Drenagem Agrícola

Fundamentos e aplicações

Vital Pedro da Silva Paz
Tales Miler Soares
Sergio Nascimento Duarte
Jarbas Honorio de Miranda



2ª Edição PIRACICABA – SP | 2026

AUTORES

Vital Pedro da Silva Paz

Graduado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Doutorado em Irrigação e Drenagem pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP).
Professor Titular da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.

Tales Miler Soares

Graduado em Engenharia Agronômica pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), Mestrado e Doutorado em Irrigação e Drenagem pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP).
Professor Titular da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.

Sergio Nascimento Duarte

Graduado em Engenharia Agronômica pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Mestrado em Irrigação e Drenagem pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), Doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).
Professor Titular da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), Departamento de Engenharia de Biossistemas.

Jarbas Honorio de Miranda

Graduado em Engenharia Agronômica pela Universidade Federal de Goiás, Mestrado e Doutorado em Irrigação e Drenagem pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP).
Professor Associado III da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), Departamento de Engenharia de Biossistemas.

Vital Pedro da Silva Paz
Tales Miler Soares
Sergio Nascimento Duarte
Jarbas Honorio de Miranda

DRENAGEM AGRÍCOLA
Fundamentos e Aplicações

2ª Edição

e-book

Piracicaba – SP
Edição dos Autores
2026

Ficha catalográfica

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Drenagem agrícola [livro eletrônico] : fundamentos e aplicações / Vital Pedro da Silva Paz ... [et al.]. -- 2. ed. -- Piracicaba, SP : Ed. dos Autores, 2026.
PDF

Outros autores: Tales Miler Soares, Sérgio Nascimento Duarte, Jarbas Honorio de Miranda
Bibliografia.
ISBN 978-65-02-45027-7

1. Agricultura 2. Drenagem 3. Irrigação agrícola 4. Meio ambiente 5. Recursos hídricos I. Paz, Vital Pedro da Silva. II. Soares, Tales Miler. III. Duarte, Sérgio Nascimento. IV. Miranda, Jarbas Honorio de.

26-407522.0 CDD-637.181

Índices para catálogo sistemático:

1. Agricultura : Tecnologia agrícola 637.181

Camila Aparecida Rodrigues - Bibliotecária CRB - SP-010133/O

Projeto gráfico e diagramação: Gabriel Enoc
Capa: Gabriel Enoc
Contato: gabrielenocdesign@gmail.com

Prefácio

Extensas superfícies agrícolas estão localizadas em terrenos com problemas de drenagem. Em regiões de clima úmido, em especial em áreas onde existem encostas, é necessário que o dimensionamento do sistema de drenagem subterrânea não despreze a contribuição do lençol freático por fluxo de ascensão capilar após o período de recarga pluviométrica. Nessas áreas, é imprescindível o emprego de um dreno pé de encosta para minimizar os riscos do fluxo de água superficial para a área cultivada.

Em áreas irrigadas de regiões semiáridas, os sistemas de drenagem subterrânea são importantes para o controle da salinidade e para a recuperação de solos degradados por sais, além de imprescindíveis para o controle dos níveis do lençol freático ocasionados por chuvas de forte intensidade e curta duração, como as da região de Petrolina e de Juazeiro, onde as instituições de crédito agrícola exigem o investimento no projeto de drenagem em cultivos irrigados de elevado valor agregado.

A drenagem superficial assume papel relevante no controle da velocidade da água e, portanto, de processos erosivos, além de permitir um aproveitamento mais racional do recurso solo, como vem ocorrendo com a expansão da técnica sulco-camalhão no cultivo do arroz irrigado por inundação contínua no Rio Grande do Sul, viabilizando a rotação de culturas.

Além da importância da drenagem na agricultura, a drenagem é indispensável também em várias outras áreas de aplicação. É o caso de campos esportivos, em especial de futebol, nos quais geralmente é realizada com declividades de 0,5% a partir do centro, a “quatro águas”, enquanto o sistema de drenagem subterrânea é composto por tubulações instaladas em valas dispostas em formato “espinha de peixe”, resultando em condições ideais para a prática do futebol e, consequentemente, maior segurança para os atletas.

As ilustrações, a linguagem simples, objetiva e acessível do e-book Drenagem Agrícola – Fundamentos e Aplicações, refletem sobretudo a experiência dos autores no tema e a sensibilidade em produzir um material com potencial para contribuir com o processo de ensino-aprendizagem no meio acadêmico e como suporte técnico para os que lidam com o tema no cotidiano da agricultura irrigada.

Raimundo Nonato Távora Costa
Professor Titular do Departamento de Engenharia Agrícola
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Ceará

Apresentação

O controle de águas naturais e das decorrentes da aplicação artificial constituem-se um dos elementos fundamentais para o desenvolvimento sustentável da agricultura. Tanto o excesso quanto a deficiência de água podem limitar o crescimento das culturas, comprometer a produtividade e provocar impactos sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Nesse contexto, a drenagem de terras agrícolas deve ser considerada como uma prática relevante dentro do planejamento e do manejo racional e sustentável da água em áreas agrícolas.

A drenagem de terras agrícolas desempenha papel fundamental no controle do excesso de água no solo, na manutenção de condições adequadas de aeração e desenvolvimento do sistema radicular e, portanto, na criação de condições favoráveis ao crescimento e à produtividade das culturas. Em determinadas situações, constitui ainda importante instrumento para o manejo da salinidade e para a sustentabilidade de áreas irrigadas.

Não foi intenção dos autores produzir uma obra exaustiva sobre drenagem agrícola. Procurou-se, sobretudo, apresentar os principais conceitos, fundamentos e aplicações de maneira didática, objetiva e amplamente ilustrada, favorecendo a compreensão inicial do tema. A partir dessa base, espera-se estimular o interesse pelo aprofundamento dos conhecimentos e pela consulta à literatura especializada.

O principal propósito é contribuir para as atividades acadêmicas e pedagógicas voltadas à formação de recursos humanos qualificados para atuação na área de drenagem de terras agrícolas, com responsabilidade técnica e respeito aos recursos naturais. O conteúdo também se destina a estudantes, técnicos, especialistas e produtores interessados na conservação dos recursos naturais e sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

No presente material desenvolvido há uma série de ilustrações que auxiliam na visualização e consequente melhor compreensão da drenagem e suas estruturas. No ensino, na pesquisa e nas ações de campo, muitas vezes é verificada a dificuldade de percepção dos processos e mecanismos de movimento e transporte de água no solo para as estruturas de remoção.

No ensino, na pesquisa e nas ações de campo, muitas vezes é verificada a dificuldade de visualização dos processos e mecanismos de movimento e transporte do excesso de água do solo para as estruturas hidráulicas de remoção.

As figuras, fotografias, esquemas e demais ilustrações apresentadas ao longo deste material, possuem finalidade exclusivamente didática. Sua utilização não representa qualquer interesse, preferência, indicação ou recomendação comercial por parte dos autores em relação a marcas, fabricantes, produtos ou equipamentos. Caso seja identificada alguma restrição relacionada à utilização de determinada imagem ou ilustração, esta poderá ser prontamente substituída.

OS AUTORES

Sumário

1. CONCEITO DE DRENAGEM AGRÍCOLA 07

2. OBJETIVOS DA DRENAGEM 10

3. NECESSIDADE DE DRENAGEM 25

4. CRITÉRIOS DE DRENAGEM 41

5. REGIMES DE FLUXO DA ÁGUA PARA OS DRENOS 44

6. SISTEMAS DE DRENAGEM EM CAMPO 47

7. EQUAÇÕES DE ESPAÇAMENTO ENTRE DRENOS 70

8. DIMENSIONAMENTO DOS DRENOS 87

9. MODELOS COMPUTACIONAIS APLICADOS À 92

10. MATERIAIS DE DRENAGEM E INSTALAÇÃO DE DRENOS 99

11. SALINIDADE DO SOLO 103

LITERATURA CONSULTADA E RECOMENDADA 110

01 Conceito de drenagem agrícola

01. Conceito de drenagem agrícola

Um conceito geral relativamente simples de Drenagem Agrícola, mas ao mesmo tempo bastante abrangente e muito empregado atualmente, consiste na remoção do excesso de água e sais do solo numa taxa que permita uma exploração econômica das culturas e com isso a utilização da área por longo tempo.

É um conjunto de técnicas utilizadas com o objetivo de remover o excesso de água da superfície ou subsuperfície de uma determinada área (Figura 1), buscando a obtenção de produtividades ótimas econômicas, bem como uma integração com todos os componentes envolvidos, tais como solo, cultura, recursos hídricos e meio ambiente.



Figura 1 – Ilustração de área com cultura inundada e consequente comprometimento do desenvolvimento e da produção esperada, como também os efeitos sobre o solo encharcado.

A drenagem e a irrigação (Figura 2) constituem técnicas complementares que visam ao manejo correto e racional do sistema solo-água-planta. Assim, são indispensáveis as inter-relações entre Fisiologia Vegetal, Hidrologia, Física de Solos, Hidráulica, Meteorologia, Climatologia, Economia, Tecnologia da Informação, dentre outros.



Figura 2 – Ilustração de irrigação e estrutura de drenagem associada para escoamento e eliminação do excesso de água por drenos no entorno da área.

O uso e o desenvolvimento da drenagem remontam a civilizações antigas anteriores, com registros de aproximadamente 3.000 a.C. em vales de rios na Mesopotâmia, China e Egito, cultivados com trigo, algodão e outras culturas, quando das cheias dos cursos d'água.

Existem evidências da drenagem na antiguidade, dada a preocupação com a salinidade e controle do lençol freático para melhor manejo de práticas de cultivo e com isso o aumento da produção para a população crescente. O controle de cheias e a lixiviação de saís favoreciam a expansão de áreas de produção. Há registros mais próximos à nossa civilização, de ampliação de áreas de produção agrícola devido à drenagem, na América do Norte, no Japão e no Peru.

02 Objetivos da drenagem

02. Objetivos da drenagem

Em uma área destinada à exploração agrícola é necessário que, fundamentalmente, o solo possua um teor de água adequado à germinação e ao desenvolvimento das culturas. Desta forma, é importante que se estabeleça e se mantenha um ótimo equilíbrio da relação água-oxigênio-sais na zona radicular, visando oferecer condições ideais para as culturas.
A drenagem agrícola se constitui numa técnica que alcança a engenharia aplicada à agricultura, com bases teóricas e aplicadas associadas às experiências e conhecimentos de produção de culturas.

Os objetivos principais da drenagem agrícola podem ser descritos de forma resumida:

- **Garantir a aeração das raízes** – facilitar a difusão do oxigênio da atmosfera para a zona radicular;
- **Garantir trafegabilidade** – permitir o uso de máquinas e implementos (Figura 3A) para as operações de preparo e manejo da cultura, colheita e outras;
- **Controle da erosão** – facilitar a infiltração ou remoção da água da superfície (Figura 3B) com perda mínima de solo;
- **Controle da salinidade** – evitar/controlar o fluxo ascendente do lençol freático para a zona radicular e o excesso de sais do solo e da água de irrigação.

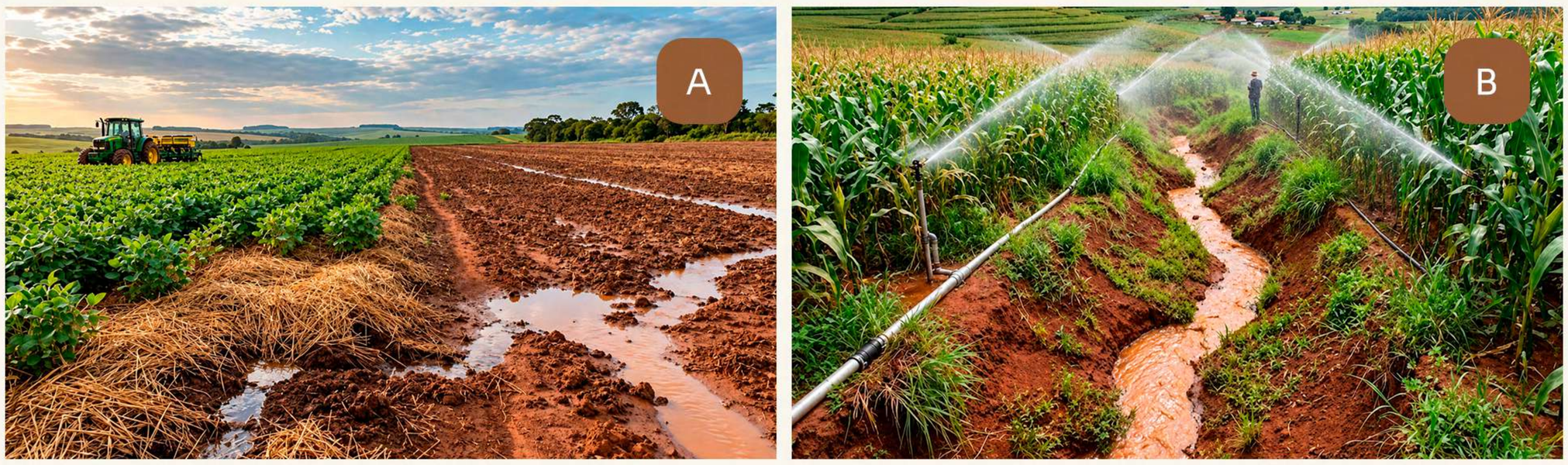


Figura 3 – Ilustração de excesso de água na superfície do solo dificultando o tráfego de máquinas e implementos (A), e ocorrência de erosão do solo devido ao escoamento superficial excessivo de água no terreno (B).

O aumento crescente de áreas irrigadas para atender às demandas de alimentos devido ao aumento da população, exige cada vez mais a adoção de tecnologias de conservação do solo, minimizando os desequilíbrios decorrentes do manejo inadequado de sistemas de produção.
Muitos projetos de irrigação, públicos e privados, fracassaram por causa da ausência da drenagem. Isso ocorreu em distintas regiões do Brasil, com resultados que geraram um grande passivo ambiental de difícil recuperação ou reabilitação para uma produção minimamente sustentável.

Investir em drenagem associada a um projeto de irrigação é uma condição essencial para a economia de água, manejo adequado e segurança para produção e rentabilidade mais previsível e planejada. Em alguns casos, solos que se aparentavam impróprios por serem encharcados ou alagados, passam a oferecer melhores condições físicas, químicas e biológicas para o desenvolvimento saudável das plantas.

2.1 Drenagem adequada

Drenagem adequada é a drenagem necessária para a remoção do excesso de água e assim manter uma agricultura rentável e permanente na área. Isto não implica numa drenagem completa e perfeita, uma vez que o aspecto econômico tem que ser considerado.
A drenagem pode ocorrer de acordo com as condições do meio, sejam naturais ou alteradas, para seguir e atender os objetivos definidos e propósitos esperados:

- **Drenagem Natural** – é aquela em que o solo em suas condições naturais tem capacidade para escoar a água que atinge a área, proveniente do escoamento superficial e subsuperficial de áreas altas, subpressões artesianas, transbordamentos de rios, excessos de água de irrigações e infiltrações provenientes de canais, mantendo o solo em condições adequadas de aeração para as culturas instaladas (Figura 4).



Figura 4 – Ilustração de área de produção em terreno de baixa declividade e capacidade de drenagem natural limitada.

- **Drenagem Artificial** – é aquela que é necessária quando a drenagem natural não é suficiente para eliminar os excessos de água. Desta forma, a drenagem artificial visa complementar a diferença entre a drenagem natural e a drenagem necessária ou adequada. Portanto, ela se faz necessária quando a capacidade natural de escoamento ou remoção do excesso não for suficiente para melhorar as condições de aeração, umidade, atividade microbiana, estruturação do meio e níveis de saís, ideais para o desenvolvimento e potencial da cultura. No caso da drenagem artificial, vários aspectos devem ser estudados e avaliados no que se refere à demanda de investimento.

  A adoção da drenagem em áreas agrícolas requer um criterioso estudo e ordenamento das condições locais necessárias para implantação, de forma a atender aos objetivos, interferindo minimamente e respeitando o meio ambiente.

  Os custos de implantação e manutenção são variáveis determinantes, visto as condições de solo e a contribuição de água (irrigação, precipitação, etc.), remetendo à observação dos critérios e estudos hidrológicos regionais.

  Para a drenagem artificial é indispensável o planejamento do projeto que garanta o uso sustentável do solo na área a ser manipulada, de forma que as características físicas e químicas do solo sejam preservadas, possibilitando maiores e melhores níveis de produtividade. Quando for o caso, os impactos sobre o ambiente no contexto da bacia hidrográfica devem ser mínimos, dentro dos limites aceitáveis (Figura 5).



Figura 5 – Ilustração de área de produção com a instalação de drenagem artificial para escoamento do excesso de água, compondo drenagem superficial e subterrânea.

2.2 Drenagem deficiente e propriedades do solo

A deficiência de drenagem é caracterizada pelo excesso de água no solo decorrente, geralmente, de precipitações e/ou elevadas lâminas aplicadas por sistemas de irrigação. Várias propriedades físicas do solo podem ficar comprometidas pelo excesso de água (solos encharcados).

Aeração

Aeração é o processo pelo qual gases consumidos ou produzidos dentro do perfil do solo são permutados pelos gases da atmosfera externa, sendo assim um processo dinâmico. A troca de gases se dá por meio de dois mecanismos: difusão (movimento dos gases em resposta ao gradiente de pressão parcial ou do gradiente de concentração dos gases) e fluxo de massa (movimento dos gases em resposta ao gradiente de pressão total dos gases).

Em solos com deficiência de drenagem, situação que se aproxima da saturação hídrica, a taxa de difusão do oxigênio no solo tende a diminuir, comprometendo a difusão do oxigênio da atmosfera externa para a zona radicular. A diminuição da aeração provoca impermeabilização da parede celular das raízes, reduzindo a absorção e transporte de íons e síntese de compostos orgânicos, assim como a saída de CO_2, comprometendo as raízes, dentre outros.

Estrutura

Dentre as características físicas do solo mais importantes relacionadas ao uso e manejo, está a estrutura, a qual resulta da agregação das partículas primárias do solo (areia, silte e argila) com outros componentes minerais e orgânicos. O agrupamento dos agregados do solo, organizados numa forma geométrica definida, constitui a estrutura do solo.

A drenagem deficiente pode alterar a estrutura do solo devido à compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas e animais, redução da quantidade de matéria orgânica devido ao menor desenvolvimento do sistema radicular das plantas e à salinização/sodificação do solo.

Textura

A textura tem grande influência no comportamento físico-hídrico e químico do solo, e por isso, sua avaliação é essencial para o uso e manejo dos solos utilizados para a agricultura. É expressa pela proporção dos componentes granulométricos da fase mineral do solo, areia, silte e argila.

As áreas com problemas de drenagem têm maior predominância de silte e argila em decorrência das deposições nas estações chuvosas ou contínuas lâminas elevadas de irrigação pela falta de manejo e controle operacional dos sistemas.

Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade de um solo permitir ou dificultar a passagem de água através dos seus poros. É um atributo físico importante que indica a qualidade do solo e a facilidade com que a água se movimenta no meio.

A permeabilidade do solo depende, dentre outros fatores, da quantidade, da continuidade e do tamanho de poros, sendo a compactação e a descontinuidade dos poros responsáveis pela redução significativa da permeabilidade do solo.

Em áreas bem drenadas, a variação da umidade provoca “fissuras” no solo, maior profundidade do sistema radicular, como também maior atividade microbiana e, como consequência, maior permeabilidade.

Temperatura

A temperatura do solo é fundamental para as plantas nos processos de germinação e desenvolvimento de raízes, sendo um indicador importante para o manejo agrícola e a manutenção da saúde do solo. Essa propriedade é influenciada pela radiação solar, tipo de solo, cobertura vegetal e umidade.

Em solos com deficiência de drenagem (encharcados) ocorre o aquecimento retardado em função dos seguintes fatores:

- ✔ O calor específico da água é cinco vezes maior do que da matriz seca do solo. Consequentemente, para uma mesma radiação solar incidente, o solo saturado com água demora mais a aquecer que um solo seco.
- ✔ A condutividade térmica da água é maior que a do solo seco. Em consequência, o aquecimento superficial durante o dia é rapidamente propagado para as camadas inferiores do solo durante a noite, reduzindo a sua temperatura; e
- ✔ Em decorrência da evaporação superficial em solos úmidos, a água é facilmente desprendida da matriz, necessitando, portanto, de menor aquecimento do solo para a retirada de água.

2.3 Drenagem deficiente e desenvolvimento das culturas

O desenvolvimento das culturas decorre de vários fatores: físico, biológico, climático, fisiológico, genético, nutricional, dentre os outros. Não menos relevante, a disponibilidade de água em déficit ou excesso contribui para processos e etapas importantes e indispensáveis para as plantas potencializarem a capacidade de desenvolvimento e produção.

A drenagem deficiente é uma ocorrência não desejável para o desenvolvimento das culturas, com várias consequências que podem inviabilizar os resultados esperados e comprometer a atividade agrícola.

Sustentação das plantas

Locais com lençol freático elevado (próximo da superfície) fazem com que as culturas tenham sistema radicular raso, ficando sujeitas ao tombamento. Além disto, como o volume do solo ocupado pela planta é pequeno, ocorre com muita rapidez o déficit hídrico por ocasião de um veranico.

Síntese de hormônios e matéria orgânica

Alguns hormônios de crescimento são sintetizados pelas células dos tecidos do sistema radicular. Com drenagem deficiente os hormônios não são produzidos ou são produzidos insuficientemente.

