^3/\text{d}$
- Vazão afluyente máxima horária:  $Q_{\text{máx-h}} = 2.246 \text{ m}^3/\text{d}$
- Carga orgânica afluyente ao reator UASB:  $\text{CO}_{\text{A-UASB}} = 500 \text{ kgDBO/d}$
- DBO média afluyente ao reator UASB:  $S_{\text{a-UASB}} = 338 \text{ mg/L}$
- Eficiência de remoção de DBO esperada para o reator UASB: 70%
- Carga orgânica efluente do reator UASB, em termos de DBO:  $\text{CO}_{\text{e-UASB}} = 150 \text{ kgDBO/d}$
- DBO média efluente do reator UASB:  $S_{\text{e-UASB}} = 101 \text{ mg/L}$
- Concentração de DBO desejada para o efluente das rampas:  $S_{\text{e-rampas}} < 30 \text{ mg/L}$

### b) Solução

#### Adotar parâmetros de dimensionamento

Baseando-se em experiências realizadas na UNICAMP e na UFMG, utilizando-se rampas de escoamento superficial para pós-tratamento de efluentes de filtros anaeróbios e de reatores UASB, adotaram-se os seguintes parâmetros de dimensionamento:

- taxa de aplicação linear:  $q_L = 0,40 \text{ m}^3/\text{h.m}$
- comprimento da rampa:  $Z = 35 \text{ m}$
- períodos de aplicação:  $\Delta t = 8 \text{ horas/dia}$
- frequência de aplicação:  $f = 5 \text{ dias/semana}$

#### Cálculo da área necessária (A)

$$A = \frac{Q_{\text{máx-d}} \times z}{q_L \times \Delta t} = \frac{(1.670 \text{ m}^3 / \text{dia}) \times 35 \text{ m}}{(0,20 \text{ m}^3 / \text{h.m}) \times (8 \text{ h} / \text{d})}$$

$$A = 18.266 \text{ m}^2 \text{ (1,83 ha)}$$

#### Acréscimo de área devido à frequência de aplicação ( $A_{\text{final}}$ )

Considerando-se a necessidade de descanso, foi adotada a frequência de aplicação (f) de 5 dias por semana. Nestas condições, deve-se prever o aumento da área calculada para:

$$A_{\text{final}} = A/f = [1,8 \text{ ha} / (5/7)]$$

$$A_{\text{final}} = 2,56 \text{ ha}$$

#### Verificação da carga orgânica aplicada ( $q_s$ )

$$q_s = \frac{\text{CO}_{\text{e-UASB}}}{A_{\text{final}}} = \frac{150 \text{ kgDBO/d}}{2,56 \text{ ha}}$$

•

$$q_s = 58,6 \text{ kgDBO/ha.d}$$

•

A área definida no dimensionamento refere-se a área total para aplicação no solo. Como o período de aplicação é de 8 horas por dia, a aplicação devera ser feita em 3 ciclos. Assim, 1/3 da área total será para cada período de 8 horas, resguardando, evidentemente, a frequência de aplicação de 5 dias por semana.

Atualmente, além da remoção de carga orgânica, investiga-se a eficiência do sistema combinado, reator anaeróbio + aplicação no solo, na remoção de patógenos, com especial interesse em relação aos ovos de helmintos.

## 2.9 INFILTRAÇÃO RÁPIDA OU BACIA DE INFILTRAÇÃO

### 2.9.1 Descrição

A necessidade de recarga dos lençóis subterrâneos, aliada ao objetivo de reuso dos esgotos de forma eficiente, levou ao desenvolvimento do sistema de tratamento no solo pelo método das bacias superficiais de infiltração. A água percola através do solo nas regiões não saturadas, até a superfície do aquífero, para armazenamento e futura utilização. No caso do esgoto, ocorre um tratamento adicional, quando o fluxo do efluente escoar através do solo.

Durante este processo de tratamento, ocorrem fenômenos físicos e químicos, que incluem: a filtração, a adsorção, a troca catiônica e as várias reações microbiológicas e bioquímicas.