Absorção de água

O excesso de água no solo causa deficiência na aeração e reduz indiretamente a absorção de água em virtude da diminuição do sistema radicular. Há decréscimo da permeabilidade das raízes. Reduz a absorção de água e há aumento da concentração de CO_2 devido a deficiência de O_2, provocando endurecimento das paredes das raízes e diminuindo a permeabilidade radicular.

Absorção de minerais

Tanto a acumulação de sais no vacúolo das células da raiz quanto o seu transporte para a parte aérea (xilema), consomem energia que é liberada na respiração aeróbica. Portanto, a absorção e o transporte de nutrientes ficam altamente comprometidos quando a aeração do solo é deficiente e há baixa disponibilidade de oxigênio disponível para respiração. Além disto, a maior concentração de CO_2 reduz a permeabilidade dos tecidos da raiz, reduzindo a absorção de minerais e a disponibilidade de alguns nutrientes.

2.4 Consequências da deficiência de drenagem

Várias consequências podem ser observadas em decorrência da drenagem deficiente, que de forma geral promove o desequilíbrio das relações “água – oxigênio – íons” na zona radicular das plantas (Figura 6).

As relações físico-hídricas do solo podem ser alteradas para condições extremas e irreversíveis de uso para produção agrícola devido à drenagem deficiente.

A alteração das relações hídricas do solo refere-se às modificações na capacidade do solo de absorver, armazenar, transmitir e liberar água. Isso pode ocorrer por fatores naturais e pelas atividades humanas relacionadas ao manejo inadequado do solo, entre outros fatores. Essas mudanças podem impactar diretamente a disponibilidade de água para plantas e com isso a produção esperada.

A drenagem tem fundamental importância no equilíbrio de fatores que favorecem a preservação do estado físico, hídrico e químico do meio de produção, de forma a sustentar socioeconomicamente a atividade agrícola.

As principais consequências da deficiência de drenagem no contexto da conservação dos elementos do meio produtivo estão descritas a seguir. Elas dizem respeito às perdas de produtividade, qualidade das culturas, impactos ambientais e à desvalorização da terra.



Figura 6 – Ilustração dos componentes de um solo ideal, com as melhores proporções possíveis, sem os riscos de comprometimento das relações hídricas desejáveis.

Redução da concentração de nitrogênio no solo

Em geral, solos mal drenados apresentam-se pobres em nitrogênio devido, principalmente, aos seguintes fatores:

- ✔ Boa parte do aporte de nitrogênio mineral para o solo provém da decomposição da matéria orgânica do solo, processo que se torna extremamente lento quando o solo está saturado de água;
- ✔ As bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico são predominantemente aeróbicas, tendo sua população reduzida quando há encharcamento.
- ✔ O nitrato passa à nitrogênio gasoso na ausência de oxigênio.

Íons tóxicos solúveis no solo

A umidade excessiva do solo, ao tornar o ambiente anaeróbico (ausência de oxigênio), promove o surgimento e o aumento de bactérias que utilizam elementos oxidados como receptores de elétrons, causando com isso a sua redução. Como exemplos tem-se o manganês, o ferro e o enxofre, que podem se tornar nocivos às raízes das plantas.

Salinização e sodificação do solo

A salinidade e a sodicidade dos solos podem ser causadas por fatores naturais ou antropogênicos. Na agricultura, especificamente nos sistemas de cultivo irrigados, esses processos são acelerados. Em regiões áridas e semiáridas há maior risco devido à elevação do lençol freático e assim a ascensão dos saís, podendo salinizar e sodificar a superfície do solo (Figura 7).



Figura 7 – Ocorrências de sais no solo e na água em canais de drenagem (A) e salinização/sodificação do solo (https://eos.com/pt/blog/salinizacao-do-solo) comprometendo o desenvolvimento de culturas (B).

Confinamento do sistema radicular

A umidade excessiva decorrente da elevação do lençol freático faz com que as raízes explorem uma menor profundidade do solo. Com isso, pode ocorrer tombamento da planta pela ação do vento. Com reduzido alcance, em situações de veranico, as raízes não conseguem o suprimento de água em maiores profundidades (Figura 8).

A redução do excesso de água favorece melhor aeração devido à maior profundidade explorada pelo sistema radicular das plantas.

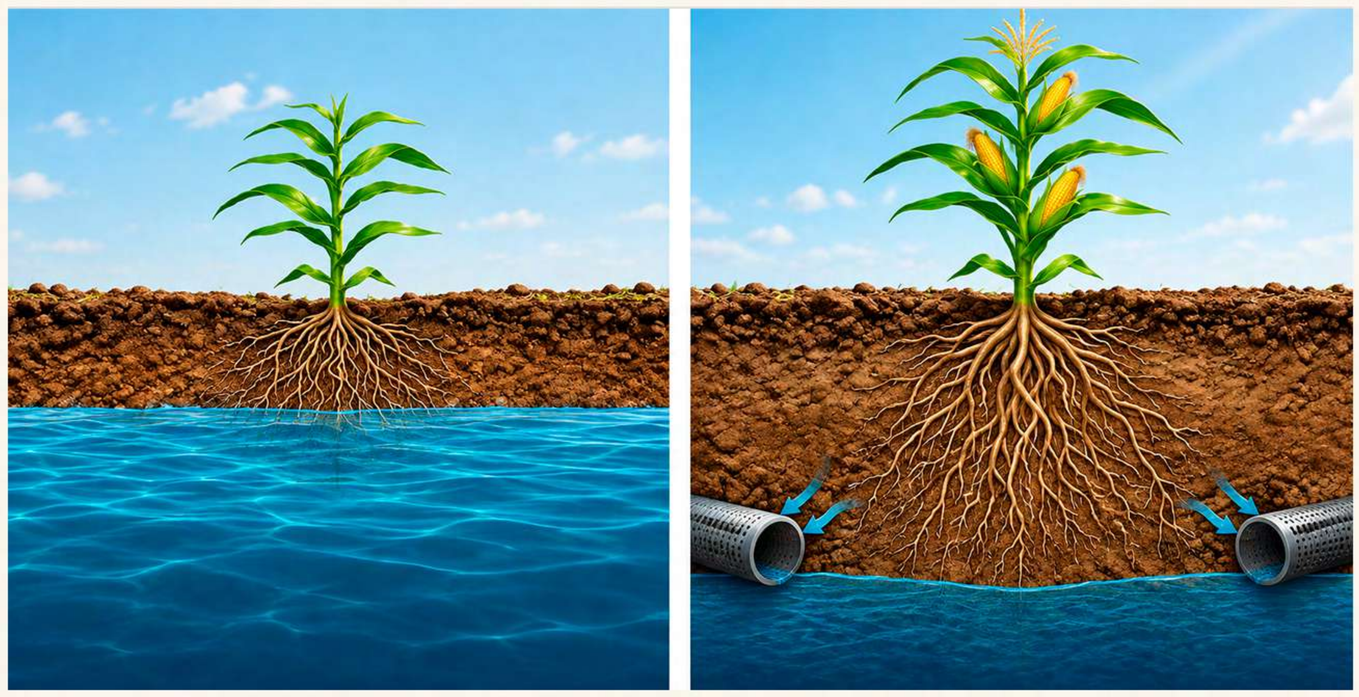


Figura 8 – Ilustrações do efeito da profundidade do lençol freático no perfil do solo provocando restrição ou confinamento do sistema radicular da cultura (adaptado de https://www.canr.msu.edu/agriculture/).

Problemas fitossanitários (doenças)

A umidade elevada do solo facilita o desenvolvimento de fungos, bactérias e outros patógenos causadores de muitas doenças em plantas.

Solos encharcados causam estresse no sistema radicular da planta, afetando a absorção de água e nutrientes, e tornando a planta mais vulnerável a ataques de doenças.

Muitas culturas não resistem ao excesso de umidade na zona radicular por ocorrência de doenças causadas por esse excesso (Figura 9).



Figura 9 – Registro da ocorrência do mofo branco no feijoeiro, resultado de excesso de umidade (lençol freático próximo ao sistema radicular) afetando o desenvolvimento saudável da planta com restrições na absorção de água e nutrientes (https://rehagro.com.br/blog/mofo-branco-no-feijoeiro/).

2.5 Benefícios da drenagem

Inúmeros benefícios podem ser observados na agricultura com a adoção de técnicas e operações para a drenagem (remoção) do excesso de água. A redução e o controle da umidade no solo pela drenagem criam um ambiente propício à cultura, uma vez que se evita o encharcamento e a salinização, com melhorias para a aeração e para a própria estrutura do solo, favorecendo o desenvolvimento das raízes e a assimilação de nutrientes. Há redução de perdas por doenças, maior produtividade, viabilidade econômica e cultivo em áreas anteriormente inundadas (encharcadas), o que também são benefícios da drenagem agrícola.

Configuram, portanto, benefícios da drenagem:

- ✔ Conservação do solo e da água;
- ✔ Incorporação de novas áreas à produção agrícola;
- ✔ Aumento da produtividade agrícola;
- ✔ Controle da salinidade;
- ✔ Recuperação de solos salinos e/ou sódicos;
- ✔ Saneamento de áreas inundadas;
- ✔ Melhoria dos indicadores econômicos.

2.6 Drenagem em regiões úmidas, áridas e semiáridas

Regiões úmidas e subúmidas

A drenagem em regiões úmidas e subúmidas se torna importante para remover o excesso de água do solo e da superfície, essencial para a agricultura em áreas encharcadas, e proporcionando prevenção de problemas como enchentes e salinização do solo.

Portanto, a drenagem em regiões úmidas/subúmidas promove:

- ✔ Controle do nível do lençol freático por meio da eliminação do excesso de água na superfície e no perfil do solo;
- ✔ Garantia das condições favoráveis de aeração, possibilitando, assim, o desenvolvimento adequado das culturas.

As técnicas envolvem sistemas de drenagem superficial (valas e canais) para águas superficiais e sistemas subterrâneos (tubulações, drenos tubulares) para lençol freático elevado.

Regiões áridas e semiáridas

Regiões áridas e semiáridas, caracterizadas pela baixa contribuição pluvial, altas temperatura e elevadas, evapotranspiração, potencializam a ocorrência da ascensão e concentração de sais na superfície do solo. Essas condições prejudicam o desenvolvimento das culturas e a sustentabilidade agrícola, com baixa produtividade e reduzida viabilidade econômica.

Quando do uso de sistemas de irrigação com lâminas excessivas, sem o devido controle da profundidade do lençol freático, pode ocorrer a ascensão de sais para o sistema radicular das culturas, com as consequências esperadas de comprometimento do desenvolvimento das plantas.

Portanto, a drenagem em regiões áridas e semiáridas promove:

- ✔ Manutenção do equilíbrio salino do solo, por meio da lixiviação do excesso de sais.
- ✔ Redução ou eliminação da ascensão capilar de sais no perfil do solo, alcançando a zona do sistema radicular.

Para tanto são planejados e dimensionados sistemas de drenagem superficial (valas, canais) para águas superficiais e sistemas subterrâneos (tubulações, drenos tubulares) para controlar o lençol freático.

2.7 Tipo de drenagem

Drenagem superficial

A drenagem superficial tem como principal finalidade a remoção do excesso de água da superfície do solo, evitando problemas de aeração consequentes do empoçamento da água de precipitação (chuva) ou aplicação por irrigação (Figura 10).

Em áreas declivosas, a drenagem superficial pode ser importante para a conservação do solo por meio da instalação de terraços e canais, contribuindo para a remoção de água e sais do solo, de acordo com as condições da área, solo e cultura.



Figura 10 – Ilustração de área de produção com estrutura de drenagem superficial para escoamento e eliminação do excesso de água do solo.

Drenagem subterrânea

A drenagem subterrânea, também chamada de drenagem do solo, consiste na remoção do excesso de água do perfil do solo, ou seja, da camada do solo onde se desenvolvem as raízes das plantas, por meio do rebaixamento do lençol freático (Figura 11).

Como resultado esperado da drenagem subterrânea, tem-se a melhoria e manutenção das condições físico-hídrica no perfil do solo, bem como o controle da ascensão dos saís dissolvidos na água ao manter o lençol freático mais distante da superfície do solo, evitando umidade excessiva na profundidade do sistema radicular.



Figura 11 – Ilustração de drenagem subterrânea com drenos instalados para remoção do excesso de água no perfil do solo.

2.8 Profundidade do lençol freático

O lençol freático é a camada (nível) superior das águas subterrâneas em relação à superfície do terreno, sendo abastecido pelas águas das chuvas e irrigação, dentre outras causas (Figura 12).

A irrigação excessiva é, portanto, uma fonte de contribuição de água, influenciando a elevação do nível para superfície, podendo provocar limitações para o desenvolvimento das culturas.

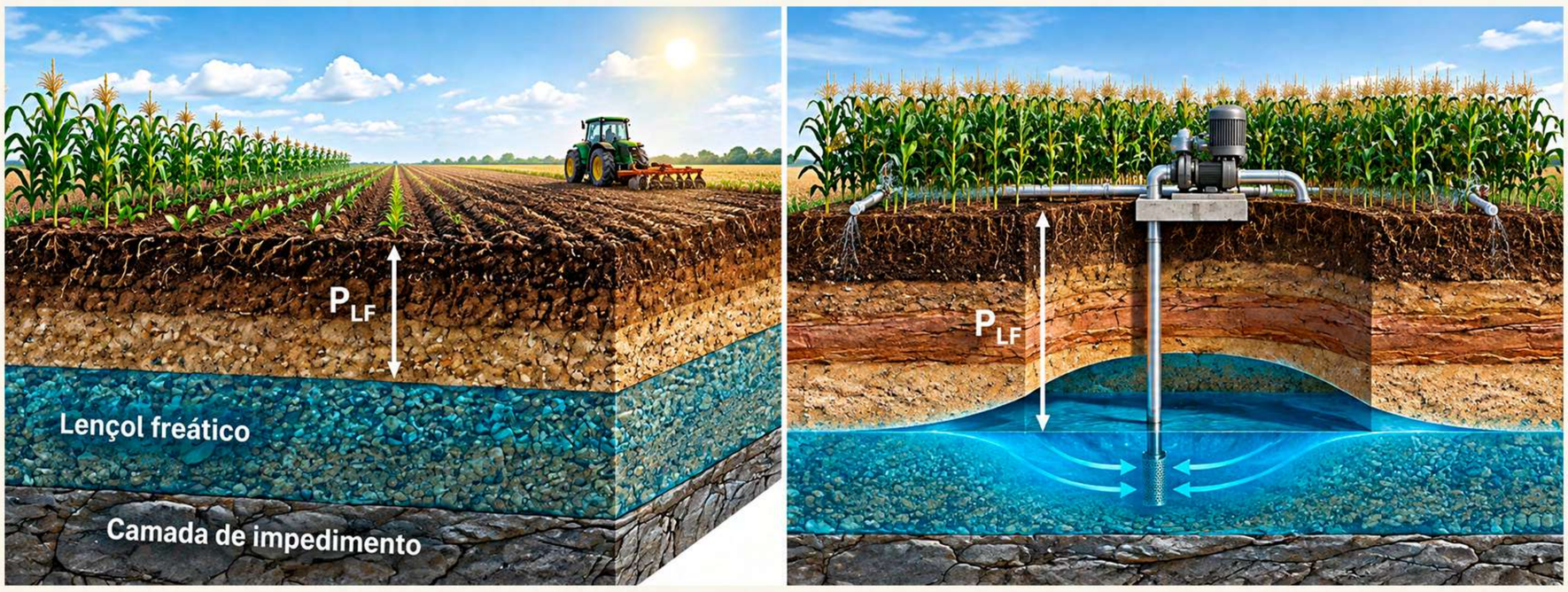


Figura 12 – Ilustração sobre a profundidade do lençol freático (P_{lf}).

A profundidade ótima do lençol freático depende de vários fatores, dentre eles:

- ✔ Profundidade do solo até a camada de impedimento;
- ✔ Capacidade de retenção de água;
- ✔ Profundidade do sistema radicular da cultura;
- ✔ Frequência e quantidade de chuva ou irrigação;
- ✔ Transmissividade do solo.

A profundidade adequada para drenagem do solo não é aquela que resulta em máxima produtividade da cultura, mais sim, aquela que maximize a relação custo/benefício.

Em projetos de drenagem, a definição da profundidade dos drenos é fundamental, uma vez que está associada ao espaçamento entre drenos na área.

Para melhor aproximar do valor correto da profundidade do lençol freático (LF), deve-se considerar duas situações distintas:

- ✔ Áreas em que parte das necessidades hídricas das culturas é satisfeita pela ascensão capilar. Neste caso, uma profundidade excessiva do lençol pode provocar déficit hídrico na zona radicular.
- ✔ Áreas que não utilizam água de ascensão capilar, mesmo existindo uma certa deficiência hídrica, pois a contribuição da água do lençol freático seria prejudicial, em virtude do acúmulo de sais na zona radicular.

A definição da profundidade do lençol freático, para efeito de projeto, é dependente de características do solo, da planta a ser cultivada, do regime de escoamento e de critérios de drenagem a serem estabelecidos pelo projetista (Tabela 11).

Tabela 1 – Profundidade recomendada para o lençol freático em função da cultura e da característica do solo.

Culturas	Prof. do LF (cm)
Pastagens	60 - 80
Solos de textura fina	40 - 60
Solos arenosos	50 - 80
Hortaliças	90 - 120
Cultivos extensivos	150 - 250

Valores de referência para a profundidade do lençol freático de acordo com a cultura e características do solo, podem orientar inicialmente o desenvolvimento de projetos de drenagem. No entanto, estudos locais devem ser conduzidos para melhor e mais confiáveis informações para o projeto.

As máximas produtividades das culturas estão associadas a uma profundidade adequada do lençol freático, e tal profundidade ótima depende do tipo de solo, tipo de cultura, clima e irrigação (Tabela 2).

A profundidade do lençol freático é um importante indicador do excesso de umidade no perfil do solo explorado pelas raízes da planta, portanto, com influência do rendimento dos cultivos de acordo com a profundidade observada.

Tabela 2 – Profundidade estimada do lençol freático em função da cultura e do rendimento relativo das culturas.

Culturas	Prof. do LF (cm)				
	40	60	90	120	150
	Rendimento relativo (%)				
Feijão	39,7	90,2	98,9	99,0	100,0
Trigo (inverno)	73,4	72,7	83,6	100,0	84,6
Beterraba	83,9	92,3	98,3	100,0	99,7
Batata	89,6	100,0	94,0	92,3	95,4

A duração do excesso de umidade decorrente da profundidade do lençol freático resulta em danos muitas vezes não reversíveis.

Referências de estimativas dos danos às culturas em função da duração do excesso de umidade do solo, devem ser consultadas (Tabela 3).

A disponibilidade e o transporte de íons às raízes é um processo que envolve todas as condições de fluxo no perfil do solo, dentre outros vários fatores, que depende das condições de umidade e, portanto, da profundidade do lençol freático, a qual regula a magnitude da umidade no perfil do solo.

A profundidade do lençol freático tem efeito na magnitude das perdas de nutrientes por percolação.

Há que se considerar que a queda na absorção de íons em decorrência da profundidade do lençol freático tem consequências diretas no desenvolvimento e rendimento das culturas (Figura 13).

Tabela 3 – Redução do rendimento em função do tempo (dias) de inundação das culturas

Culturas	Dias de inundação			
	3	7	11	15
	Danos produzidos (%)			
Forrageiras perenes	10	25	55	85
Milho	13	57	85	100
Girassol	10	28	50	72
Batata	42	84	100	100

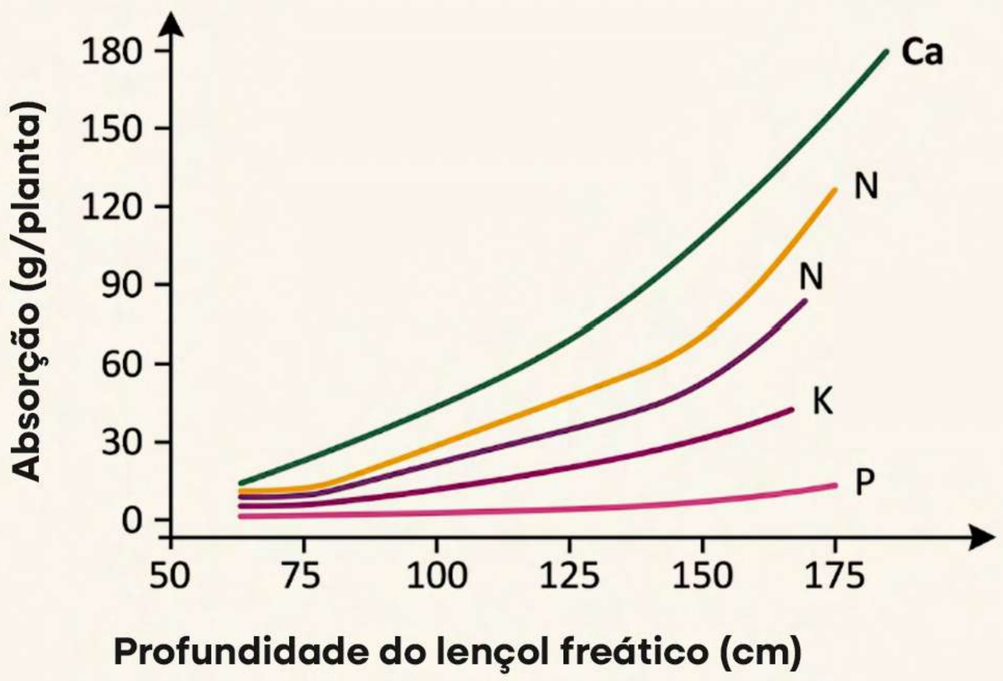


Figura 13 – Ilustração da capacidade de absorção de nutrientes pelas plantas em função da umidade do perfil do solo devido à profundidade do lençol freático.

Profundidade econômica dos drenos

A profundidade econômica dos drenos é a profundidade ideal que minimiza os custos totais de instalação e manutenção para um determinado sistema de drenagem, resultando em um benefício econômico otimizado ao longo do tempo. Essa profundidade depende de fatores como o tipo de solo, o espaçamento entre os drenos, o custo dos materiais e mão-de-obra e a quantidade de água a ser escoada.

Quanto maior a profundidade dos drenos, maior será seu espaçamento no terreno, gerando economia pelo menor número de drenos no campo.

Essa economia é limitada até profundidades de 2 a 2,5 m, pois a partir daí o aumento dos custos de escavação não é compensado pela economia de material resultante do aumento no espaçamento (Figura 14). Poucas máquinas abrem valas e assentam drenos em profundidades superiores a 2,5 m.

Dentro de certos limites, o aumento da profundidade do lençol freático (afastando-se da superfície e reduzindo o risco de encharcamento das raízes) favorece o desenvolvimento radicular e, consequentemente, aumenta o rendimento da cultura. Há uma profundidade inviável economicamente para operação de escavação das máquinas e elevados custos.

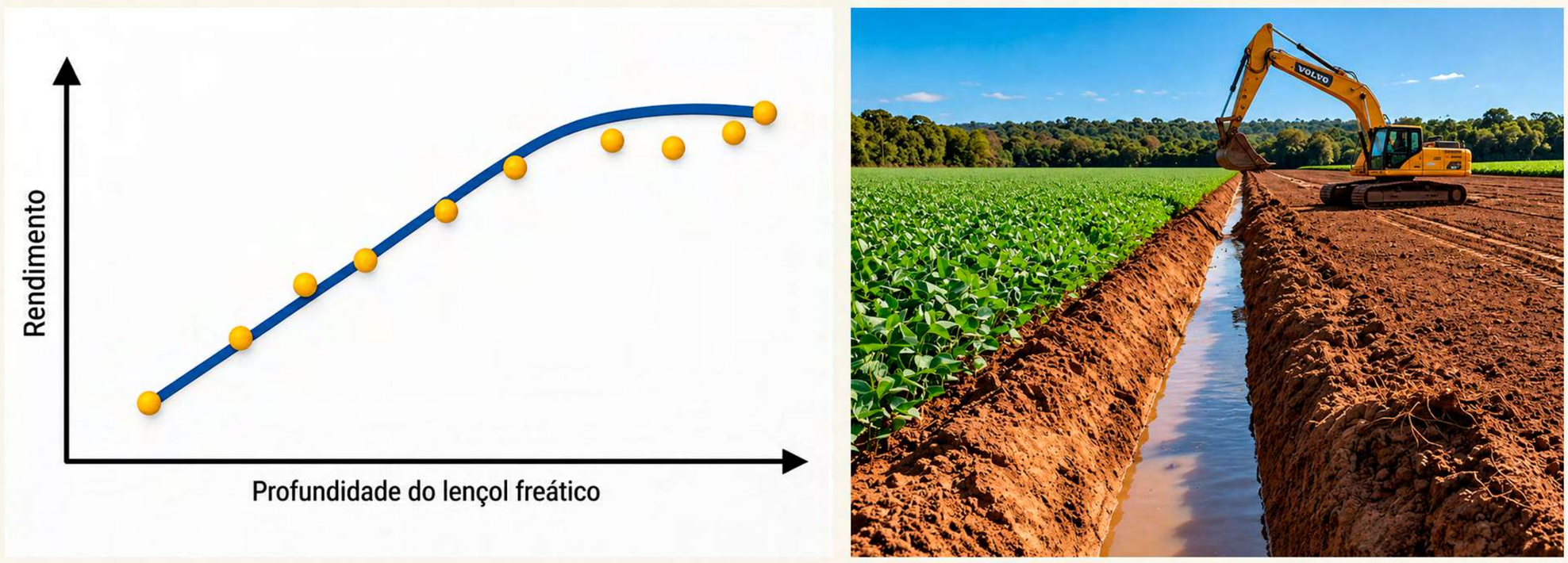


Figura 14 – Rendimento da cultura em função da profundidade do lençol freático, uma vez que se evita o excesso de água na profundidade das raízes.

2.9 Práticas agrícolas em solos com deficiência de drenagem

Algumas medidas e práticas podem ser adotadas em situações de exploração de solo com deficiência de drenagem, em menor escala de intervenção na área.

- ✔ Seleção adequada de culturas/cultivares;
- ✔ Se a água do lençol freático não for salobra, estudar a possibilidade de se reduzir a água de irrigação e compensar parte das necessidades hídricas da cultura com água de ascensão capilar;
- ✔ Não executar práticas culturais com uma umidade excessiva do solo, pois o uso de máquinas além de deteriorar a sua estrutura, promove grandes sulcos no terreno que favorecem a retenção de água na superfície;

- Adoção de manejo do solo em função da declividade do terreno, minimizando a ocorrência de empoçamento ou acúmulo de água na superfície por maior tempo; e

- Utilização da prática da subsolagem, melhorando assim as condições de aeração como também de drenagem.

03 Necessidade de drenagem

03. Necessidade de drenagem

O sucesso da drenagem artificial do solo depende do diagnóstico correto do problema existente ou de estudos mais detalhados a fim de determinar a fonte de excesso de água que atinge a área.

Para esse diagnóstico e para tomar a decisão pela necessidade de drenagem, é indispensável:

- ✔ Levantamento topográfico;
- ✔ Caracterização física do solo e profundidade do lençol freático;
- ✔ Estudos hidrológicos (precipitações intensas/previsão);
- ✔ Estudos sobre o escoamento superficial;
- ✔ Análise do regime dos cursos d'água;
- ✔ Conhecimento da fisiologia vegetal; e
- ✔ Planejamento do uso da terra.

Todas as situações e características de campo, inclusive o histórico de uso e exploração ao longo do tempo, incluindo as possíveis dificuldades progressivas para uma exploração sustentável, compõem instrumentos que também são importantes para a constatação da necessidade de drenagem (superficial e/ou subterrânea).

Para o caso de necessidade de drenagem subterrânea (remoção/controle do excesso de água no perfil do solo), é indispensável a complementação de informações importantes e limitantes para o desenvolvimento de projetos. Por exemplo, estudo da água subterrânea, cuja caracterização é geralmente feita a partir do conhecimento do comportamento de sua superfície livre no perfil do solo, denominada superfície freática, nível freático ou simplesmente lençol freático.

Para drenagem superficial e/ou subterrânea, várias observações podem indicar a necessidade de intervenções no terreno e projetos para a área de exploração.

Identificada a necessidade de drenagem, uma vez que a exploração agrícola pode facilmente ser comprometida com o excesso de água na região radicular das culturas e com isso as consequências técnicas para a produção e inviabilidade econômica, várias informações devem ser avaliadas e estudadas, fornecendo suporte para o desenvolvimento e implantação de um projeto de drenagem.

Cenários (situações)de presença do lençol freático colaboram para definição da drenagem mais apropriada (Figura 15).

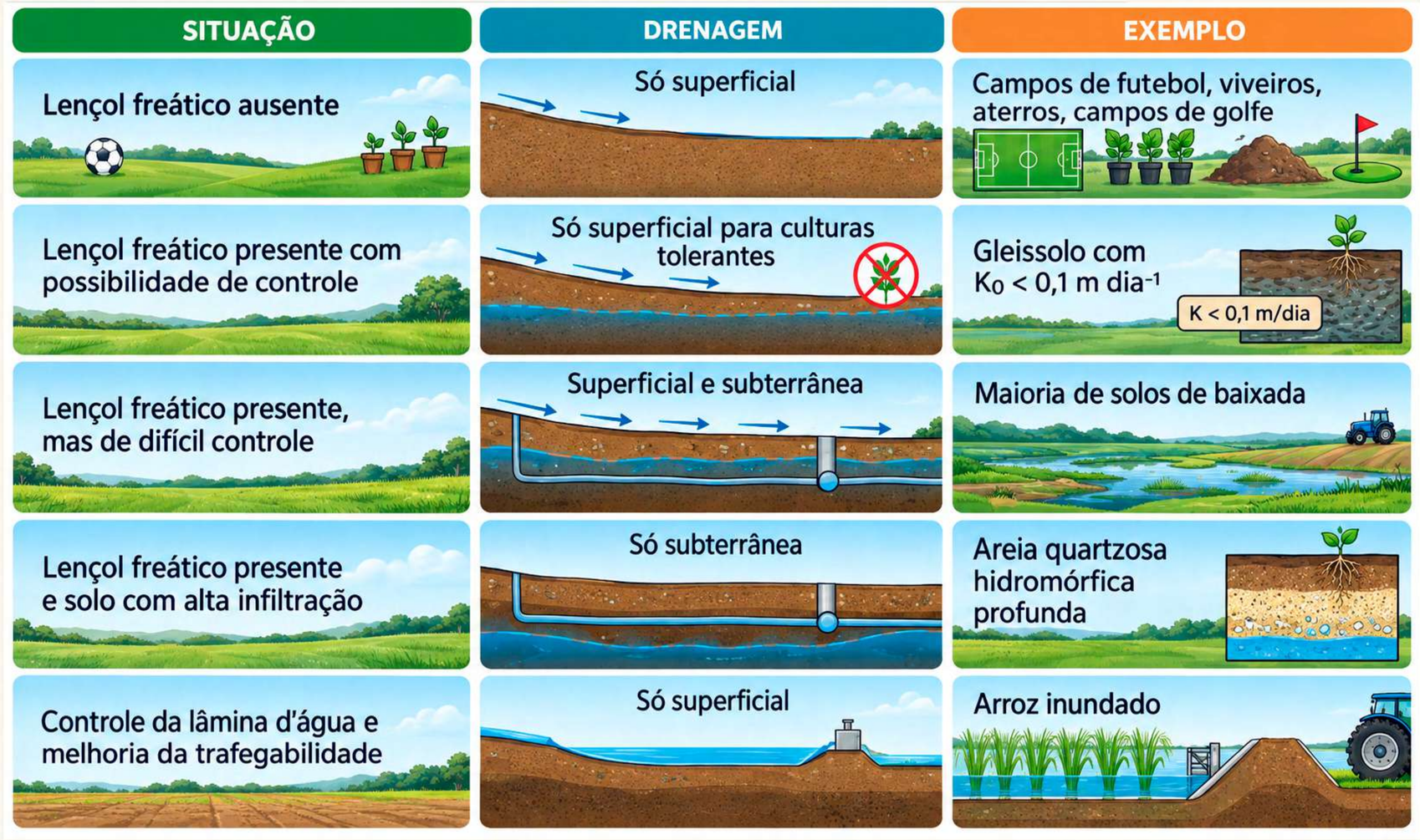


Figura 15 – Cenários (situações) do lençol freático que permitem avaliar a necessidade de drenagem e exemplos de aplicação normalmente adotado (adaptado de Duarte et al., 2023).

3.1 Poços de observação

Os estudos de contribuição e recarga de água para o solo devem constituir importante informação para avalição e diagnóstico da necessidade de drenagem na área a ser explorada. Os poços de observação fornecem dados de profundidade do lençol freático em diferentes pontos e ao longo de períodos, configurando o comportamento das respectivas contribuições e recargas.

Os poços são perfurados com trado manual, revestidos ou não com tubos de 2 polegadas de diâmetro, perfurados ou "ranhurados" de modo a permitir a entrada da água do lençol freático. Devem ser envelopados com tela de material sintético. Recomenda-se deixar uma sobra de tubo (de 0,50 m) a partir da superfície do terreno e usar um tampão na extremidade superior.

A profundidade do LF pode ser medida com uso de uma trena métrica ou a leitura ser feita com uso de instrumentos como um medidor de nível do tipo sonoro (Figura 16).
A instalação de uma bateria de poços de observação, com as leituras das cotas do nível do lençol freático e das coordenadas de cada poço, permite a elaboração de um mapa do lençol freático, conhecido como rede de fluxo.

O mapa das profundidades do lençol freático possibiliza a visualização das seguintes informações:

- ✔ Curvas de nível do lençol freático;
- ✔ Gradientes hidráulicos;
- ✔ Equipotenciais;
- ✔ Direção do fluxo subterrâneo;

- ✔ Regiões de recarga e de descarga; e
- ✔ Estimativa de fluxo subterrâneo.

Todas as informações têm fundamental importância no monitoramento da profundidade do lençol freático e do excesso de umidade na zona radicular das culturas. Os gradientes hidráulicos podem indicar os fluxos de água subterrânea. As regiões de carga e recarga permitem visualizar e identificar as zonas críticas de maior contribuição e descarga no terreno, podendo requerer medidas de controle em diferentes épocas segundo a intensidade de precipitações no decorrer do tempo.

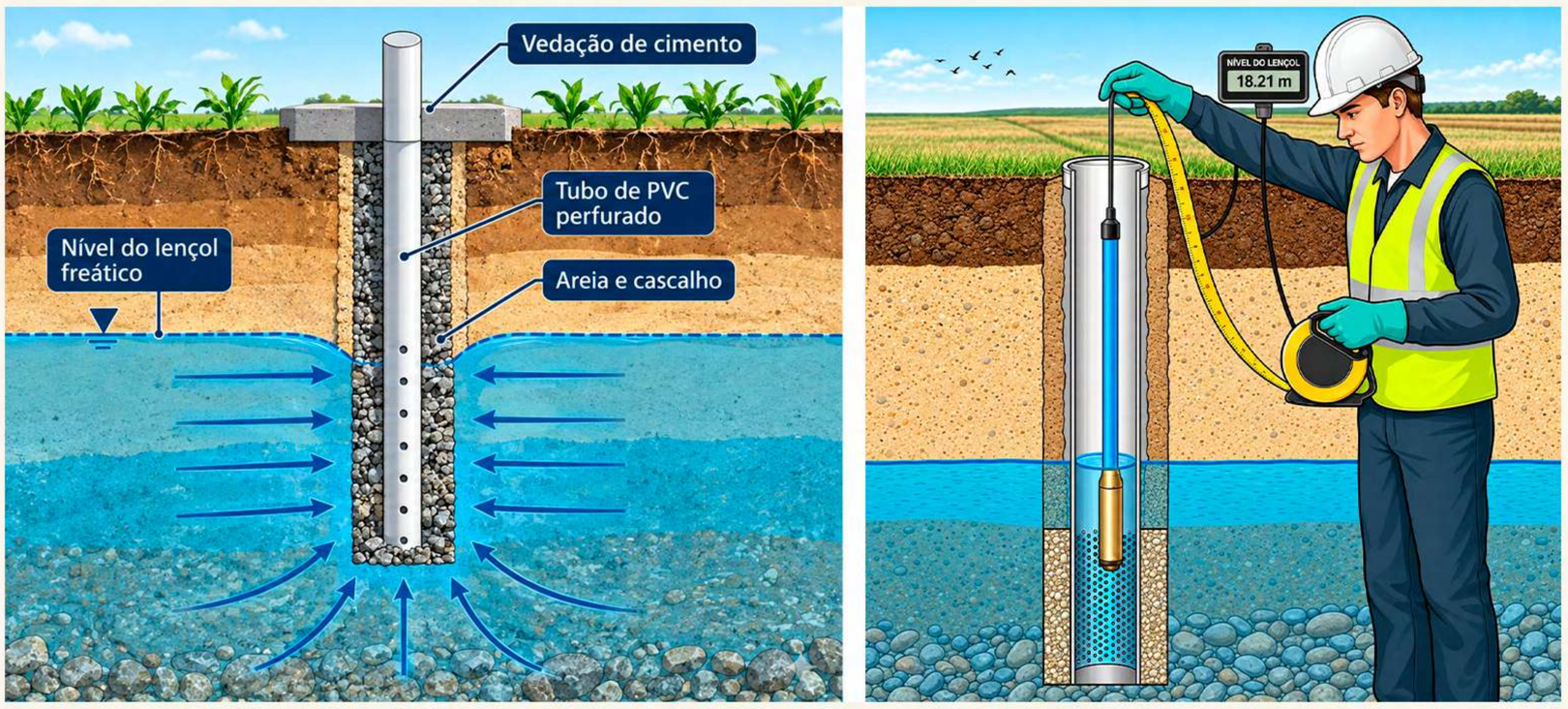


Figura 16 – Ilustrações de poço de observação para medida da profundidade do LF e seu monitoramento em campo.

Mapa das isóbatas

Isóbatas são curvas de igual profundidade de lençol freático em relação à superfície (Figura 17). A partir de uma rede de poços de observação são traçadas essas curvas, oferecendo ao projetista informações importantes, que passa a identificar melhor os problemas de excesso de água no solo com mais severidade. Também podem indicar a provável extensão da malha de drenos necessária para remoção do excesso de água do solo.

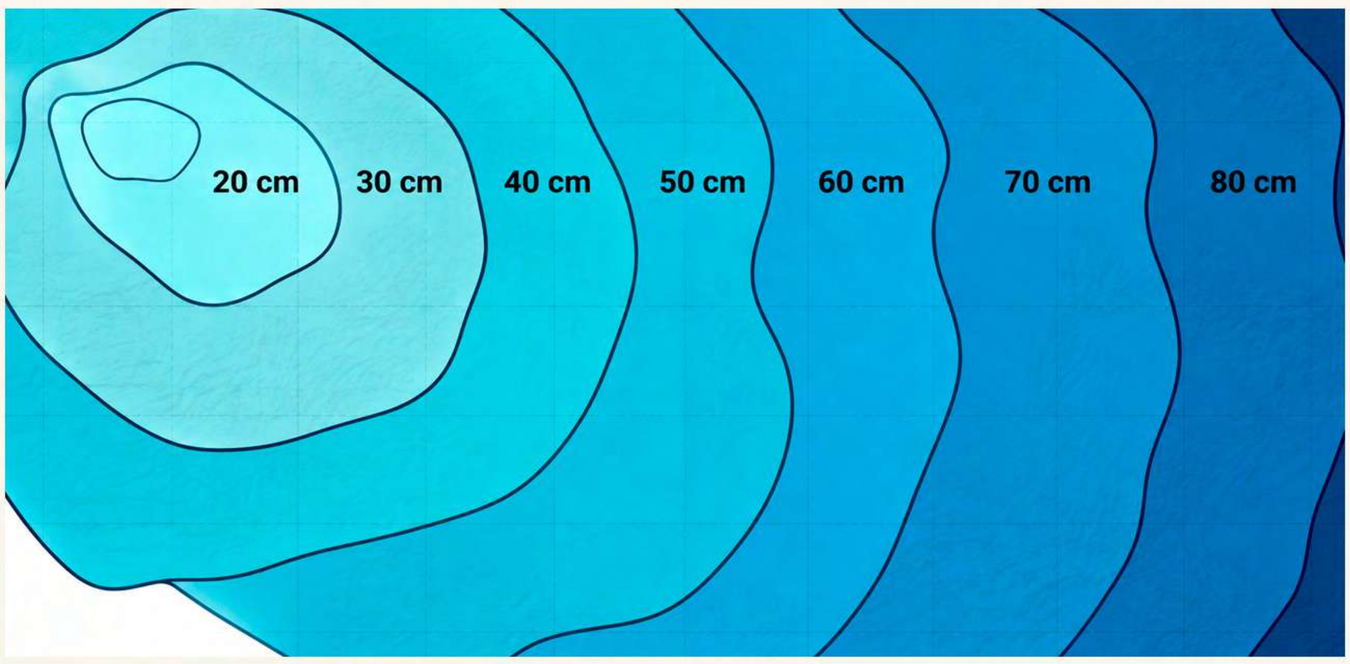


Figura 17 – Ilustrações do mapa de profundidade do LF (Isóbatas), demarcando as profundidades observadas de 20 a 80 cm (adaptado de Duarte et al., 2023).

Mapa das isoípsas

Isoípsas são curvas de nível de igual cota freática. Para obtê-las é necessário levantar todas as cotas nos topos dos poços de observação e subtrair dessas cotas a profundidade do lençol freático medida em cada poço (Figura 18).

Com a identificação da rede de fluxo é possível definir as zonas de recargas que podem ser interceptadas com drenos, bem como permitir a estimativa dos gradientes hidráulicos para quantificar o fluxo de água em cada secção do solo.