O sistema de recarga hidráulica, por bacias de infiltração, tem sido analisado através da combinação das investigações no campo e nos laboratórios. Estes estudos indicaram que as taxas de infiltração e a capacidade de tratamento do solo são influenciadas pelo tipo e pelas características do perfil do solo, pela profundidade da bacia e pelo tempo dos ciclos de inundação e de secagem (HOUSTON, 1999).

Ao contrário do caso da irrigação de grandes áreas agrícolas, que busca o aproveitamento das substâncias fertilizantes contidas nos efluentes, os campos de infiltração destinam-se à:

- depuração dos esgotos;
- recarga de lençóis subterrâneos;
- reutilização do efluente, para atender a diferentes usos e finalidades.

Paralelamente, pode-se obter alguns benefícios para a agricultura. Entretanto, neste caso, a atividade agrícola deve ficar submetida às imposições do tratamento.

### 2.9.2 Fatores que influenciam o tratamento

Os processos de infiltração rápida têm essa denominação devido à alta taxa com que o efluente é aplicado sobre o solo e à velocidade de infiltração deste no terreno. Normalmente, a presença de vegetação no solo não é requerida, pois a alta velocidade de percolação do esgoto faz com que a sua incorporação pela vegetação seja incipiente e quase inexistente (WEF, 1990; EPA, 1981).

Este método depende de uma camada superficial de solo, espessa o suficiente para proteger o lençol subterrâneo da contaminação. As variáveis de permeabilidade e de drenagem do solo devem possuir altos valores. O esquema de um sistema de infiltração é apresentado na Figura 2.17.

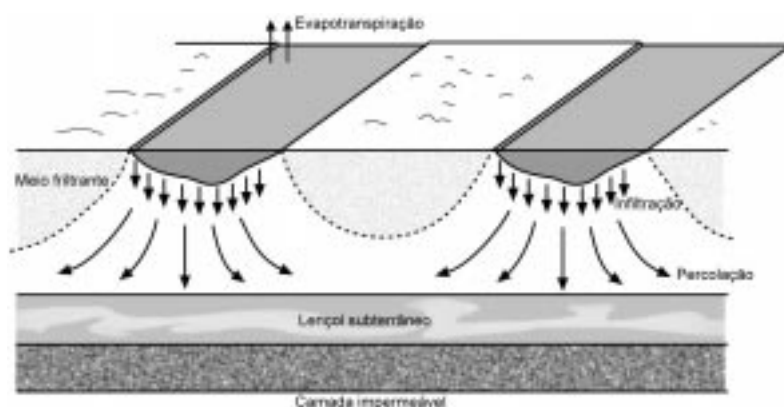


Figura 2.17 – Sistema de infiltração rápida  
Fonte: Adaptado de EPA (1992)

A aplicação dos esgotos é feita, normalmente, por inundação, observando-se que os terrenos com declividades suaves (4 a 6%) são os mais apropriados. Devido à alta taxa de infiltração de esgoto no solo, este sistema requer um pré-tratamento mínimo, equivalente a uma decantação primária. Dessa forma, pode-se evitar a rápida colmatção da superfície do solo (WEF, 1990).

Por outro lado, verifica-se que a evolução do processo de colmatção favorece a melhoria da capacidade de tratamento do esgoto, pela redução de taxas de infiltração no leito filtrante. Atualmente, os estudos que estão sendo desenvolvidos mostraram ser viável a implantação de bacias de infiltração em regiões com pequenas profundidades de leito filtrante, da ordem de 50 cm (NADAI ANDREOLI, 1999).

### **2.9.3 Remoção de poluentes**

A redução dos poluentes do esgoto pela ação filtrante e retentora do solo é excelente. Os sólidos suspensos, a DBO e os coliformes fecais são quase que totalmente removidos nesse tipo de sistema (EPA, 1981).

A remoção de nitrogênio por nitrificação, seguida de absorção pelas plantas (nos casos em que elas existirem) é muito pequena, pois, como a velocidade de infiltração é muito alta, a absorção de nitrogênio pelas plantas fica prejudicada. Portanto, ela se dá, principalmente, por nitrificação seguida de desnitrificação, chegando normalmente a 50% (EPA, 1981).

No caso do fósforo, sua retirada do efluente é feita através de processos de fixação no terreno (adsorção e precipitação) e são dependentes do tipo de solo. A retirada varia de 70 a 99%, de acordo com as características físicas e químicas existentes neste meio (EPA, 1981).

### **2.9.4 Critérios e parâmetros de projeto**

#### **a) Tipo de Solo**

A seleção do terreno baseia-se na capacidade do tratamento do solo, que depende da sua textura primária e da estrutura e espessura da sua camada superficial. Nenhum tipo de solo apresenta condições ótimas para remoção de todos os constituintes do esgoto. Aqueles de textura fina, como silte e argila, têm condutividade hidráulica relativamente baixa e, portanto, não são utilizados para infiltração. Solos arenosos têm maiores taxas de condutividade hidráulica e reaeração, permitindo altas taxas orgânicas e hidráulicas e curtos ciclos de reaplicação, o que permite uma rápida infiltração. No entanto, podem ser menos eficientes para filtração, tendo uma baixa capacidade de troca catiônica.

Normalmente, as áreas com leito de areia são as mais recomendadas. A profundidade não saturada do terreno é um outro critério de seleção. Recomenda-se um mínimo de 1,5 a 2,5 m, para solo não saturado, e com condutividade hidráulica relativamente uniforme.

#### **b) Taxas de aplicação**

A capacidade de drenagem e infiltração do solo, juntamente com o tempo de secagem, ditam as taxas médias de aplicação de esgotos. Os valores mais comuns estão na faixa de 150 a 4.400 m<sup>3</sup>/hab.ha, sendo que os valores próximos do extremo superior são referentes a solos mais arenosos.

Para que se estabeleça as condições aeróbias no solo, através da secagem, há a necessidade da divisão da área a ser aplicada em módulos (terraços ou rampas), com o rodízio de aplicação entre elas. Uma lagoa de armazenamento pode vir a ser necessária para os volumes de esgotos que

excedam, temporariamente, a capacidade de infiltração do solo, embora isso seja raro (NUCCI et al., 1978; PAGANINI, 1997).

Os campos de infiltração de Berlim possuem em média uma taxa de 394 hab/ha, ou 64 m<sup>3</sup>/ha.dia, sendo que as áreas mais solicitadas tem uma taxa de 1.056 hab/ha ou 204 m<sup>3</sup>/ha.dia. Tais valores elevados somente são possíveis quando utiliza-se uma operação intermitente. Deve-se observar que, com altas taxas de aplicação pode acontecer o arraste do ar para o interior dos interstícios do solo.

A operação dos campos de infiltração é dificultada nos dias chuvosos, pois há excesso de efluente para ser tratado. A melhor solução, como no caso da irrigação para fins agrícolas em grandes áreas, é a recomendação para a interconexão dessas instalações com uma estação de tratamento municipal.

Sabe-se que, após algumas dezenas de anos, a fertilidade dos campos de infiltração geralmente começa a declinar. No caso dos campos de infiltração de Berlim e de Paris, a causa deste fenômeno foi o acúmulo de microelementos, principalmente cobre e zinco. Verificou-se, por outro lado, que a evolução deste processo de colmatção favorece a melhoria da eficiência do tratamento do esgoto, devido à redução de taxas de infiltração no leito filtrante.

A taxa de aplicação hidráulica é determinada pelas características do solo, do aquífero, das chuvas e do nível de tratamento prévio dos esgotos.

A taxa máxima é estabelecida pela condutividade hidráulica do solo permeável. Tipicamente, usa-se 4% da condutividade hidráulica medida saturada como uma estimativa preliminar. Esta taxa pode ser ajustada de acordo com o limite de DBO, variando entre 21 e 126 kg/ha.dia, obtendo-se um controle da formação de biofilme e melhorando-se a aeração. Quando utiliza-se a carga hidráulica, tem-se que ela varia entre 1,5 e 35 cm/dia.