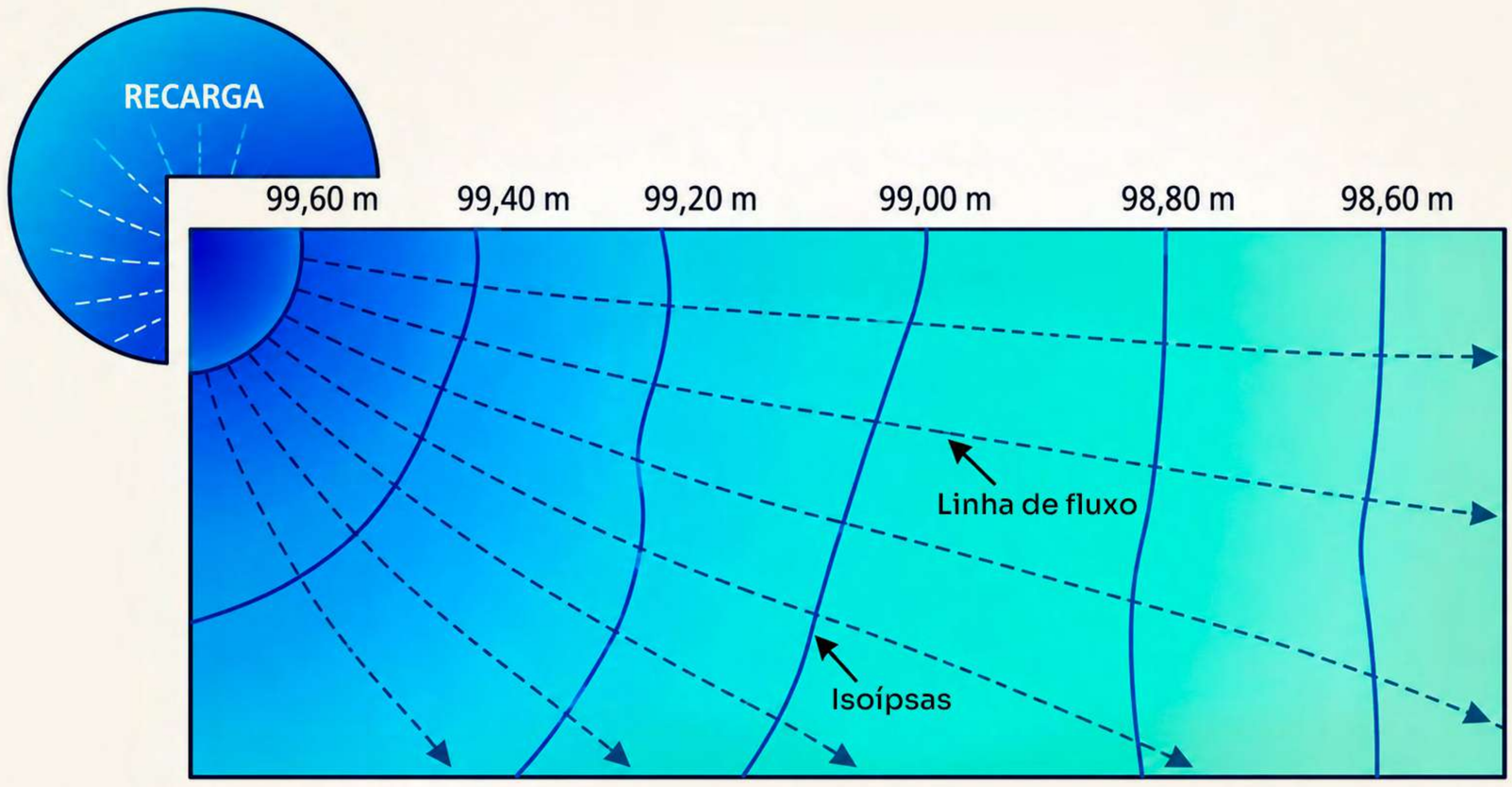


Figura 18 – Ilustrações do mapa de curvas de nível de igual cota freática (Isoípsas), demarcando linhas de fluxo da água no perfil do solo (adaptado de Duarte et al., 2023).

3.2 Características do solo

Quanto das propriedades do solo, duas características são indispensáveis para o estudo e projetos de drenagem agrícola.

- ✔ Porosidade;
- ✔ Condutividade hidráulica.

O movimento da água no solo está fundamentado nas características acima, dentre outras também importantes, seja para o entendimento da dinâmica da água no solo para fins de projeto e manejo da irrigação, seja na definição de técnicas, procedimentos e projetos de engenharia para remoção do excesso de água.

Porosidade total

A porosidade se refere ao volume de vazios do solo, que pode ser ocupado pelas frações de água e/ou ar.

- ✔ O total do volume de poros compreende a contribuição de poros grandes, médios e pequenos calibres e como eles se comportam de modo diferente em relação à água e ao ar. Solos com maior porosidade geralmente têm boa drenagem

Eq.01

$$\alpha = \frac{V_{poros}}{V_t} = \left(1 - \frac{d_s}{d_p}\right) 100$$

α – porosidade total, %;
V_{poros} – volume de poros do solo, cm^{-3};
V_t – volume total de solo, cm^{-3};
ds – densidade do solo, g cm^{-3}; e
dp – densidade de partículas, g cm^{-3}.

Porosidade drenável

A porosidade drenável ou porosidade efetiva é um parâmetro hidrodinâmico do solo de grande importância para fins de dimensionamento de sistemas de drenagem subterrânea. Representa os poros de um solo que não conseguem reter água contra a força da gravidade.

- ✔ Corresponde ao volume de poros drenados por unidade de volume de um solo previamente saturado, quando o teor de água reduz de uma condição de potencial matricial (Ψm) nulo (solo saturado) para um potencial matricial (Ψm) de -60 a -100 cca (- 0,06 a - 0,1 atm.).

Eq.02

$$\alpha' = \theta_{sat} - \theta_{d}$$

α' – porosidade drenável, %;
θ_{sat} – umidade volumétrica do solo na saturação, %;
θ_{d} – umidade volumétrica do solo após a drenagem, %.

Uma estimativa aproximada, aceita pela ABNT, consiste na diferença entre o conteúdo de água na saturação (portanto, igual a porosidade total) e a capacidade de campo (θ_{cc}).

Eq.03

$$\alpha' = \theta_{sat} - \theta_{cc}$$

Outra opção é a utilização da equação empírica que relaciona o valor da condutividade hidráulica do solo saturado (Ko, cm h-1) com o valor da porosidade efetiva do solo (α', %).

Eq.04

$$\alpha' = \sqrt{K_o}$$

Essa última equação se baseia no fato de que quanto mais grossa a textura do solo, maiores os valores de Ko e α'.

Valores de referência para a porosidade drenável podem ser consultados para estudos de dimensionamento de sistemas de drenagem (Tabela 4).

A obtenção da porosidade drenável em laboratório é importante para maior representatividade e confiabilidade de acordo com o tipo de solo.

Tabela 4 – Classificação do solo de acordo com a porosidade drenável.

Porosidade drenável do solo (%)	Classificação
1 a 2	Muito baixa
2 a 10	Baixa
10 a 15	Média
15 a 25	Alta
25 a 35	Muito alta

Condutividade hidráulica do solo

Expressa a "facilidade" com que determinado fluido se desloca (movimenta) em um meio poroso, mostrando-se dependente das características do meio e do fluído.

- A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade que expressa à facilidade com que a água nele se movimenta, sendo de extrema importância ao manejo do solo e da água, estando associada às propriedades do solo, principalmente a estrutura e a textura. É um parâmetro determinante na capacidade de drenagem.

- É uma característica do solo essencial para qualquer estudo que envolva o movimento da água no solo, seja para estudar a própria dinâmica da água, seja para estudar o transporte de elementos químicos, nutrientes e defensivos agrícolas, bem como seus impactos potenciais ao ambiente.

Valores de referência de condutividade hidráulica em função do tipo de solo estão disponíveis na literatura (Tabela 5).

A determinação em laboratório ou a utilização de métodos de campo ou equipamentos portáteis, oferecem maior confiabilidade e segurança das informações reais.

Tabela 5 – Classificação da condutividade hidráulica de acordo com a sua magnitude.

Cond. Hidráulica (m dia^{-1})	Classificação
< 0,03	Muito lenta
0,03 - 0,12	Lenta
0,12 - 0,50	Moderadamente lenta
0,50 - 1,50	Moderada
1,50 - 3,00	Moderadamente rápida
3,00 - 5,00	Rápida
> 5,00	Muito rápida

Determinação da condutividade hidráulica do solo

Essencial para o conhecimento da dinâmica da água no solo, principalmente em decorrência do manejo adotado ao próprio solo, a condutividade hidráulica tem efeito nos processos de transporte de nutrientes, podendo indicar prováveis perdas por percolação, principalmente em solos arenosos.

As estimativas de valores de condutividade hidráulica disponibilizadas na literatura podem ser adotadas na elaboração prévia de projeto e propostas de manejo. As determinações em laboratório ou em campo apresentam maior legitimidade e precisão pelas condições mais próximas da representatividade real.

A condutividade hidráulica (K) pode ser obtida por métodos de laboratório e por métodos de campo.

Métodos de laboratório

- **Permeâmetro de carga constante**
  Uma coluna de solo é submetida à carga hidráulica constante e coleta-se o volume de água que atravessa essa coluna em fluxo constante, determinando-se a vazão (volume/tempo). A lâmina constante sobre a coluna de solo pode ser mantida com maior precisão utilizando-se um frasco de Mariotte (Figura 19).

$$K_o = \frac{Q\ L}{A\ (L+H)}$$

Eq.05

K_o – condutividade hidráulica saturada, m h^{-1};
Q – vazão constante de atravessa a coluna, $m^3\ h^{-1}$;
A – área da seção transversal da coluna, m^2;
L – comprimento da coluna, m; e
H – carga hidráulica constante sobre a coluna, m.

Recomendam-se três ou mais repetições, obtendo-se uma média dos valores obtidos.

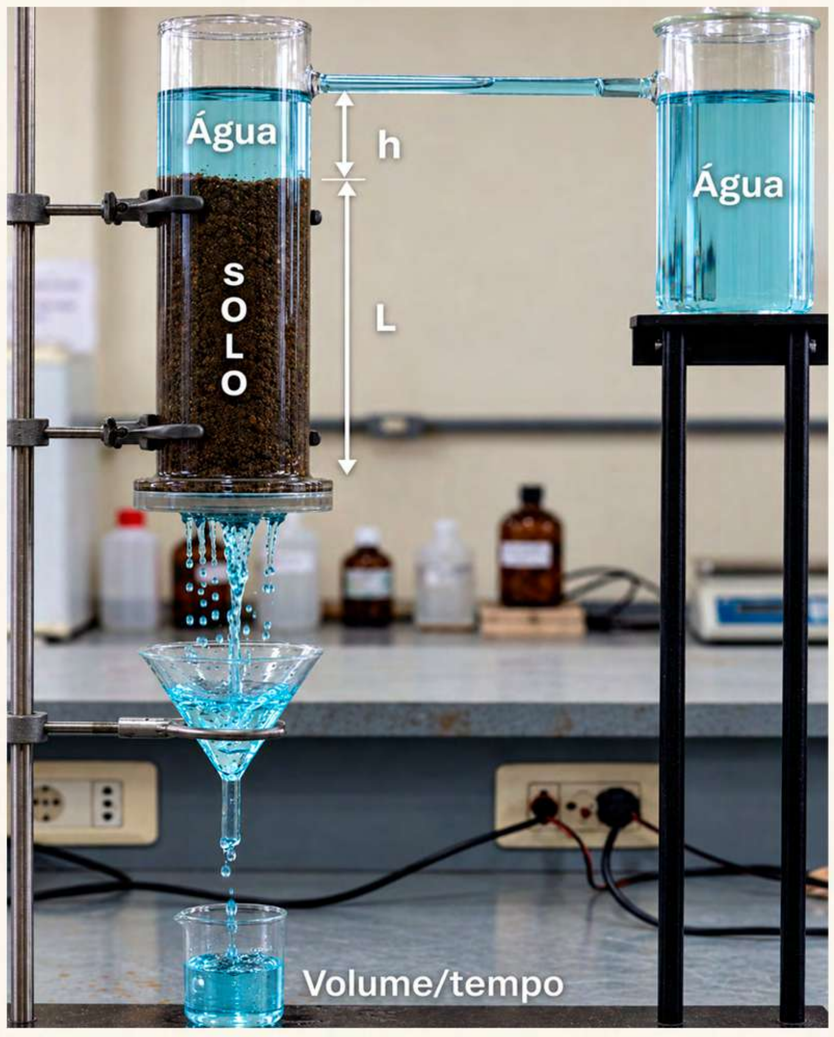


Figura 19 – Ilustração de um permeâmetro de carga constante utilizado para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado.

Permeâmetro de carga variável

Em uma coluna (cilindro) de solo é instalado um funil invertido na face superior, Uma vez que essa coluna é submetida a saturação, obtém-se o tempo transcorrido para o nível da água variar de h1 até alcançar a altura h2 (Figura 20)

$$K_o = - \frac{a \Delta X}{A \ \Delta t} Ln \left(\frac{h_2}{h_1} \right)$$

Eq.06

K_o – condutividade hidráulica saturada do solo, m h^{-1}
h1 – altura inicial da carga hidráulica, m;
h2 – altura final da carga hidráulica, m;
a – área da seção transversal do tubo do funil, m^2;
ΔX – diferença correspondente ao comprimento da coluna de solo, m;
A – área da seção transversal da coluna, m^2;
Δt – intervalo de tempo da variação das alturas da carga hidráulica, h.

Recomendam-se 3 ou mais repetições, obtendo-se uma média dos valores obtidos. Quanto maior o número de repetições melhor a representatividade do resultado do ensaio.

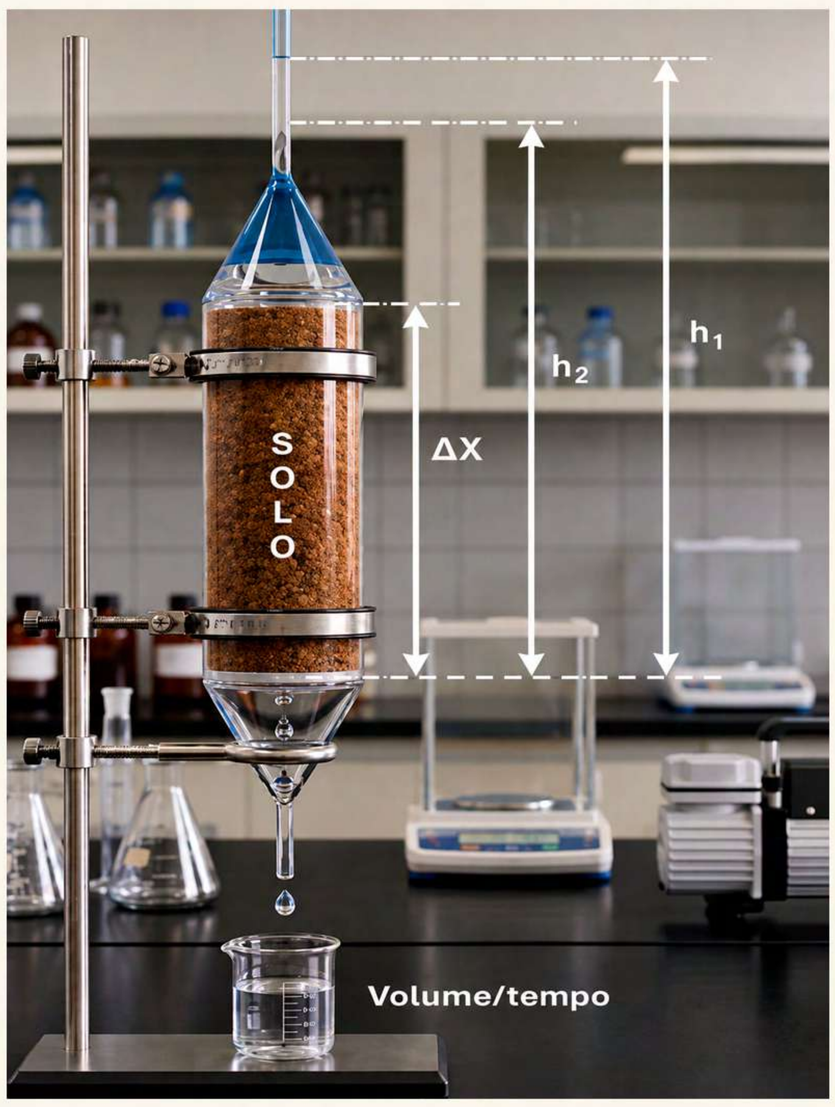


Figura 20 – Ilustração de um permeâmetro de carga variável utilizado para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado.

Métodos de campo

Furo do trado

O método do furo do trado para determinação da condutividade hidráulica é usado quando o lençol freático se encontra próximo à superfície do solo.

Na área a ser drenada, instala-se um furo de 4” de diâmetro, até uma profundidade aproximada onde se deseja instalar os drenos. Em seguida retira-se a água do poço com uma bomba para desobstruir os poros da parede do poço.

Execução em campo:
Recomenda-se a execução desse método em pelo menos três poços, configurando uma média representativa da área de estudo.

a) Identificar a profundidade da camada impermeável e uma vez conhecida a profundidade do poço, tem-se três situações possíveis:

- ✔ Camada impermeável próxima ao fundo do poço (S ≈ 0);
- ✔ Camada impermeável abaixo do fundo do poço, porém a uma distância menor que a profundidade menor que metade da profundidade do poço (0,5 H), ou seja (0 < S < 0,5H);
- ✔ Camada impermeável a uma distância do fundo do poço superior a 0,5H (S > 0,5h).

b) Medir a distância do referencial de leitura ao fundo do poço (Z+Plf +H), sendo Z a distância do nível de referência à superfície do solo, Plf a profundidade inicial do lençol freático e H a carga hidráulica inicial no fundo do poço. É desejável que o valor de H fique entre 50 e 70 cm para solos argilosos e entre 30 e 50 para solos arenosos (Figura 21).

- ✔ Retirar a água do poço com auxílio de uma bomba manual, rebaixando ao máximo o nível da água;
- ✔ Introduzir imediatamente os eletrodos e uma sonda elétrica até a superfície da água, obtendo-se a distância correspondente;
- ✔ Elevar ligeiramente os eletrodos de uma altura (Δh), usualmente 10 cm, e aguardar que o nível dinâmico da água se eleve da posição D_2 pra D_1, e nesse momento, registrado pelo amperímetro, desativar o cronômetro e registar o tempo (Δt); e
- ✔ A velocidade de ascensão é calculada pela razão Δh/Δt.

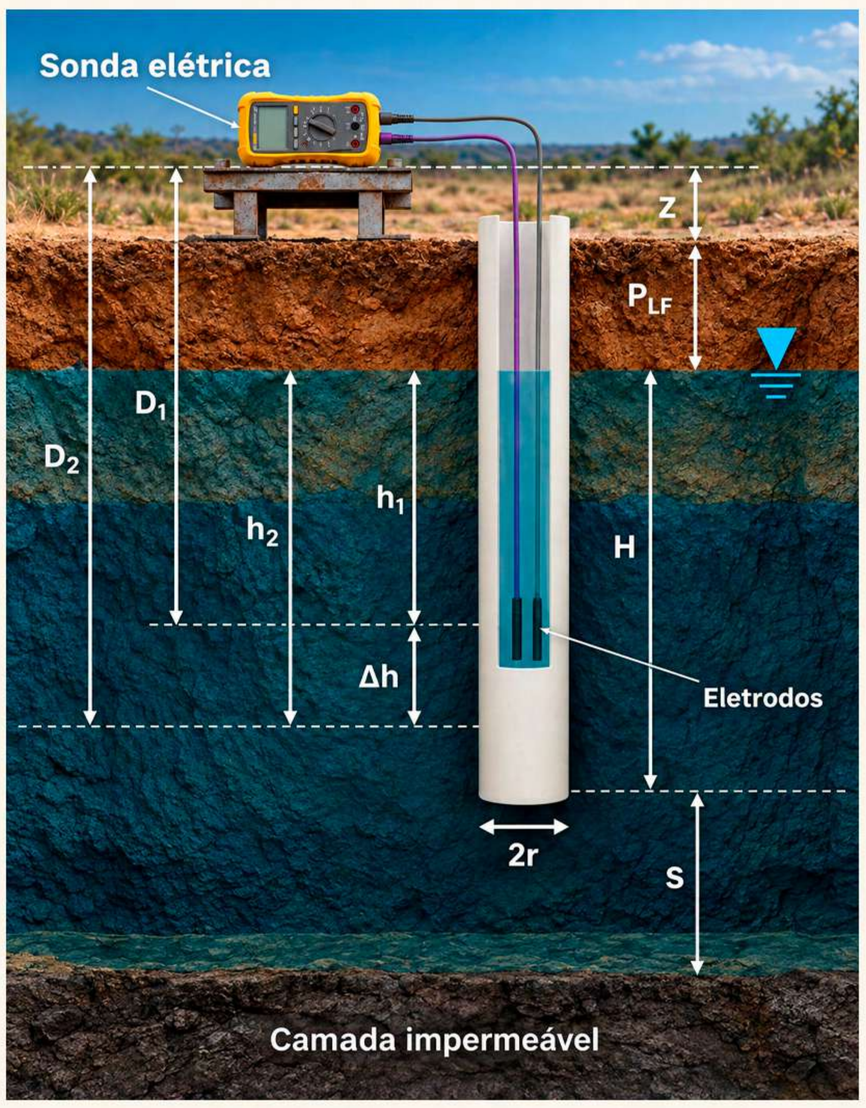


Figura 21 – Ilustração do método de campo "Furo do trado" para determinação da condutividade hidráulica do solo em campo, quando o lençol freático se encontra próximo da superfície.

c) Cálculo da condutividade hidráulica (Ko) a partir das medições realizadas em campo pelo método do furo do trado.

$$K_o = c \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Eq.07

K_o – condutividade hidráulica do solo saturado, m h^{-1};
C – fator adimensional relacionado a geometria do poço (raio, distância do poço à camada de impedimento, carga hidráulica do poço);
Δh – diferença da altura da água dentro do poço no intervalo de medição, m;
Δt – intervalo de tempo da medida de variação de altura de água dentro do poço, h.