Um tratamento primário é o nível mínimo de pré-tratamento sugerido, porém, quando este tratamento não for suficiente, é necessário o tratamento secundário. Se houver contribuição de nitrogênio na água subterrânea, ele será mais limitante para o controle da carga hidráulica e do pré-tratamento.

Na Tabela 2.15 estão apresentados alguns resultados obtidos para a remoção de alguns parâmetros, utilizando diferentes taxas de aplicação.

Tabela 2.15 – Eficiência de um sistema típico de infiltração rápida

Parâmetro	Taxa (kg/ha.d)	Remoção	Comentários
DBO <sub>5</sub>	45 a 158	86 a 98%	Baixa remoção associada a alta taxa em solo arenoso
Nitrogênio	3 a 37	10 a 80%	Remoção depende do pré-tratamento, da relação DBO:N, do clima, da carga hidráulica e do período de chuva
Fósforo	1 a 12	29 a 99%	Remoção correlacionada com a textura do solo, tempo de aplicação, a mineralogia do solo e a distância de transporte
Orgânicos tóxicos	NA	Varia com a estrutura	Remoção favorável para orgânicos voláteis e biodegradáveis, aparentemente quando o subsolo é aerado
Coliformes fecais	NA	2 a 6 unidades logarítmicas	Remoção correlacionada a textura do solo, distância de transporte e intervalo de aplicação
Vírus	NA	2 - 4 unidades logarítmicas	Dados limitados sugerem remoção com baixa carga, solo de textura fina, subsolo aerado e alta temperatura.

NA – não aplicado

Fonte: Adaptado de EPA (1992)

### c) Padrão de aplicação

Refere-se ao tempo em que o sistema estará operando ou em descanso, sendo determinado de acordo com a taxa de aplicação e a área existente. Sua valoração pode levar à máxima ou à mínima remoção de nitrogênio, de acordo com os objetivos desejados (Tabela 2.16).

**Tabela 2.16 – Ciclos hidráulicos sugeridos para sistemas de infiltração rápida**

Objetivo da aplicação	Esgoto aplicado	Aplicação sazonal	Período de aplicação	Período seco
Taxas máximas de infiltração	Primário	Verão	1 a 2	5 a 7
		Inverno	1 a 2	7 a 12
	Secundário	Verão	1 a 3	4 a 5
		Inverno	1 a 3	5 a 10
Máxima remoção de nitrogênio	Primário	Verão	1 a 2	10 a 14
		Inverno	1 a 2	12 a 16
	Secundário	Verão	7 a 9	10 a 15
		Inverno	9 a 12	12 a 16
Máxima nitrificação	Primário	Verão	1 a 2	5 a 7
			1 a 2	7 a 12
	Secundário	Verão	1 a 3	4 a 5
			1 a 3	5 a 10

Fonte: EPA (1992)

### d) Custo

Os custos do projeto referem-se, basicamente, aos relativos à área para a implantação, incluindo-se a aquisição, a preparação da superfície e a construção do reservatório. Se as condições topográficas não forem favoráveis, haverá um considerável aumento de custo. Outros valores que podem ser associados, são a instalação de rede para drenagem e o pré-tratamento.

### e) Monitoração

A monitoração constitui-se no controle da vazão e na verificação dos parâmetros de qualidade dos esgotos aplicados e da água subterrânea.

### 2.9.5 Experiências no âmbito do PROSAB

No âmbito do PROSAB, a aplicabilidade de sistemas de infiltração rápida para o pós-tratamento e disposição final de efluentes de reatores anaeróbios vem sendo investigada pela PUC/PR e pela UFRN. Na UFRN, as unidades de infiltração rápida são constituídas por uma bacia natural de infiltração (Figura 2.18), em associação com o poço de amostragem (Figura 2.19), e por uma coluna de fibra de vidro (diâmetro de 400 mm e altura de 4,65 m). Ambas as unidades foram operadas com taxas de aplicação na faixa de 2,0 a 2,6 m/d e ciclo de alimentação de 1 dia por semana (6 dias de descanso).

Os resultados principais desta pesquisa apresentaram eficiências de remoção de DQO e SST de aproximadamente 60% e 80%, respectivamente. Estas remoções ocorreram predominantemente nas camadas superficiais do solo. As unidades também apresentaram excelentes resultados de conversão de amônia em nitrato (cerca de 90%), mas a acumulação de nitrato nas camadas inferiores do solo é motivo de preocupação devido ao risco de contaminação do lençol freático. As características do leito de areia (alta porosidade:  $10^{-2}$  cm/s e baixa capacidade de troca de íons: 7,2 meq/100 g de solo) contribuíram para as baixas eficiências de remoção de coliformes fecais e fósforo (MELO et al., 2000).



Figura 2.18 – Vista da bacia de infiltração pesquisada por MELO et al. (2000)



Figura 2.19 – Vista do poço de amostragem contíguo à bacia de infiltração

## 2.10 BIBLIOGRAFIA

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NB-41, Normas para construção e instalação de fossas sépticas*. 18p. 1963.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 13969 - Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação*. 60p. 1997.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7229 - Construção e Instalação de Fossas Sépticas e Disposição dos Efluentes Finais*. 37p. 1982.
- ANDRADE NETO, C. O. Alternativa Tecnológica para Valas de Infiltração. *20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES*. Rio de Janeiro, 1999.
- ANDRADE NETO, C. O. *Sistemas Simples para Tratamento de Esgotos Sanitários: Experiência Brasileira*. 301p. ABES, Rio de Janeiro, 1997.
- ANDRADE NETO, C. O. O. Uso de Esgotos Sanitários e Efluentes Tratados na Irrigação. *IX Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem - Natal, Rio Grande do Norte*. Anais Vol. 2, p.1961-2006, 1991.
- ANDREOLI, F. N. *Estudo da Influência da Taxa de Aplicação e Profundidades do Leito Filtrante no Desempenho do Processo de Infiltração Rápida, para Tratamento Secundário de Esgoto Sanitário*., Dissertação (Mestrado), CT-UFES, Vitória, ES, 95p, 1996.
- ARAÚJO, G.C. *Avaliação do Pós-tratamento de Efluentes de Reatores UASB através de um Sistema de Aplicação Superficial de Esgoto no Solo*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 130p. Belo Horizonte, 1998.
- AZEVEDO NETTO, J. M. *Tratamento de águas residuárias*. 218p. 1984.
- BOUWER, H., FOX, P., WESTERHOFF, P. Irrigation with Treated Effluent. How this practice affect underlying groundwater. *Water Environment and Technology*. 1998.
- CAMPOS, J. R. *Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo*. ABES. 466p. Rio de Janeiro, 1999.
- CHERNICHARO, C. A.; VON SPERLING, M. Seminário Internacional – Tendências no Tratamento Simplificado de Águas Residuárias Domésticas e Industriais. *Anais*. Belo Horizonte, 1996.
- CHERNICHARO C.A.L., COTA R.S., ZERBINI A.M., VON SPERLING M., and BRITO H.N.C.. Post-treatment of anaerobic effluents in an overflow land system. In: *Proc. VI Latin-American Workshop and Seminar on Anaerobic Digestion*, pp. 336-351, 2000.
- CLEMMENS, A .J.; DEDRICK, A.R. Irrigation Techniques and Evaluations. *Management of Water Use in Agriculture*. Springer- Verlag, p.64-103, Berlin, 1994.
- COGGER, C.; On-site Septic Systems: The risk of groundwater contamination. *Journal of Environmental Health*, 51, (1), 1998.
- COOPER, P. F.; GREEN, M. D.; SHUTES, R. B. E. *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment*. Buckinghamshire: WRC publications, 206p, 1996.
- CORAUCCI FILHO, B., *Corrosão Microbiológica em Tubos de Concreto*, Dissertação Mestrado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1983, 250p.
- CORAUCCI FILHO, B.; CHERNICHARO, C.A.L.; ANDRADE NETO, C.O.; NOUR, E.A.; NADAI ANDREOLI, F.; SOUZA, H.N.; MONTEGGIA, L.O.; VON SPERLING, M.; LUCAS FILHO, M.; AISSE, M.M.; FIGUEIREDO, R.F.; STEFANUTTI, R. Tecnologia do Tratamento de Águas Residuárias no Solo: Infiltração Rápida e Escoamento Superficial. In Campos, J.R. *Tratamento de Esgotos sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo*. Rio de Janeiro: RECOPE, p.357-407, 1999.
- CORAUCCI FILHO B.; NOUR E.A.A.; FIGUEIREDO R.F.; STEFANUTTI R.; KLUSENER FILHO L.C.; BROLEZE S.T. Estudo de um sistema de pós-tratamento de efluente com aplicação do método do escoamento superficial no solo: polimento de efluentes de filtros anaeróbios. *Pós-*