Para o cálculo do fator C, deve-se verificar as situações encontradas em campo:

✔ Para S = 0

$$C = \frac{3600\ r^2}{(h + 10\ r)\left(2 - \frac{\bar{h}}{H}\right)\bar{h}}$$

Eq.08

r – raio do poço, m;
H – carga hidráulica do poço, m.;

sendo,

$$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2}{2}$$

Eq.09

$\bar{h}$ – altura média da profundidade de água no poço, correspondente à ascensão do LF no intervalo de tempo de medida, pela indicação da posição dos eletrodos, m;
h_1 **e** h_2 – alturas da água dentro do poço, correspondentes à ascensão do LF no intervalo de tempo de medida m;

✔ Para S ≥ 0,5 H

$$C = \frac{4000\ r^2}{(H + 20\ r)\left(2 - \frac{\bar{h}}{H}\right)\bar{h}}$$

Eq.10

No caso de uma situação intermediária, o valor de C pode ser considerado a média dos valores obtidos nas duas situações anteriores.

- **Furo do poço seco**
  O método do poço seco para determinação da condutividade hidráulica do solo é usado quando o lençol freático se encontra profundo.

  Consiste, basicamente, em medir a vazão infiltrada em um poço aberto com trado, no qual se mantém água com altura constante.

  Muito usado para obtenção da condutividade em estação seca de uma região ou em regiões áridas, prevendo no futuro a elevação do lençol freático.

  O método assume que o solo está inicialmente seco ou abaixo da saturação. A manutenção da carga constante cria uma "bolha" de saturação ao redor do furo, permitindo medir a facilidade com que a água se move no perfil do solo.

  A sua execução não demanda equipamentos de difícil manuseio e sim a adoção de observações e medições com máxima precisão dos parâmetros necessários. As informações prévias de uso e manejo do solo tem importância na caracterização das propriedades do solo (Figura 22).

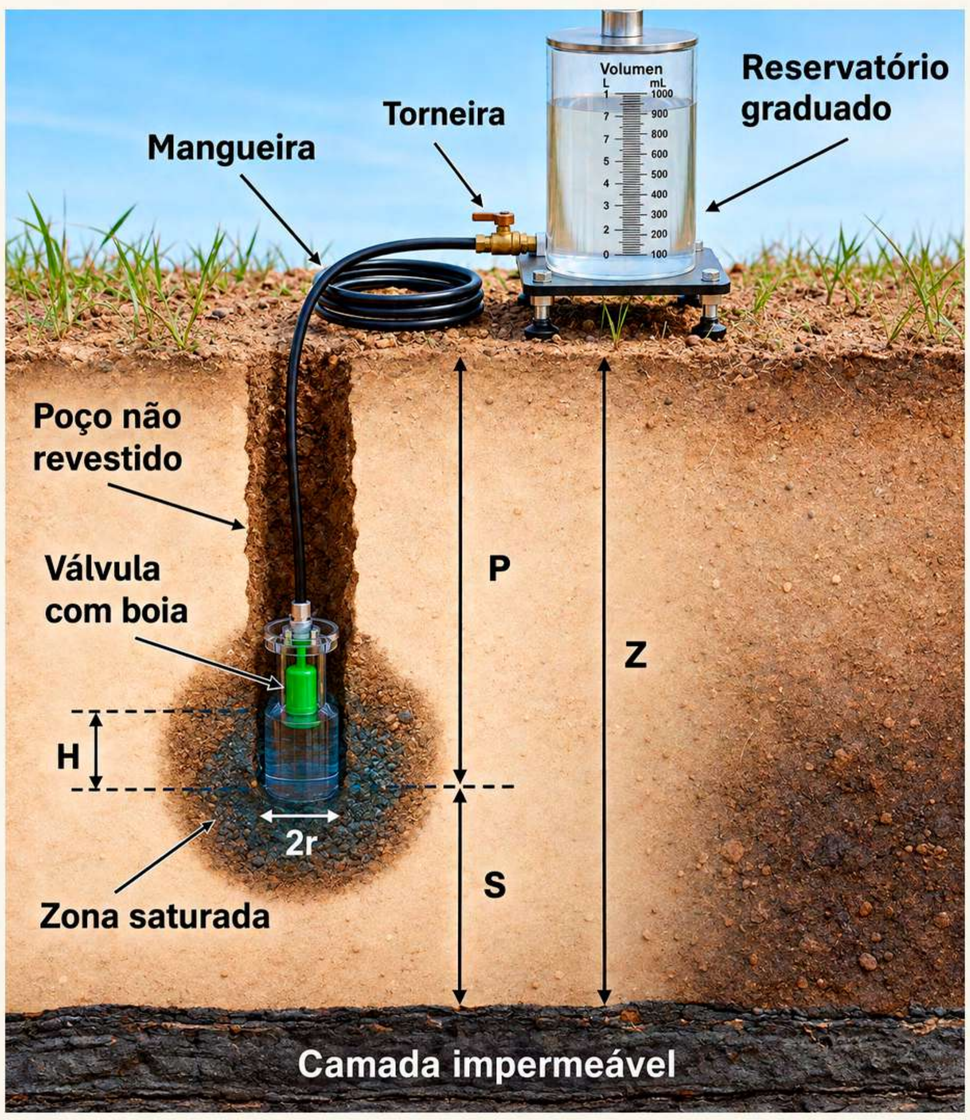


Figura 22 – Ilustração do método de campo “Furo do poço seco!” para determinação da condutividade hidráulica do solo, quando o lençol freático se encontra profundo.

Execução em campo:

a) Com o auxílio de um trado, identificar a profundidade da camada de impedimento na área de estudo.

b) No local onde se deseja determinar a condutividade hidráulica, abre-se um furo no solo com um trado (holandês), criando-se um poço com raio “r”, comumente na profundidade de 1,0 a 1,50 m.

c) Aplica-se água no poço a partir de um reservatório munido de uma escala graduada com a melhor precisão possível de um dispositivo que mantenha a altura constante (H) de água no poço. Esse dispositivo deve ser dotado de uma boia ou sistema de controle de nível (tipo Mariotte). Para bons resultados recomenda-se a altura H igual ou maior que 10 vezes o raio do poço.

d) Ao observar a estabilização do nível da água no poço, iniciar a medição do volume infiltrado (medido no reservatório com régua graduada) num intervalo de tempo.

e) Para o cálculo da condutividade hidráulica duas situações são consideradas para a sua determinação: quando a distância entre a camada de impedimento e o fundo do poço (S) é inferior a 2H (S < 2H) e quando essa distância é igual ou superior a 2H (S ≥ 2H).

✔ S < 2H

Eq.11

$$K_o = \frac{3Q}{\pi H (H + 2S)} \ln\left(\frac{H}{r}\right)$$

K_o – condutividade hidráulica do solo, cm h^{-1};
Q – vazão constante, cm^3 h^{-1};
H – altura da água dentro do poço, cm;
R – raio do poço, cm; e
S – distância do fundo do poço até a camada impermeável, cm.

✔ S ≥ 2H

Eq.12

$$K_o = \frac{Q}{2\pi H^2}\left[\ln\left(\frac{H}{r} + \sqrt{\frac{H^2}{r^2} - 1}\right) - 1\right]$$

APLICAÇÃO:
Para a determinação da condutividade hidráulica do solo em uma área a ser drenada, foi utilizado o método do "poço seco" uma vez que as informações indicam a ausência de lençol freático próximo a superfície do terreno. Após a escolha/definição do local mais representativo para o ensaio, obteve-se:

- ✔ Profundidade da camada de impedimento (Z) = 2,50 m;
- ✔ Profundidade do poço escavado (P) = 1,60 m;
- ✔ Raio do poço escavado (r) = 0,05 m;

O poço foi preenchido com água até uma altura (H) = 0,25 m. Um frasco de Mariotte utilizado para controle do nível de água constante no poço. O fornecimento de água ocorreu por uma mangueira conectada a uma válvula de boia instalada da extremidade.

Com o solo saturado e o fluxo estabilizado, a vazão média em 3 repetições foi de 0,09 L min^{-1} para manter constante a altura (H) de água no poço.

- ✔ Calcular a condutividade hidráulica do solo em centímetro por hora.

$$K_o = \frac{5400}{2\ \pi\ 25{,}0^2}\left[\ln\left(\frac{25{,}0}{5{,}0} + \sqrt{\frac{25^2}{5^2} - 1}\right) - 1\right]$$

K_o = 1,77 cm h^{-1}

H - 25,0 cm
S - 2,50 – 1,60 = 0,90 m (90 cm); portanto, atende a condição de S ≥ 2H
r - 5,0 cm
Q - 0,09 L min^{-1} = 90 cm^3 min^{-1} = 5400 cm^3 h^{-1}

- **Outros dispositivos**

  O SoloFlux, por exemplo, é um permeâmetro digital automatizado, ferramenta ideal para medir a condutividade hidráulica e compreender a dinâmica da água no solo.

  O equipamento foi desenvolvido como resultado de uma parceria entre a Embrapa, o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e a empresa Falker Automação Agrícola (https://www.falker.com.br/br/soloflux). As medições são digitais e automatizadas. O que antes era trabalhoso necessitando acompanhamento in loco de um técnico treinado, com o SoloFlux fica mais rápido e com coleta e registro automático dos dados (Figura 23).



Figura 23 – Permeâmetro digital automatizado SoloFlux (https://www.falker.com.br/).

Princípios de funcionamento do SoloFlux:

- Fundamenta-se em dois mecanismos de sensoriamento complementares. Sensores ópticos são responsáveis por monitorar continuamente o nível de água no poço de medição assegurando que a carga hidráulica aplicada ao solo se mantenha constante, em 5 ou 10 cm, para a obtenção de regime permanente de fluxo. Paralelamente, um sensor de pressão registra a cada 10 segundos a variação de pressão no interior do reservatório, permitindo calcular o fluxo a partir da diferença de pressão e do raio interno conhecido.

- Durante a operação, o SoloFlux mantém automaticamente a carga hidráulica selecionada e registra o fluxo de forma contínua. Uma vez estabilizado o fluxo do bulbo de saturação no solo, o sistema utiliza as aquisições finais para o cálculo da Ko.

- ✔ O SoloFlux realiza integração digital; o equipamento comunica-se via Bluetooth com o aplicativo FalkerFlow, que permite visualizar os resultados em tempo real, armazenar histórico de medições e exportar os dados em diferentes formatos, incluindo planilhas e arquivos compatíveis com sistemas de georreferenciamento, como o Google Earth. Essa integração favorece a organização e o pós processamento destes dados, eliminando o uso de folhas de campo e o trabalho pós coleta de digitalização dos dados de fluxo e cálculo da Ko.

3.3 Princípios do movimento de água no solo

Os princípios do movimento de água no solo estão fundamentados nas características hidrodinâmicas do solo e, assim também, na distância entre os caminhos preferenciais de deslocamento da água no perfil do solo.

É importante destacar o conceito de solo como um meio poroso sob o efeito dos gradientes de potencial que determinam a capacidade de movimento da água, bem como da medida da facilidade/resistência oferecida pelo solo para esse movimento.

No aspecto do estado de energia da água em um meio poroso, vale destacar:

- ✔ A tendência espontânea e universal de toda matéria na natureza é atingir um estado de energia mínimo (equilíbrio);
- ✔ A água desloca-se de regiões de maior para menor energia; e
- ✔ O estado de energia (potencial total de água no solo) depende da umidade.

Henry Darcy (1856) foi o primeiro a estudar o fluxo de fluidos (movimento da água) a partir da observação da infiltração de solução em colunas de areia homogênea em condições de saturação, em filtros utilizados no sistema de tratamento de água de Dijou.

Ficou constatado por Darcy que a vazão (Q) é diretamente proporcional à diferença de potencial (ΔΨ) ao longo do fluxo, à área da seção (A) do conduto do meio poroso e do fluido, e inversamente proporcional ao comprimento (L) do conduto (coluna de solo).
Tem-se, portanto:

Eq.13

$$Q \text{ "}\alpha\text{" } A \frac{\Delta\Psi}{L}$$

O movimento de água é influenciado por uma característica intrínseca do solo, chamada condutividade hidráulica (K), que mede a facilidade com a qual o solo transmite a água (Figura 24).

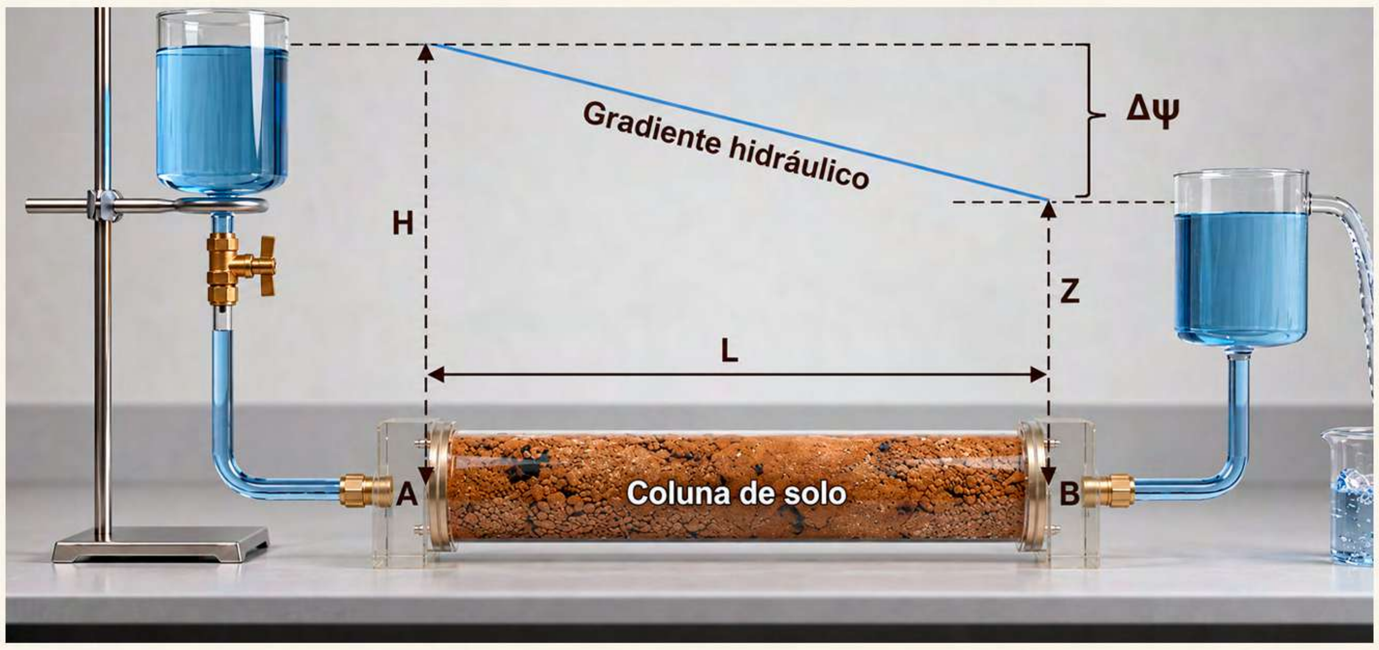


Figura 24 – ilustração de uma coluna de solo submetida à um gradiente hidráulico demostrando o estudo de Darcy sobre permeabilidade do solo.

A densidade de fluxo (**q**) é a relação entre a vazão (**Q**) e a secção transversal de escoamento (***A***), e sabendo que o movimento de água é influenciado por uma característica intrínseca do solo, chamada condutividade hidráulica (**K**) que corresponde a constante de proporcionalidade de Darcy, indicando a facilidade com a qual o solo transmite a água. No caso de meio saturado, tem-se a condutividade hidráulica saturada do solo ($\mathbf{K_o}$), resultando, portanto:

Eq.14

$$q = - K_o \frac{\Delta\Psi}{L} = - K_o \; Grad\,\Psi$$

q – densidade de fluxo, m h^{-1};
K_o – condutividade hidráulica do solo saturado, m h^{-1};
Ψ – diferença de potencial, m.c.a;
L – comprimento, m; e
Grad Ψ – gradiente de potencial, adimensional.

O valor negativo indica uma realidade física, uma vez que o fluido se move do ponto de maior para o de menor potencial.

Assim, a partir da equação de Darcy, que descreve o movimento de fluidos em meios porosos, é possível expressar a maior ou menor intensidade do movimento do fluido no solo (K), característica importante nos estudos de drenagem.

A redução do excesso de água pelo rebaixamento do lençol freático ou da franja capilar da água na profundidade do sistema radicular é função das características do solo e influenciada pelos caminhos preferenciais da água, definidos pelo espaçamento dos drenos dimensionados e instalados.

Um menor rebaixamento do lençol freático está associado a um maior espaçamento entre os drenos (Figura 25).

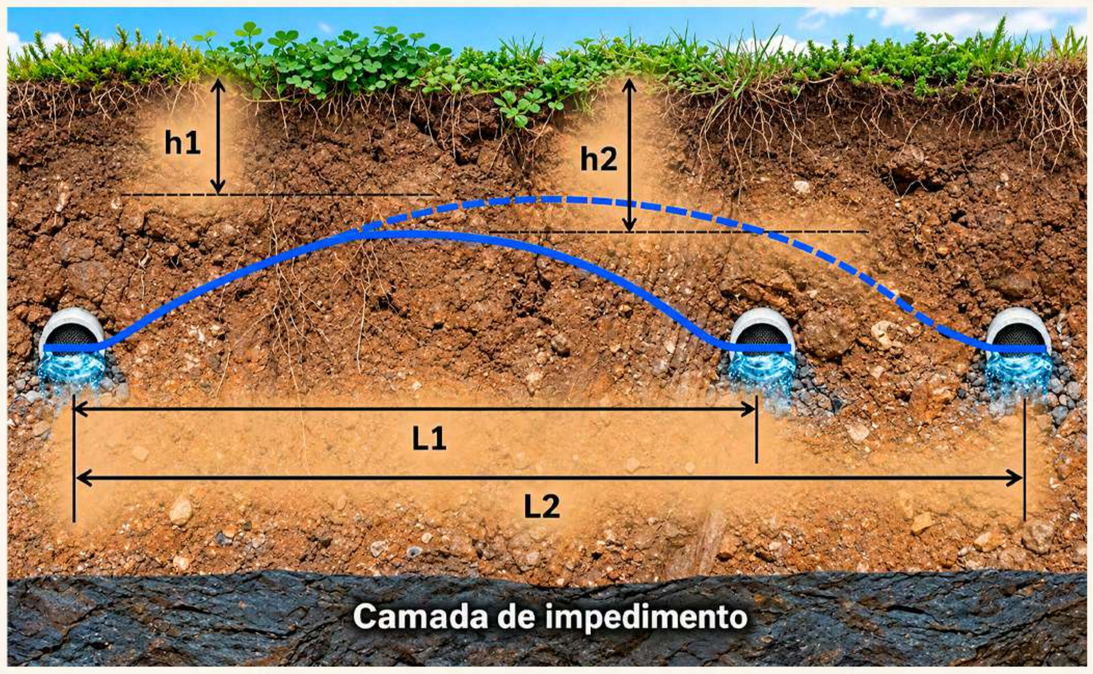


Figura 25 – ilustração do rebaixamento do lençol freático em função do espação entre drenos.

04 Critérios de drenagem

04. Critérios de drenagem

Vários critérios foram propostos com intuito de prever o desempenho do sistema de drenagem a ser implantado. Eles são necessários ao cálculo do espaçamento entre os drenos de campo.

As imposições dos critérios devem estar associadas a diversos fatores, incluindo a sensibilidade das culturas à presença de excesso de umidade no sistema radicular, bem como ao regime hidrológico de cada região.

Para estabelecimento de um critério de drenagem, a profundidade permissível do lençol freático é a primeira variável estabelecida, de forma a não provocar danos ou comprometimento à cultura, principalmente a deficiência de aeração (hipoxia) na zona radicular.

A profundidade do lençol freático depende de vários fatores:

a) **Profundidade efetiva da zona radicular:**
Quando mais profundo o sistema radicular da cultura, maior deve ser a profundidade dos drenos, para evitar riscos de excesso de umidade e com isso evitar comprometimento ou danos à cultura.

b) **Necessidade de reposição de água por irrigação:**
Para o caso de aplicação de lâminas de irrigação, deve-se considerar o mínimo fluxo ascendente da água. Em regiões úmidas, sem previsão de irrigação, manter o lençol freático não muito profundo favorece a extração da água pelas raízes por fluxo ascendente no perfil.

c) **Altura da franja capilar:**
A franja capilar de umidade no solo, observada acima do lençol freático, é maior em solos argilosos do que em solos arenosos. Assim, deve-se manter o lençol freático mais profundo em solos argilosos.

d) **Controle da salinidade:**
Especialmente para regiões áridas e semiáridas, a drenagem tem grande importância no controle da salinidade do solo. Com isso o fluxo ascende deve ser minimizado, evitando o deslocamento de saís para a zona radicular das culturas. Para isso, a profundidade dos drenos deve ser maior.

Recarga de água subterrânea

Quando se trata de recarga subterrânea, há que se considerar os estudos de regimes de escoamento da água para os drenos. Esses, permanente e não permanente, são tratados por modelos diferentes para o rebaixamento do lençol freático pelos sistemas de drenagem.

Para uma recarga constante (regime permanente), o sistema dever ser capaz de estabilizar o lençol freático a uma profundidade adequada. Para tanto, pode ser necessário um estudo do balanço hídrico da região do projeto, importante para estimar essa recarga.

Em condições de regime não permanente, normalmente em áreas irrigadas com definição de épocas distintas de chuva e/ou irrigação, há que se considerar o não equilíbrio do lençol, com flutuações em função da intensidade da recarga.

Diversas variáveis devem ser observadas para os regimes de fluxo, como solo (estado de umidade, capacidade de infiltração), intensidade e duração de precipitação, e tempo de retorno da chuva.

É unânime entre pesquisadores e técnicos que as observações práticas em campo de sistemas de drenagem de sucesso (bem dimensionados), são importantes para avaliação e uso dos modelos.

Tempo de rebaixamento do lençol freático

O lençol freático deve ser rebaixado, num dado intervalor de tempo, para uma profundidade que não provoque danos a cultura pelo comprometimento da respiração das raízes. Esse é o propósito da drenagem agrícola.

O rebaixamento do lençol freático para não comprometer a planta e o rendimento econômico das culturas, é função da profundidade e espaçamento definidos para instalação e funcionamento dos drenos.

Na Engenharia de Drenagem, o "tempo para o rebaixamento" corresponde ao período em que o sistema deve ser capaz de remover o excesso de água da zona radicular para evitar a anoxia (falta de oxigênio), que prejudica o desenvolvimento das plantas.
O tempo para o rebaixamento, após a recarga (chuva ou irrigação), é influenciado também por fatores como: a) sensibilidade da cultura, b) estádio de desenvolvimento da cultura e c) temperatura da água no solo.

A seguir são apresentadas informações de algumas culturas e o tempo necessário para o rebaixamento do lençol freático, sob risco de comprometimento por hipoxia (Figura 26).

Cultura		Tempo para o rebaixamento	Referências
SENSIBILIDADE ALTA	Alface	12 horas	Mingoti *et al.* (2004, 2006)
	Batata		Flecha *et al.* (2004)
	Cenoura		Mingolti *et al.* (2002)
SENSIBILIDADE MÉDIA	Quiabo	1 dia	Duarte *et al.* (1990)
	Aveia		Cruciani & Minani (1984)
	Pimentão		Cruciani & Minani (1987)
SENSIBILIDADE BAIXA	Milho	2 dias	Cruciani (1985)
	Feijão		Duarte *et al.* (1992)
	Soja		Duarte *et al.* (2000), Cantos *et al.* (1999), Sá et *al.* (2004)

Figura 26 – Indicadores de sensibilidade de culturas à profundidade do lençol freático e o tempo necessário para o rebaixamento (Sá et al. 2005).

05 Regimes de fluxo da água para os drenos

05. Regimes de fluxo da água para os drenos

Regime permanente ou fluxo contínuo

Admite-se que o lençol freático se mantém estável no tempo em uma profundidade. Isso ocorre quando a quantidade de água que chega ao lençol freático é igual àquela descarregada pelos drenos, situação caracterizada pela ocorrência de chuvas com baixa intensidade e longa duração.

No caso de fluxo permanente (contínuo), pode-se entender que a profundidade do lençol freático pouco se altera, visto que a quantidade de água descarregada pelo dreno corresponde ao aporte que chega. Essa condição simplificadora e abstrata é obtida em condições de laboratório, com a suposição de que o lençol freático se mantém em uma altura constante devido à recarga de água que se infiltra totalmente no solo (Figura 27).

- ✔ Evidentemente, este não é o caso de regimes pluviométricos de países de clima tropical, como o Brasil. Logo, o modelo para dimensionamento em condições de fluxo permanente não são aconselháveis para as nossas condições.

- ✔ O mesmo ocorre em condições de irrigação, onde o lençol freático, além de sofrer flutuações entre as irrigações, dificilmente se mantém a uma profundidade constante com o tempo como estabelece o pressuposto do modelo (recarga uniformemente distribuída).

- ✔ Considerando o regimente permanente, há citações de bons resultados em regiões úmidas com chuvas constantes e de baixa intensidade, como no final do inverno em alguns países da Europa Ocidental, como Inglaterra e Portugal.

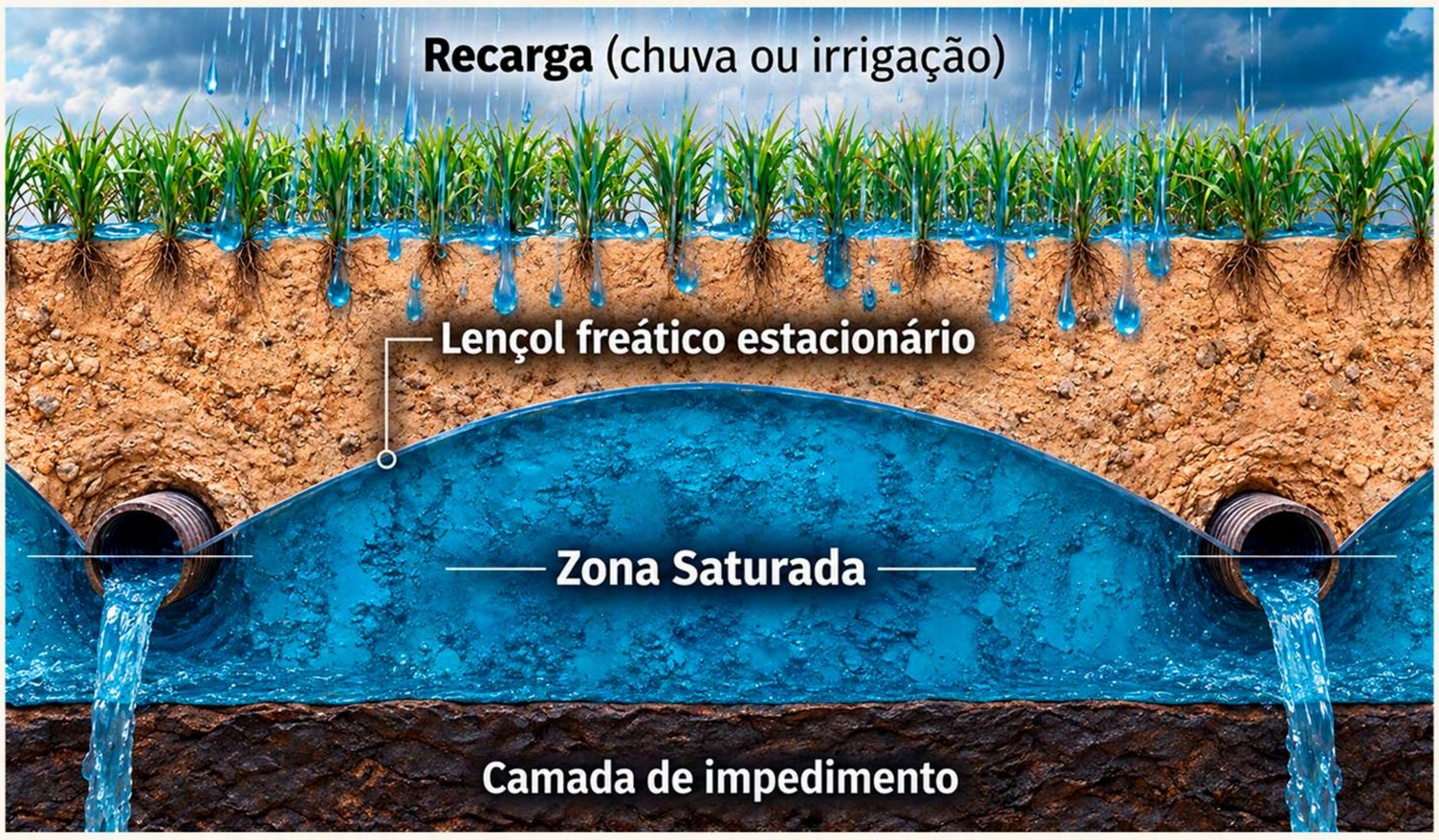


Figura 27 – Ilustração do fluxo de água para os drenos mantendo o lençol freático estacionário numa condição hipotética em que a quantidade de água que chega ao lençol freático é igual àquela descarregada pelos drenos.

As equações utilizadas para o dimensionamento dos sistemas de drenagem em regime permanente são bem mais simplificadas para definir a profundidade e espaçamento dos drenos, de forma a manter o lençol freático na condição mais favorável para a cultura

Regime não permanente ou variável

A posição do lençol freático se eleva em decorrência de um evento de chuva ou irrigação e desce quando cessam esses eventos (Figura 28).

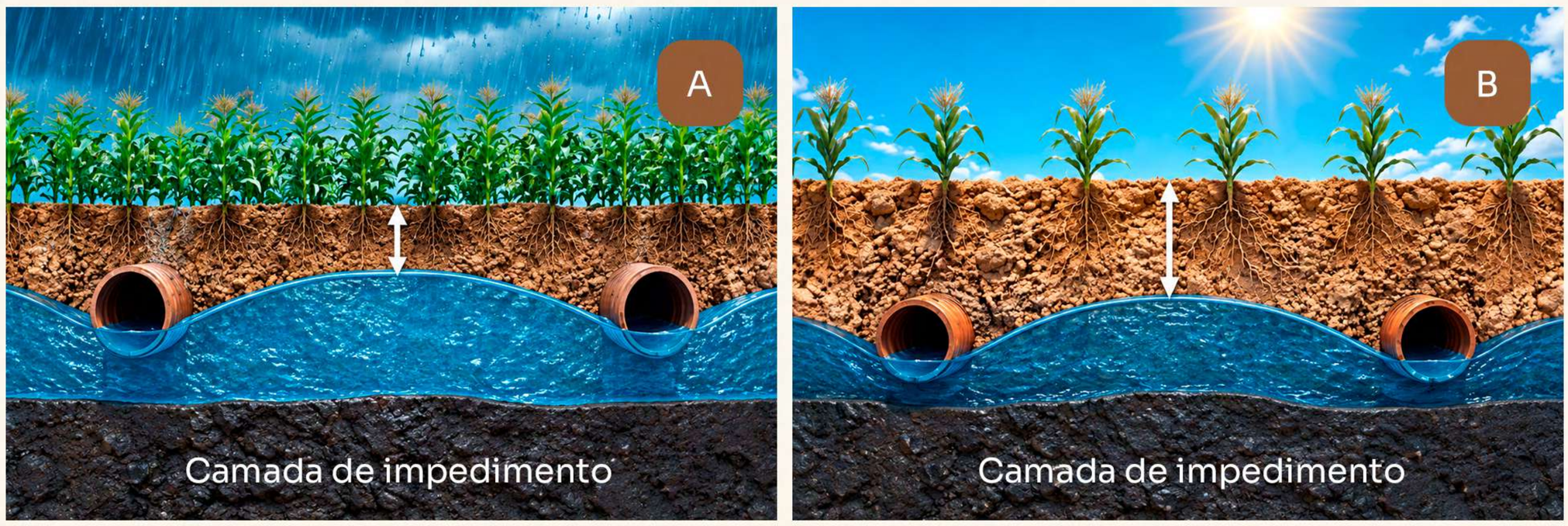


Figura 28 – Ilustração da profundidade do lençol freático próximo à superfície do solo em decorrência de chuva ou irrigação (A) e o rebaixamento do lençol para uma profundidade maior em relação a superfície (B) após a ocorrência de chuva ou irrigação.

Diferente do regime permanente, o regime variável considera a dinâmica temporal da drenagem.

É crucial que a drenagem em regime variável rebaixe o lençol freático para um nível ideal dentro de um determinado tempo, respeitando as necessidades de oxigenação e a estrutura do solo para o desenvolvimento das plantas (Figura 29).

A altura do lençol freático, após uma chuva intensa ou irrigação (ho), deve ser rebaixada para uma altura (ht) que assegure melhores condições de oxigenação do sistema radicular.

As equações que descrevem o regime não permanente são um pouco mais complexas que as equações para o regime permanente, exigindo o auxílio computacional. Com o auxílio de softwares, que simplificam o processo e incorporam a dinâmica variável do lençol freático, é possível simular situações para vários cenários em campo.

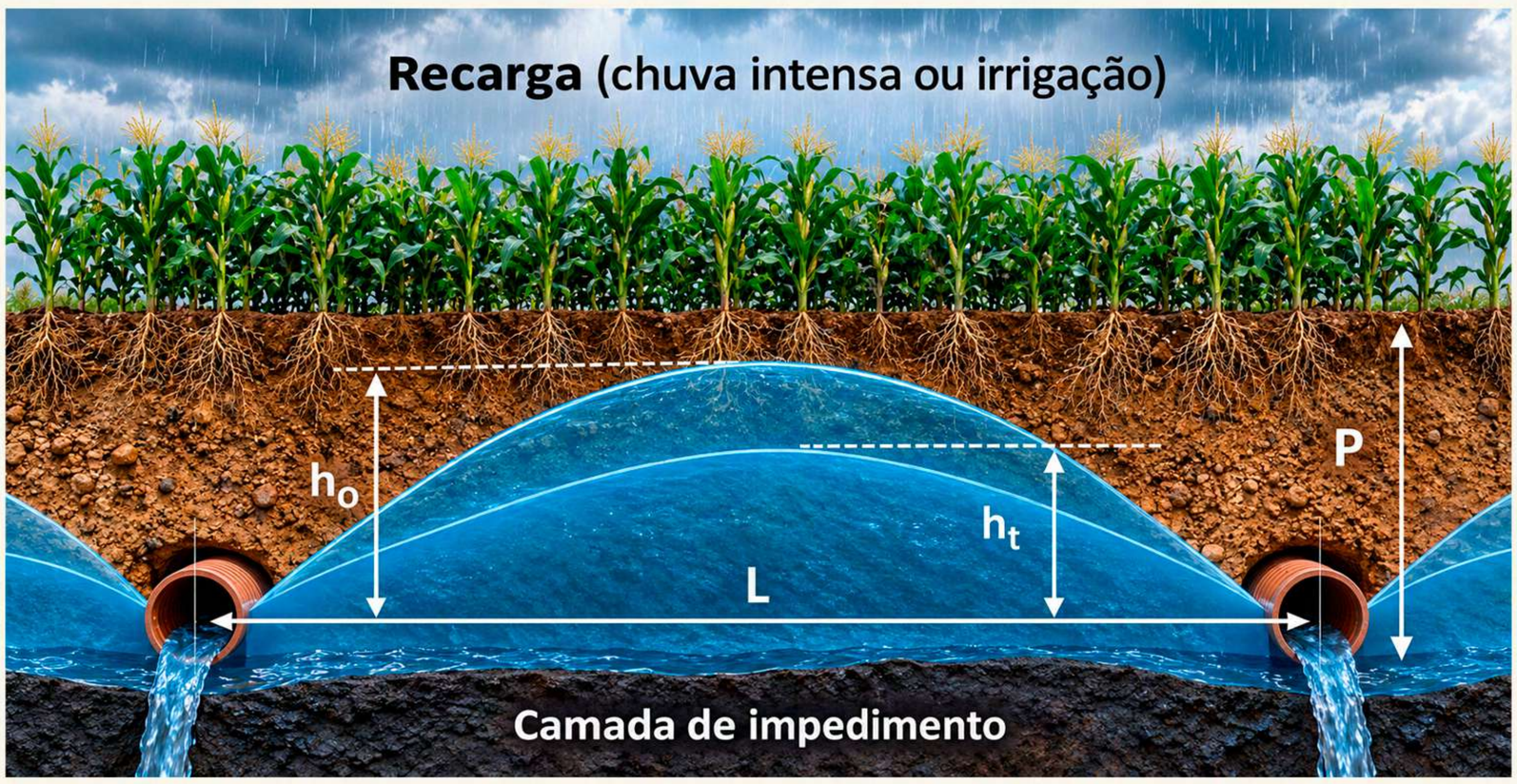


Figura 29 – Ilustração destacando a dinâmica da profundidade do lençol freático, uma vez cessada a ocorrência de chuva ou irrigação, como previsível no regime não permanente (variável).

06 Sistema de drenagem em campo

06. Sistemas de drenagem em campo

Em campo, a ordem de distribuição das estruturas de drenos em categorias está estabelecida de acordo com a função que exercem dentro do sistema (Figura 30). Os drenos são classificados em:

- ✔ Drenos de campo, laterais ou primários
- ✔ Drenos coletores
- ✔ Dreno principal

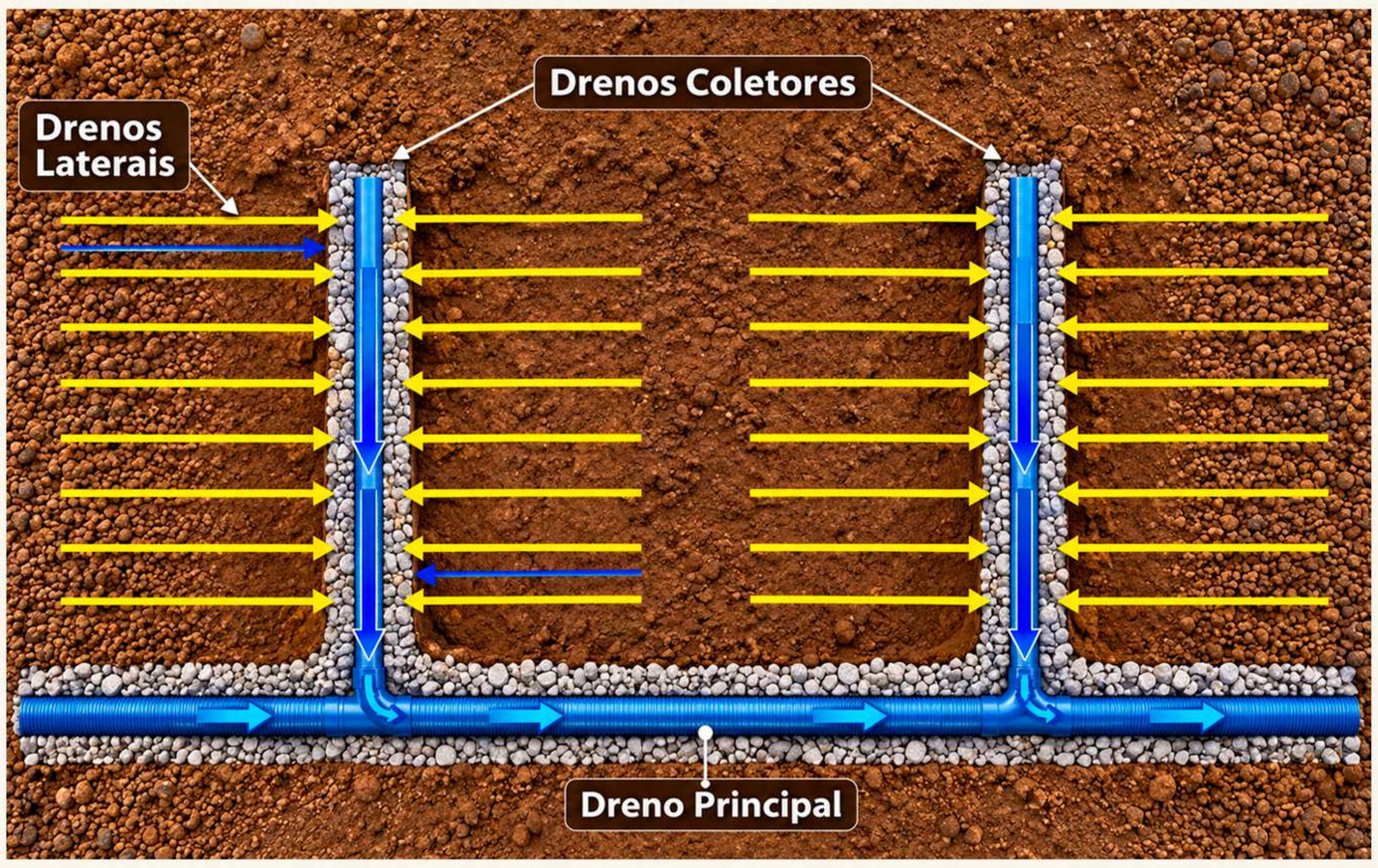


Figura 30 – Ilustração para a ordem de distribuição de drenos instalados em campo.

Drenos laterais
Dispostos paralelamente entre si, têm como função receber a água contida nos macroporos do solo, exercendo, deste modo, o controle da profundidade do lençol freático.

Drenos coletores
Coletam a água proveniente dos drenos laterais e conduzem ao dreno principal.

Dreno principal
Recebe a água dos drenos coletores, transportando-a para fora da área do projeto; dependendo do tamanho da área, podem ser necessários dois ou mais drenos principais.

Dreno interceptor
Quando se identifica a ocorrência tanto de escoamento superficial como subsuperficial das áreas mais altas para as baixas, há necessidade de construir um dreno na interseção do plano da várzea (“dreno interceptor” ou “dreno de encosta”).

Os sistemas podem ser classificados em superficiais e subterrâneos. Os sistemas superficiais têm o objetivo de remover a água acumulada sobre o solo, enquanto os subterrâneos removem o excesso de água do interior do solo, exercendo controle sobre a posição do lençol freático.

6.1 Drenagem superficial

Um sistema de drenagem superficial coleta e remove o excesso de água que se acumula na superfície do terreno, por meio de valas ou canais rasos, frequentemente com nivelamento ou regularização do terreno, para direcionar a água para um escoamento natural ou construído. Esses sistemas evitam alagamentos, erosão do solo e danos a plantações ou infraestrutura, especialmente em áreas planas com chuvas intensas ou solos mal drenados (Figura 31).



Figura 31 – Ilustração da estrutura de drenagem, destacando os drenos laterais e coletor na área cultivada, exercendo a finalidade de remoção de água da superfície e do perfil do solo.