- tratamento de efluentes de reatores anaeróbios - Coletânea de Artigos Técnicos – Vol. 1.* pp. 1-8, FINEP/PROSAB, 2000.
- CORAUCCI FILHO, B et al. Partida em um sistema de pós tratamento de efluente de lagoa anaeróbia através do método do escoamento superficial. *XXVIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo – Londrina, Paraná. Anais*, 2001.
- COTA, R. S.; CHERNICHARO, C.A.L.; VON SPERLING, M.; GONÇALVES, L.C.; ZERBINI, A.M.; GOMES, C.C. Pós tratamento de efluentes de reatores anaeróbios em um sistema de aplicação superficial de esgotos no solo com o sistema operando em regime hidráulico transiente. *XXVII Congresso interamericano de engenharia sanitária – Porto Alegre, Rio Grande do Sul*, 2000.
- DACACH, N.G. *Saneamento Básico*. 314. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1990.
- DENNY, P. Implementation of constructed wetland in developing countries. *Water Science Technology*, 35 (5), p.27-34, 1997.
- DE VRIES, J.; “Soil filtration of wastewater effluent and the mechanism of pore clogging”. *Journal WPCF*, 44 (4), 1972.
- DI BERNARDO, L. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. 496p. ABES., 1993.
- DOORENBOS, J. & KASSAN, A.H. Yield response to water. *FAO. Irrig. And Drain*. Paper 33, 193, 1979.
- ERNST. *Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik*. Berlim, 1985.
- ESTEVES, F.A. *Fundamentos de Liminologia*. 4 ed. 699p. Interciência - FINEP, Rio de Janeiro, 1988.
- FEACHEN, R.G. et al. Health aspects of excreta and sewage management – A State of the Art Review. *Appropriate Technology for Water Supply and Sanitation*; 3. The World Bank Washington, DC, 1980.
- FIGUEIREDO, R.F., SMITH, R.G., SCHROEDER, E.D. Rainfall and overland flow performance. *Journal of Environmental Engineering*. 110 (3), 1984.
- FOLEGATTI, M.V. *Fertirrigação: citrus, flores e hortaliças*. Agropecuária. 458p. Guaíba, 1999.
- GHEYI, H.R. KÖNIG, A. CEBALLOS, B.S.O. DAMASCENO, F.A.V. *Tratamento e Uso de Águas Residuárias*. 110p. UFPB: Campina Grande, 1999.
- GONÇALVES, R.F.; “Aspectos teóricos e práticos do tratamento de esgoto sanitário em biofiltros aerados com leito granular submerso”. In: *Seminário Internacional, Belo Horizonte, MG*, 6 a 8 março de 1996.
- HAGEDORN, C.; HANSEN, D. T.; SIMONSON, G.H.; Survival and movement of fecal indicator bacteria in soil under conditions of saturated flow. *Journal of Environmental Quality*, 7 (1), 1978.
- HELLER, L. CHERNICHARO, C. A.; “Tratamento e disposição final dos esgotos no meio rural.” *Seminário Internacional, Belo Horizonte, MG*, 6 a 8 março de 1996.
- HESPANHOL, I. Aspectos Técnicos e de Saúde Pública Relativos ao Uso de Esgotos na Agricultura e Aquicultura – *Encontro Internacional sobre o Desenvolvimento da Década da Água. Lisboa, Portugal*: 19 a 22 abril de 1988. Governo de Portugal, República Federal da Alemanha, PNUD, OMS, 68p, 1988.
- HOUSTON, S.L.; DURYEA, P.D.; HONG, R. Infiltration considerations for ground-water recharge with waste effluent. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Sep/Oct, p.264-272, 1999.
- IMHOFF, K; *Manual de Tratamento de Águas Residuárias*. 1966.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A.; *Tratamento de esgotos domésticos*. 3ª edição. 692p. ABES, Rio de Janeiro, 1995.
- KROISS, H.; SVARDAL, K.; *Analytical parameters for monitoring of wastewater treatment plants*. TU, Vienna, 1999.