Os sistemas de drenagem superficial são geralmente aplicados em terrenos relativamente planos, com solos com baixa ou média capacidade de infiltração, ou em áreas com ocorrências de chuvas de alta intensidade que excedem a capacidade normal de infiltração, de modo que se evite frequentes alagamentos na superfície do terreno.

Uma observação importante é que as estruturas de campo para um sistema de drenagem superficial têm um formato diferente dos drenos para drenagem subsuperficial. Devem permitir a passagem de equipamentos agrícolas e devem ser de fácil manutenção; além disso as velocidades do fluxo não devem induzir erosão.

6.1.1 Tipos de drenos

A drenagem superficial pode ser feita por meio dos seguintes sistemas/tipos:

- ✔ Natural;
- ✔ Valas;
- ✔ Camalhão;
- ✔ Sistema interceptor;
- ✔ Sistematização do terreno; e
- ✔ Uso de drenos rasos trafegáveis.

Sistema natural

Consiste em interconectar as depressões do terreno por meio de drenos que conduzem a água para pontos de descarga natural da área. Sempre que possível, os drenos devem ser rasos e com as faces laterais pouco inclinadas, para não interferirem nas práticas agrícolas. É indicado para situações em que o nivelamento do terreno se torna dispendioso (Figura 32).

Exemplos de drenagem natural são as configurações de áreas nas diferentes dimensões de bacias hidrográficas ou recortes dessas para fins de exploração agrícolas com definições de contribuições de precipitação e escoamento.



Figura 32 – Ilustração de drenagem natural no contexto de bacias hidrográficas de diferentes configurações.

Sistema de valas

Muitas ocorrências de empoçamento (acúmulo de água) em áreas de baixada podem ser resolvidas com drenos (ou mesmo valas) interconectando depressões do terreno, conduzindo a água para pontos de descarga na própria área. Esses drenos devem ser rasos e acompanhar o mínimo declive possível do terreno, evitando erosão.

O sistema de valas, quando instalados em paralelo, pode ser designado como sistema com drenos rasos, seguindo a configuração e desenho de estruturas para coleta e escoamento superficial que eliminam o excesso de água. As valas ou drenos são abertos com profundidade entre 15 a 50 cm, com taludes suaves, de forma a permitir o tráfego de máquinas no tereno.



Figura 33– Ilustração de valas para drenagem superficial em terrenos com menores depressões (adaptado de https://publish.illinois.edu/illinoisdrainageguide/surface-drainage/).

O padrão paralelo de valas depende em grande parte do espaçamento adequado e do nivelamento entre elas. Há uma observação quanto à declividade do terreno em que melhores resultados com mínimos riscos de erosão são obtidos em terrenos com declives inferiores a 2%.

O espaçamento entre valas ou drenos depende de uma avaliação da declividade do terrreno e da quantidade das depressões que acumulam água, do manejo do solo, do uso de máquinas e implementos e de experiências com a própria cultura irrigada.

Sistema de camalhão

Um camalhão é uma elevação de terra construída na área, entre dois sulcos, para auxiliar na drenagem do excesso de água do solo, especialmente em áreas planas ou sujeitas a inundações (Figura 34).

O sistema é uma técnica agrícola que permite o escoamento eficiente da água, evitando o encharcamento do solo. São largos, com depressões nas interseções entre eles, as quais funcionam como drenos. Tem indicação principalmente para áreas úmidas com pouca declividade e com solos argilosos pouco permeáveis. No entanto, é comum em áreas com depressões para eliminação do excesso após chuvas fortes em regiões áridas e semiáridas.

Os camalhões são construídos por meio de equipamentos como arados, plainas ou máquinas terraceadoras, que movem o solo para formar as elevações. Essa operação cria sulcos (canais, valas) nas partes mais baixas entre as elevações.



Figura 34– Ilustração de valas para drenagem superficial em terrenos com menores depressões (adaptado de https://publish.illinois.edu/illinoisdrainageguide/surface-drainage/).

Várias indicações e sugestões são encontradas na literatura que podem ser importantes para o desenvolvimento de projetos de sistema com camalhões:

- ✔ Em solos com drenagem muito lenta, a largura varia de 6 a 12 m; com drenagem lenta, de 10 a 20 m; e com drenagem média, de 15 a 30 m;
- ✔ É indicado para áreas úmidas com pouca declividade e com solos argilosos pouco permeáveis.

Recomendações do Serviço de Conservação de Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA – SCS):

- ✔ Altura do centro dos camalhões entre 15 e 50 cm;
- ✔ Comprimento até 300 m; e
- ✔ Largura de acordo com o tipo de solo.

O sistema pesquisado pela Embrapa Clima Temperado, conhecido como camalhões de base larga, com altura máxima próxima a 25 cm no meio ou “na crista”, mostrou bons resultados. Os estudos foram conduzidos em plantio direto em áreas de terras baixas cultivadas há 12 anos. O solo foi mantido livre do encharcamento com os camalhões largos e houve aumentou da matéria orgânica em cerca de 40% (Figura 35).

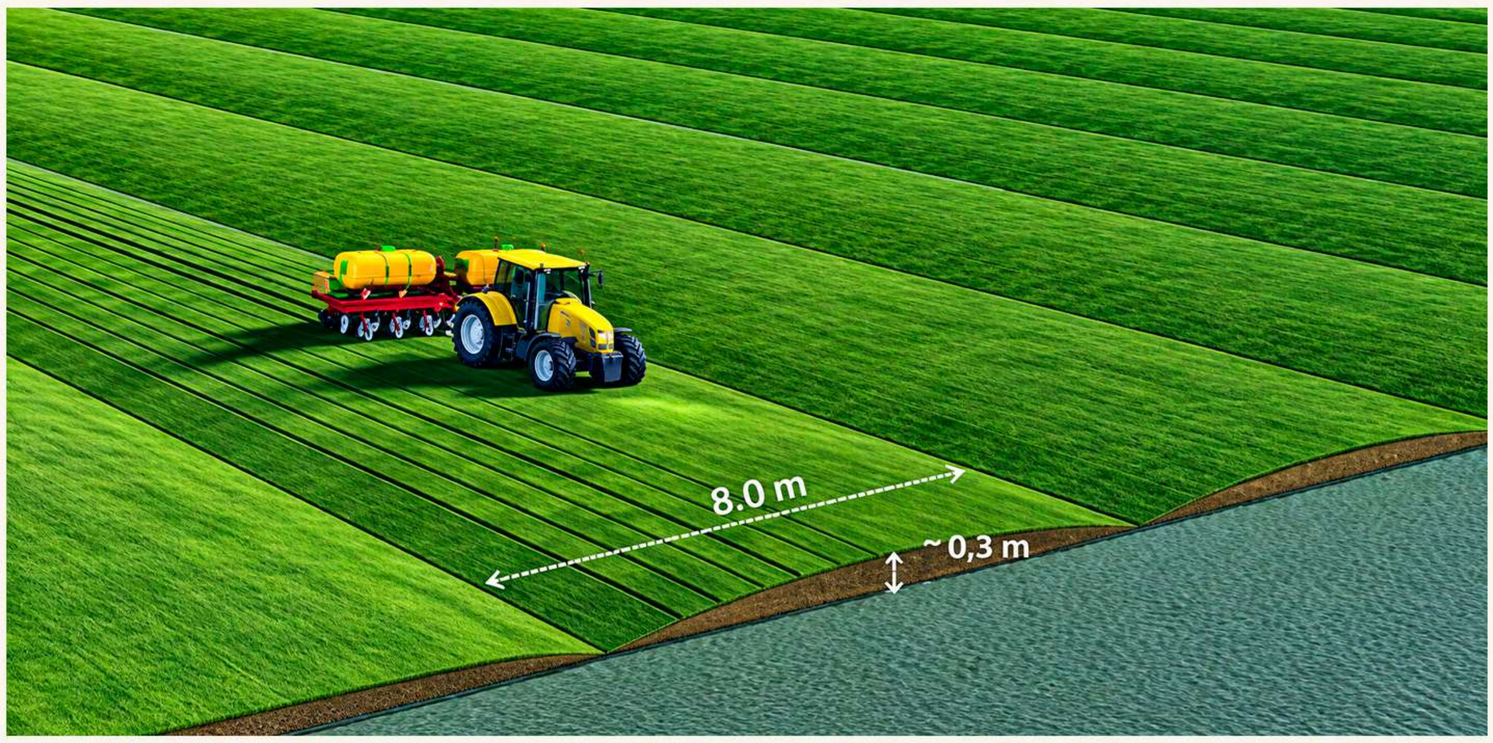


Figura 35– Ilustração de camalhões de base larga para drenagem superficial de terrenos cultivados (adaptado de https://planetaarroz.com.br/os-segredos-da-base-larga/).

Sistema interceptor

Consiste em interceptar, por meio de drenos construídos na base das encostas, os escoamentos superficiais e subterrâneos de águas provenientes das partes altas do terreno, conduzindo-as para fora das partes baixas do terreno (Figura 36).

- ✔ São valas escavadas no solo, de seção transversal trapezoidal, com profundidade que variam entre 1,5 e 2,0 m.
- ✔ É um sistema bastante eficiente, pois reduz a necessidade de drenagem das partes baixas do terreno.

Tem sido muito utilizado em várzeas próximas a encostas, sendo geralmente suficiente para resolver os problemas de drenagem em várzeas estreitas.

Esse sistema pode dar solução na agricultura em áreas baixas das encostas, evitando o encharcamento e viabilizando o cultivo com menores riscos de danos às culturas.

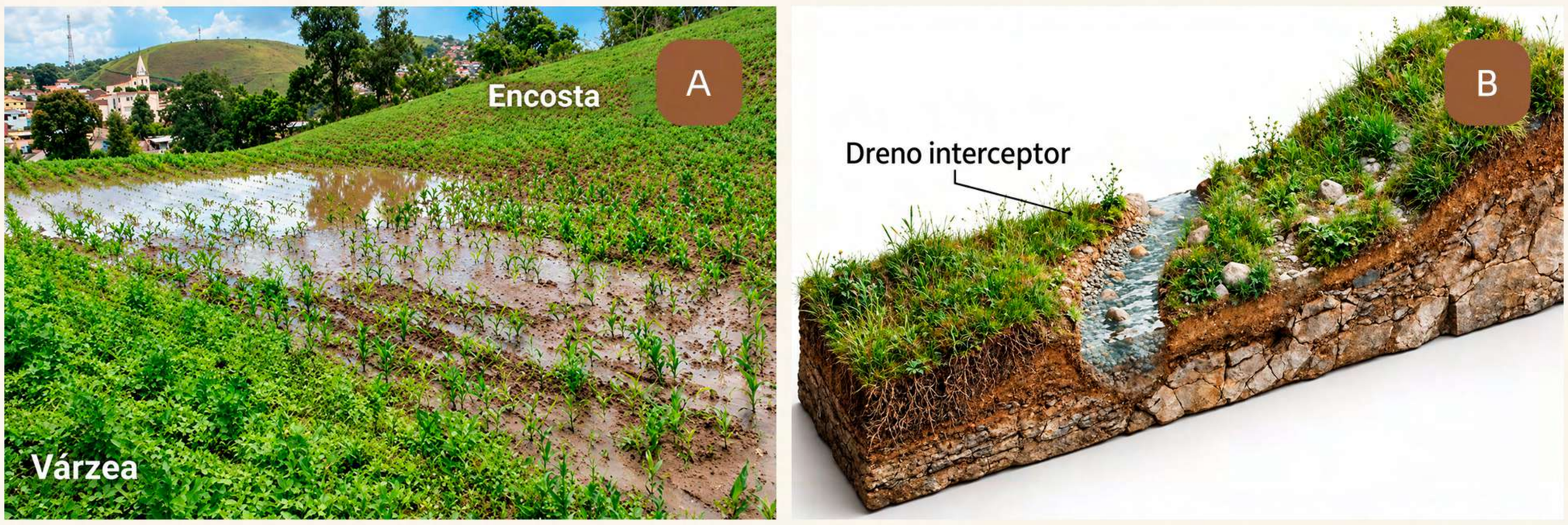


Figura 36 – Registro de terreno de encosta com baixada alagada (A) (Bernardo et al., 2006) e ilustraçãoIA da abertura de dreno interceptor da encosta para conduzir a água para fora da parte baixa do terreno (B).

Sistematização
Consiste na técnica de escavar (cortar), transportar e aterrar o solo, ou simplesmente movê-lo e aplainá-lo, mudando a configuração original do terreno (Figura 37).

O objetivo da sistematização é tornar o terreno com declividades uniformes em uma ou duas direções, facilitando a infiltração e a drenagem das águas de superfície.

Na sistematização é indispensável a observação da altura de corte, sempre respeitando a profundidade ideal (agricultável) do solo.

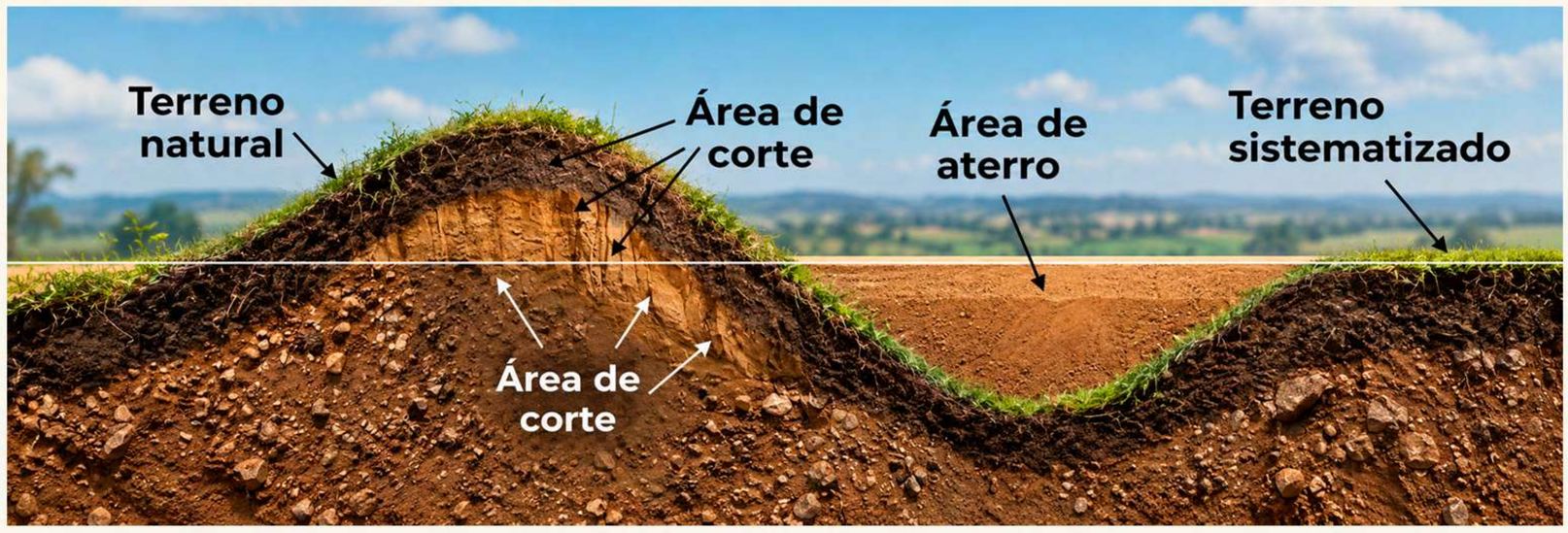


Figura 37– Ilustração da regularização da superfície do terreno com a compensação de volumes de corte e aterro.

Trata-se de um serviço que exige conhecimentos de topografia e é executado a partir de métodos para um melhor ajuste de cortes e aterros (Método do Quadrados Mínimos, Método do Centroide). A depender da extensão de irregularidade do terreno, os custos de movimentação do solo, com uso de maquinário (Figura 38), podem tornar a operação pouco recomendada economicamente.



Figura 38– Serviço de regularização da superfície do solo (terreno) com uso de maquinário (http://www.canaonline.com.br/conteudo/alcoolvale-sistematizacao-do-solo-e-realizada-visando-a-safra-atual-e-a-proxima.html).

Drenos abertos
Para a drenagem superficial, é comum a implantação de estruturas abertas (dreno tipo aberto). Emprega menos tecnologia e apresenta algumas vantagens e limitações.

Os drenos abertos podem operar com as funções de remoção da água na parcela drenada (dreno lateral) e como coletor para transporte da água para região fora do terreno ou conexão com o dreno principal (Figura 39).

Vantagens

- ✔ Menor custo de instalação;
- ✔ Visualização direta de funcionamento; e
- ✔ Exerce a função de drenagem superficial e subterrânea.

Desvantagens

- ✔ Perda de área de plantio;
- ✔ Maior exigência de manutenção devido à ocorrência de desbarrancamento, assoreamento e presença de vegetação;
- ✔ Dificuldade para o tráfego de máquinas e implementos.

Os drenos abertos também podem atender aos propósitos de drenagem subterrânea (rebaixar o lençol freático), portanto, funcionando com dupla finalidade (remoção do excesso de água da superfície e do perfil do solo). O formato trapezoidal predomina e suas dimensões têm relação direta com o tipo de solo, estabelecendo inclinações seguras das paredes laterais, evitando o desbarrancamento.

A manutenção periódica de valas e canais abertos é uma necessidade, visto as consequências e danos para os sistemas produtivos. São ações de custos elevados quanto maior for a situação de obstrução do fluxo da água.

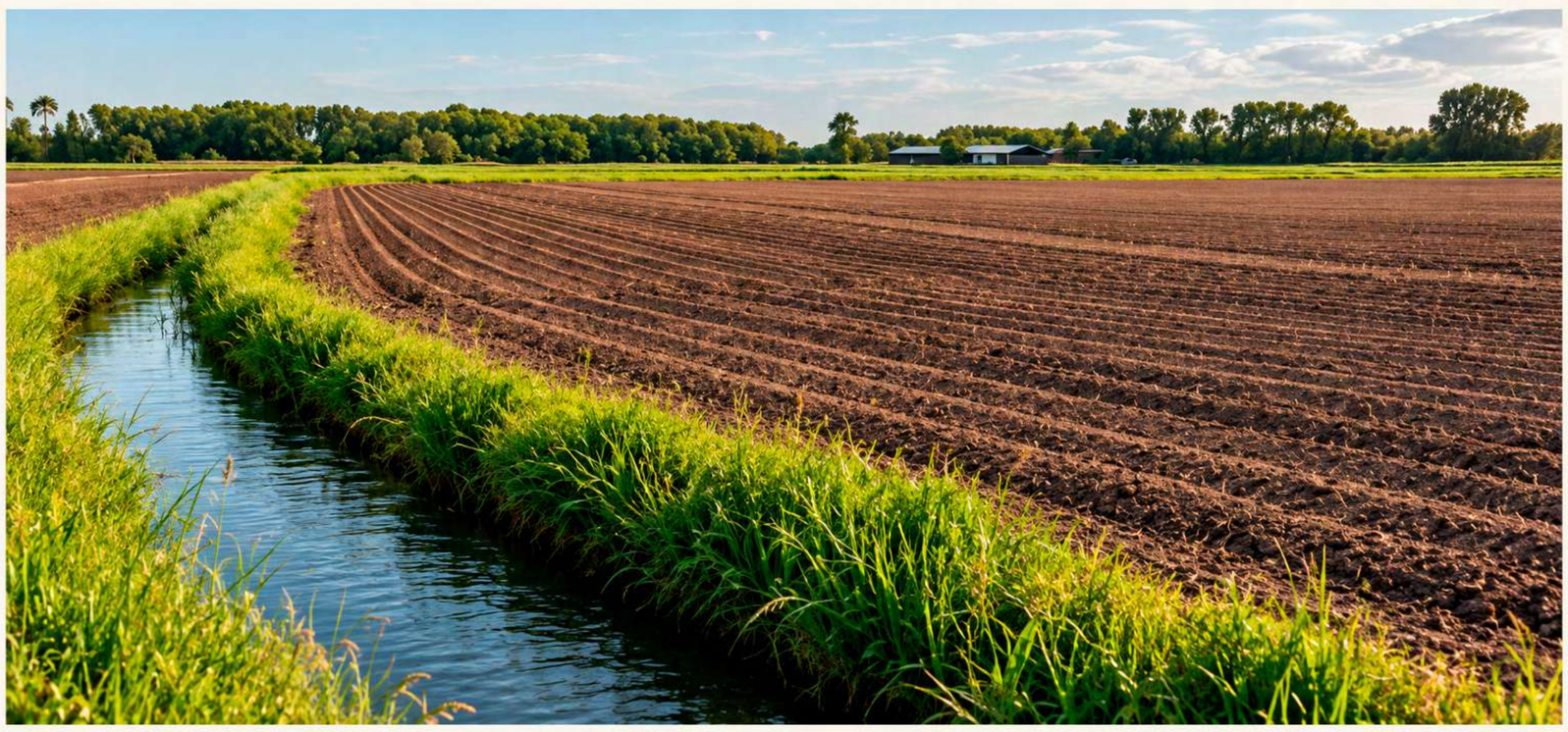


Figura 39 – Canais abertos de drenagem (https://saneagro.com.br/drenagem-agricola-fazenda-araucaria-carmo-do-rio-claro-mg).

A manutenção de drenos abertos ocorre com operações de roçagem (manual e mecanizada), retirada de sedimentos no leito, recuperação e proteção de taludes, reconfiguração de desnível adequado para escoamento, dentre outras operações (Figura 40).