- LOUDON, T. L.; BIRNIE, G. L. JR.; "Performance of trenches receiving sand filter effluent in slowly permeable soils". In: "On-site Wastewater Treatment". *Proceedings of the Sixth National Symposium on Individual and Small Community Sewage Systems*. Chicago, 16 a 17 dec. 1991.
- MALTA, C.; PRESTES, C. A Commodity do Século 21. *Revista Amanhã*, 115, p.42-46, 1997.
- MANAHAN, S.E. *Environmental Chemistry*. 6<sup>a</sup> ed. 811p. Lewis Publishers, 1994.
- MELO H.N.S.; ANDRADE NETO C.O.; LUCAS FILHO M.; PEREIRA M.G. Pós-tratamento de esgotos sanitários por disposição no solo em bacia de infiltração e coluna de areia. *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios - Coletânea de Artigos Técnicos – Vol. 1*. pp. 17-24, FINEP/PROSAB, 2000.
- METCALF & EDDY *Wastewater engineering. treatment, disposal and reuse*. 1334p. McGraw-Hill, New York, 1991.
- MICHELS C. J. Sand filtration – System suited for small communities. *Water Environmental and Technology*, 7, p.45 – 48, 1996.
- NADAI ANDREOLI, F. tratamento de esgoto sanitário por infiltração em pequena profundidade de areia de alta condutividade hidráulica na remoção de DQO e SS. In: *20o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária – ABES*, 1999.
- NATALIN Jr, O. et al. Tratamento de esgoto no solo por métodos de pequena escala: sumidouro, vala de infiltração vala de filtração. *XXVIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo – Londrina, Paraná. Anais*, 2001.
- NUCCI, N.L.R., ARAÚJO, J.L.B., SILVA, R.J.C. *Tratamento de esgotos municipais por disposição no solo e sua aplicabilidade no Estado de São Paulo*. 70p. Centro de Estudos e Pesquisas de Administração Municipal, São Paulo. 1978.
- ODUM, E. P. *Ecologia*. 434p. Guanabara, Rio de Janeiro, 1988.
- OKURUT, T. O.; RIJS, G.B.J. van BRUGGEN, J. J. A Design and performance of experimental constructed wetlands in Uganda, planted with cyperus papyrus and phragmites mauritianus. *Water Science Technology*, 40 (3), 265-271, 1999.
- OMS. *Directrices sanitárias sobre el uso de águas residuales em agricultura e aquicultura*. 778p. OMS, Genebra, 1989.
- PAGANINI, W.S. *Disposição de esgoto no solo (escoamento à superfície)*. 232p. Fundo editorial da AESABESP, São Paulo, 1997.
- PACKER, A. P., et al. Caracterização e avaliação da biodisponibilidade química de metais pesados no solo após a aplicação de efluente líquido anaeróbios pelo método de escoamento superficial. *XXVIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo – Londrina, Paraná. Anais*, 2001.
- PEARSON, H.W. The reuse of waste stabilization pond effluents for aquaculture and agriculture. *Seminário Regional de Investigacion sobre Lagunas de Estabilizacion – Lima, Peru*, 3 a 7 mar. Centro Panamericano de Ingenieria Sanitária y Ciencias del Ambiente – OMS/OPS, p.89-99, 1986.
- PEAVY, H.; ROWE, D.; TCHOBANOGLOUS, G.; *Environmental Engineering*. McGraw-Hill, Singapore, 1985.
- PELL M.; NYBERG F. Infiltration of wastewater in a newly started pilot sand-filter system: II development and distribution of the bacterial population. *J. Environmental Quality*, 18, p.457 – 462, 1989.
- PRONI- Programa Básico de Agricultura Irrigada - *I Curso Básico de Agricultura Irrigada – Módulo II – Relação Solo-Água-Clima*, 1986.
- RAVINA; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SHISHA, A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. *Irrigation Science*, 13, p.129-139, 1992.
- REED, S.C., MIDDLEBROOKS, E.J., CRITES, R.W. *Natural systems for waste management and treatment*. 308p. McGraw-Hill, New York, 1988.

- SANTOS, J. A. *Análise dos impactos do lançamento de águas residuárias de origem doméstica sobre freático em solo arenoso*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental UFES. 169p, 1997.
- SANTOS, J. A. Avaliação dos impactos causados pela operação de uma bacia de infiltração para tratamento de esgoto sanitário sobre a qualidade da água de um aquífero freático. *19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES*. 1998.
- SHAINBERG, I; OSTER, J.D. *Quality of irrigation water*. International Irrigation Information Centre, IIIC Publication nº 2, 65p., 1978.
- SCHONBORN A. Long term performance of the sand-plant-filter schattweid. *Wat. Sci. Tech.*, **5**, p.307 – 314, 1997.
- SILVA, R. S. P. et al. Tratamento de esgoto no solo por métodos de larga escala: irrigação, escoamento superficial, infiltração – percolação. *XXVIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo – Londrina, Paraná*. Anais, 2001.
- SOUZA J.T., VAN HAANDEL A.C. and GUIMARÃES A.A.V. Post-treatment of anaerobic effluents in constructed wetland system. In: *Proc. VI Latin-American Workshop and Seminar on Anaerobic Digestion*. pp 314-320, 2000.
- SMITH, R.G., SCHROEDER, E.D. Field studies of the overland flow process for treatment of raw and primary treated municipal wastewater. *Journal Water Pollution Control Federation*. **57** (7), p.785-794, 1985.
- SMITH, R.G., SCHOROEDER, E.D. Physical design of overland flow system. *Journal Water Pollution Control Federation*. **55**, mar. 1983.
- SPERLING, V. M. Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries. *Water Science and Technology*, **33** (3), p.59-72, 1996.
- SPERLING, V. M.; CHERNICHARO, C. A.; "Tendências no tratamento simplificado de águas residuárias, domésticas e industriais". *Seminário Internacional*, Belo Horizonte, MG, 6 a 8 março de 1996.
- TEIXEIRA, E. C. "Tratamento de Esgoto Sanitário por Infiltração em Pequena Profundidade de Areia de Alta Condutividade Hidráulica na Remoção de DQO e SS". *19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES*. 1998.
- TONETTI, A. L. et al. Tratamento de esgoto no solo por métodos de média escala: filtros de areia e wetlands. *XXVIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo – Londrina, Paraná*. Anais, 2001.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater*. Cincinnati. 1981.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Process design manual: land treatment of municipal wastewater. Supplement on rapid infiltration and overland flow*. Technology Transfer. Cincinnati. 1984.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Wastewater Treatment/Disposal for Small Communities*. Cincinnati. 1992.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY; *Design Manual, Onsite Wastewater Treatment and Disposal Systems*. Cincinnati, 1980.
- VIEIRA, D.B. *As Técnicas de Irrigação*. 263p. 2.ed. Globo, São Paulo, 1995.
- WATER QUALITY INTERNATIONAL. *New Trends in Small Scale Wastewater Treatment*. 35p, May-June. 1998.
- WEF. Land application of sewage sludge. A Guide for Land Appliers on the Requirement of the Federal Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. Alexandria, VA, 62. *Journal. the Inst. Sew. Pur.*, Part 6, 1962, 581. *Wasserw.*, *Wassertechnik* 542, 1961.