Figura 40 – Serviço de manutenção (limpeza de drenos) em áreas de produção irrigada (Lucas Batista, UFOB).

Dreno torpedo

O dreno torpedo, também conhecido como dreno de toupeira, é um sistema que facilita a drenagem subterrânea, principalmente em solos argilosos, eliminando o excesso de água do perfil do solo. Nesse caso, sem a necessidade de instalação de tubulações. Também promove a descompactação e melhora as características de aeração do solo (Figura 41).

É uma alternativa técnica eficiente para solos argilosos e pesados, onde a permeabilidade natural é baixa.

O sistema utiliza um implemento agrícola acoplado ao trator (frequentemente chamado de "torpedo de drenagem") que possui uma haste vertical terminada em uma ponta cilíndrica de aço presa na horizontal. Ao ser tracionado pelo trator, cria canais (fissuras) no subsolo que permanecem aberto por algum tempo, facilitando o momento e escoamento da água. A passagem da haste provoca o fraturamento do solo. Essas “fissuras” contribuem na infiltração da água, reduzindo a ocorrência de acúmulo de água e excesso de umidade no perfil (Figura 42).

O dreno tipo torpedo é uma alternativa de melhoria do solo para drenagem do perfil, sendo uma solução bem mais econômica do que a instalação de drenos tubulares.



Figura 41 – Ilustração de dreno torpedo criando fissuras pelo tracionamento do equipamento, rompendo o perfil do solo na profundidade estabelecida.



Figura 42 – Ilustração de dreno torpedo criando fissuras (caminhos preferenciais) que facilitam o movimento e o escoamento da água para um dreno coletor.

6.1.2 Vazão a ser eliminada

A estimativa da vazão do escoamento produzido pelas chuvas ou lâmina de lixiviação em determinada área é indispensável para o dimensionamento dos canais para remoção do excesso de água.

A partir da vazão estimada, o dreno deverá ser projetado para receber e transportar as vazões que ocorrerem na área correspondente.

Quando da necessidade de eliminação de águas de chuvas, a fórmula racional, entre outras, estima a vazão máxima em uma área submetida a uma intensidade máxima de precipitação, com determinado tempo de concentração e período de retorno.

$$Q = \frac{C\ I_m\ A}{360}$$

Eq.15

Q – vazão máxima de escoamento, $m^3\ s^{-1}$;
C – coeficiente de escoamento superficial;
$\mathbf{I_m}$ – intensidade máxima de precipitação para uma duração igual de concentração e determinado período de retorno, $mm\ h^{-1}$; e
A – área de drenagem que contribui com o escoamento superficial para o dreno, ha.

Coeficiente de escoamento (C)

O coeficiente C representa a fração do volume precipitado sobre o terreno, que escoa superficialmente. A topografia, o tipo de solo e a cobertura vegetal têm influência nesse coeficiente.

É de fundamental importância em estudos hidrológicos e de engenharia para projetos de drenagem urbana e em áreas agrícolas.

O Serviço de Conservação de Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos recomenda valores do “coeficiente C” para as condições de cobertura vegetal, declividade e tipo de solo (Tabela 6).

Tabela 6 – Valores estimados do coeficiente "C" para diferentes declividades do terreno, tipos de solo e condições de uso.

Declividade (%)	Tipo de solo		
	Arenoso	Franco	Argiloso
Florestas			
0 a 5	0,10	0,30	0,40
5 a 10	0,25	0,35	0,50
10 a 30	0,30	0,50	0,60
Pastagens			
0 a 5	0,10	0,30	0,40
5 a 10	0,15	0,35	0,55
10 a 30	0,20	0,40	0,60
Terras cultivadas			
0 a 5	0,30	0,50	0,60
5 a 10	0,40	0,60	0,70
10 a 30	0,50	0,70	0,80

Máxima intensidade média de precipitação

Para o dimensionamento de drenos, vertedores, obras de proteção contra cheias e erosão hídrica, é importante conhecer as três grandezas que caracterizam uma precipitação: a intensidade, a duração e a frequência. A equação de intensidade, duração e frequência, também conhecida como equação de chuvas intensas, é a principal forma de caracterizar a relação dessas grandezas.

Muitos pesquisadores desenvolveram modelos (equações) para estimativa da intensidade máxima média de precipitação. O pioneiro no Brasil foi o Eng. Otto Pfafsftter (1957), vinculado ao Departamento de Nacional de Obras de Saneamento.

Outros pesquisadores, José Eloir Denardi e Pedro Luiz de Freitas (1982), utilizando os dados brutos de Pfafsftter, ajustaram a equação do tipo:

Eq.16

$$i = \frac{K\ T^{a}}{(t + b)^{c}}$$

i – máxima intensidade de chuva para uma duração correspondente ao tempo de concentração da bacia, mm h^{-1};
T – período de retorno, anos;
t – duração da precipitação, minutos; e
K, a, b, c – parâmetros de ajuste local.

A duração da precipitação deve ser igual ao tempo de concentração, que pode ser estimado pela equação de Kirpich:

Eq.17

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385}$$

tc – tempo de concentração, min;
L – distância entre o ponto de descarga e o ponto a montante mais distante na área de drenagem, Km; e
ΔH – diferença de nível entre o ponto de descarga e o ponto a montante mais distante na área de drenagem, m.

O tempo de concentração (t_c) é o tempo transcorrido para que uma partícula de água se desloque do ponto mais remoto da bacia hidrográfica até a sua saída. Várias equações estão disponíveis na literatura, segundo as condições de estudo e aplicação.

O período de retorno (T) é definido como o intervalo médio de tempo, geralmente em anos, em que se espera que o evento venha a ser igualado ou superado. Por exemplo, se uma chuva ocorre em média a cada 6 anos, o tempo de retorno dessa chuva é de 6 anos.

Também conhecida por Equação de Chuvas Intensas ou Equação de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), são obtidas por análises estatísticas de dados pluviométricos.

Para melhor entendimento, segue os principais passos dos estudos para determinação da equação de chuvas intensas ou IDF:

- ✔ Coletar dados pluviométricos de um período histórico longo, preferencialmente de pluviógrafos ou pluviômetros, para uma determinada localidade;
- ✔ Analisar os dados para desagregação de chuvas para obter a precipitação máxima para diferentes durações (por exemplo, 5 minutos, 10 minutos, 1 hora, 24 horas).
- ✔ Definir a duração (t) e o período de retorno (T); e
- ✔ Usar métodos estatísticos aplicados, como a regressão pelo método dos mínimos quadrados, para linearizar e ajustar a equação empírica à sua localidade.

Ferramentas computacionais (softwares) são utilizadas para análises, simulações e estimativas dos parâmetros da equação IDF em várias localidades. O software PLUVIO, desenvolvido pelo Grupo de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, está disponível gratuitamente em www.ufv.edu.br/dea/gprh.

As equações devem ser ajustadas para refletir as condições climáticas de uma determinada região, a partir de uma série histórica de dados e informações. As séries devem ter informações de no mínimo 10 anos para melhores estimativas.

6.1.3 Dimensionamento de dreno aberto - coletor

Quando for o caso de projetar o dreno coletor, este deve ser dimensionado para transportar todas as outras vazões que ocorrem na área: vazão da drenagem subterrânea, vazão decorrente do escoamento superficial, vazão do dreno de encosta e aquela proveniente de pequenos cursos d´água ou drenos naturais que percorrem a área (Figura 43).



Figura 43 – Ilustração de rede de drenagem em funcionamento com drenos abertos na ordem de dreno lateral e coletor, ambos abertos.

O dimensionamento deve atender aos critérios utilizados para canais abertos em terra, com geometria trapezoidal, predominantemente (Figura 44).

Parâmetros necessários para o dimensionamento do dreno (trapezoidal):

- ✔ Vazão a ser transportada (retirada), Q;
- ✔ Base maior do canal, B;
- ✔ Base menor do canal, b;
- ✔ Talude do canal, m;
- ✔ Rugosidade do canal, n; e
- ✔ Declividade do canal, I.



Figura 44 – Ilustração de dreno trapezoidal com os elementos geométricos.

A rugosidade do canal (dreno), a inclinação dos taludes e a velocidade da água, são função do tipo de solo e para o dimensionamento, atribui-se os coeficientes de Manning, visto a equação utilizada para estima a velocidade do escoamento.

Tabela 7 – Valores estimados da velocidade máxima da água, coeficiente de Manning e inclinação dos taludes dos canais (drenos) em função do tipo de solo.

Tipo de solo	Vel. máxima (m s^{-1})	Coef. Manning (n)	Inclinação de taludes (m)
Arenoso	0,30 - 0,70	0,030 - 0,040	3:1
Franco-arenoso	0,50 - 0,70	0,030 - 0,035	2:1 a 2,5:1
Franco-argiloso	0,60 - 0,90	0,030	1,5:1 a 2:1
Argiloso	0,90 - 1,50	0,025 - 0,030	1:1 a 2:1
Cascalho	0,90 - 1,50	0,030 - 0,035	1:1 a 1,5:1
Rocha	1,20 - 1,80	0,030 - 0,040	0,25:1 a 1:1

Área de escoamento do dreno (canal)

Eq.18

$$A = b\,h + m\,h^2$$

A – área ou seção de escoamento do canal (dreno), m^2;
b – base menor do canal, m;
h – altura de água no canal, m; e
m – talude do canal (cotangente).

Perímetro e raio molhado

Eq.19

$$P = b + 2h\sqrt{m^2 + 1}$$

P – perímetro molhado, m;
Rh – raio molhado, m.

Eq.20

$$Rh = \frac{A}{P}$$

Velocidade de escoamento no dreno (canal)

Eq.21

$$V = \frac{1}{n} Rh^{2/3} I^{1/2}$$

V – velocidade de escoamento no canal (dreno), m s^{-1};
n – coeficiente de rugosidade de Manning; e
I – declividade do canal, m m^{-1}.

É indispensável observar a declividade do canal, visto que com o aumento da velocidade a vazão também aumenta. No caso de canal em terra ou não revestido, deve-se adotar a declividade adequada e recomendada

Passo a passo:

a) Dados de entrada (Q, b, n, I);

b) Atribuir um valor de h (altura da água no dreno);

c) Estimar a velocidade da água pela equação de Manning;

d) Calcular a vazão em função da velocidade estimada (Q = A V); e

e) Comparar a vazão de projeto com a vazão calculada.

Se a vazão de projeto = vazão calculada, o valor de h atribuído estará correto. Caso contrário, o valor de h deverá ser ajustado (maior ou menor) até que a vazão calculada seja igual a vazão de projeto.

Uma alternativa de dimensionamento é fixar a carga hidráulica (h), ajustando-se a menor base (b) do dreno.

APLICAÇÃO:
Um sistema de drenagem será dimensionado para escoar uma vazão de projeto de 120 L s^{-1}. Deseja-se que o escoamento se dê com uma carga de água de 0,30 m no dreno coletor, escavado em solo franco-argiloso (coeficiente de Manning, n = 0,030). O terreno foi sistematizado com uma declividade no sentido do dreno de 0,4 %. O talude usado será de 1:1 e a profundidade total do dreno deverá ser de 1,3 m.

- ✔ Verificar se uma seção transversal de base igual a 0,20 m terá essa capacidade. Caso contrário, proponha soluções.

Q = 120 L s^{-1}
b = 0,20 m
h = 0,30 m
m= 1
n = 0,030
I = 0,40% (0,4/100 m)

Área de escoamento do dreno (canal)

$$A = 0{,}20 \times 0{,}30 + 1{,}0 \times 0{,}30 = 0{,}15\ m^2$$

Perímetro e raio molhado

$$P = 0{,}20 + 2 \times 0{,}30 \sqrt{1^2 + 1} = P = 1{,}05\ m$$

$$Rh = \frac{0{,}15}{1{,}05} = 0{,}1431\ m$$

Velocidade de escoamento no dreno (canal)

$$V = \frac{1}{0{,}030}\ 0{,}1431\ 0{,}004^{1/2} = 0{,}57\ m\ s^{-1}$$

Vazão calculada (Equação da Continuidade – Q = A v)

$$Q = 0{,}15 \times 0{,}57 = 0{,}0855\ m\ s^{-1} = 85{,}5\ L\ s^{-1}$$

Verificação
A seção de escoamento do dreno não é suficiente para escoar uma vazão de projeto de 120 L s^{-1}.

As alternativas para ajustes no dimensionamento, que permitem atender à demanda de escoamento consistem em:

a) Aumentar a carga hidráulica, h;

b) Aumentar a largura da base, b;

c) Aumentar a inclinação das paredes, m.

- ✔ A carga hidráulica é definida considerando a margem de segurança para eventuais eventos extremos e menor desgaste das próprias paredes e fundo do canal devido ao fluxo.
- ✔ A largura da base, normalmente, é mais conveniente de ajuste, mesmo se tratando de escavação com uso de máquina especial com concha sob medida.
- ✔ Qualquer que seja a modificação para ajuste na configuração do canal, há que se atender a segurança construtiva e operacional, principalmente os canais de terra em terreno para agricultura.
- ✔ No caso de ajuste na base menor no canal, o procedimento segue a mesma ordem de verificação.

Atribuindo um aumento no valor da base menor

b = 0,35 m
A = 0,195 m^2
P = 1,20 m
Rh = 0,16 m
V = 0,63 $m\ s^{-1}$

Q = 122,50 L s^{-1}
Como a vazão calculada é ligeiramente superior à vazão de projeto, as dimensões do canal oferecem segurança ao escoamento.

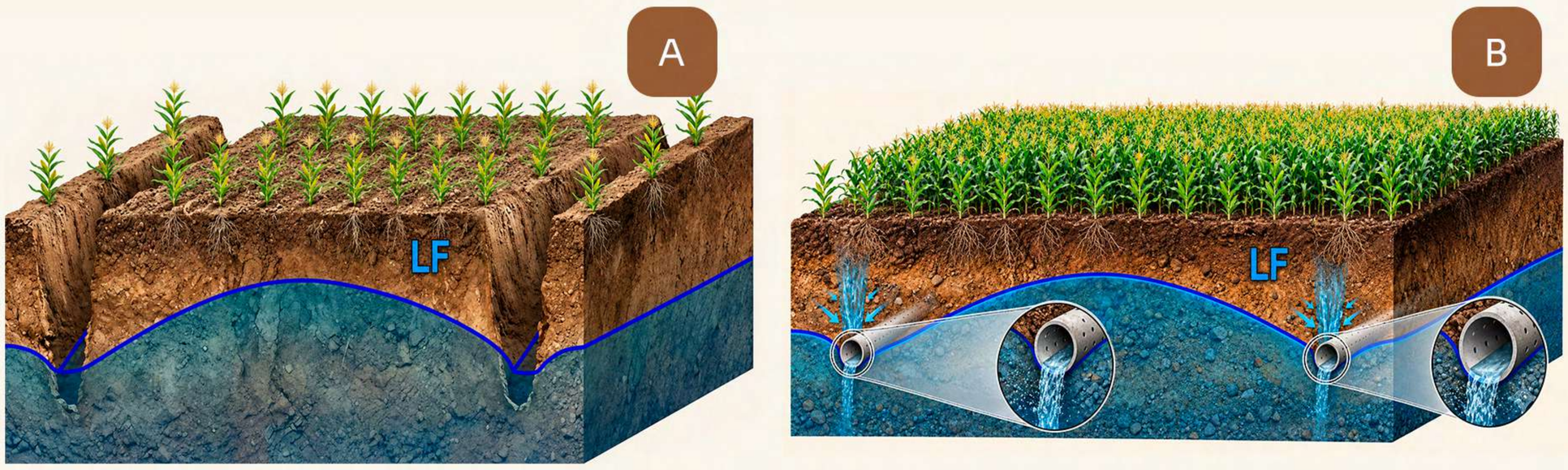


Figura 45 – Ilustrações dos sistemas de drenagem subterrânea em valas abertas (A) e em tubulações perfuradas instaladas no perfil do solo (B).

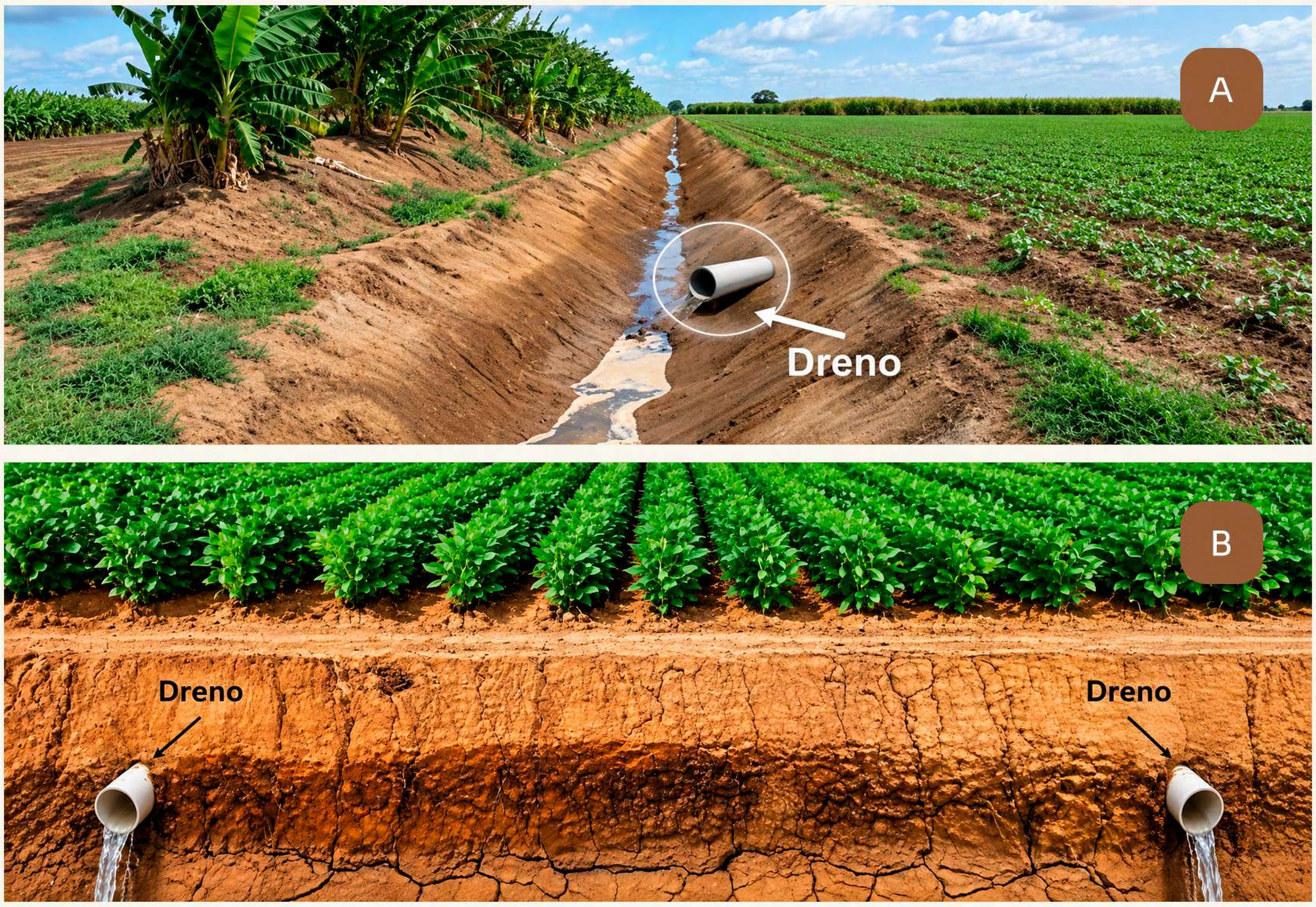


Figura 46 – Ilustrações de instalação de drenos laterais subterrâneos (A) e a formação do traçado do lençol freático no perfil do solo acima do lençol freático (B).

No caso da drenagem subterrânea há uma maior predominância de estruturas hidráulicas para remoção da água no perfil do solo, instaladas no próprio perfil em profundidades adequadas, calculadas pelas equações (modelos) para essa finalidade, segundo os regimes de fluxo.

Sistemas de drenagem subterrânea

Os sistemas, estruturas ou tipos de drenos para remoção de água do perfil do solo, são definidos levando em consideração diversos fatores de ordem técnica, agronômica, operacional e econômica, devendo ser criteriosamente analisados.

Os sistemas são apresentados como:

1. Sistema aberto;
2. Sistema fechado;
3. Sistema semiaberto.

Sistema aberto:

Toda a rede de drenos é construída em valas abertas (Figura 47).

Vantagens

- ✔ Baixo custo;
- ✔ Visualização direta do desempenho;
- ✔ Exerce a função de drenagem superficial.

Desvantagens

- Perda de área de plantio;
- Maior exigência de manutenção (desbarrancamento, assoreamento, vegetação);
- Dificuldade para o tráfego de máquinas e implementos.



Figura 47 – Ilustrações do sistema de drenagem subterrânea aberta por meio de canal lateral e coletor. Sistema fechado: Toda a rede de drenos é constituída por tubos de drenos fechados e enterrados (Figura 48).

Vantagens

- Aproveitamento de toda a área.
- Permite o tráfego de máquinas e implementos.

Desvantagens

- Elevado custo;
- Impossibilidade de visualização de obstruções (Figura 49);
- Difícil manutenção.



Figura 48 – Ilustração de instalação e funcionamento do sistema de drenagem fechado, lateral e coletor



Figura 49 – de obstrução de dreno subterrâneo e a consequente redução da seção de escoamento.

Esse sistema envolve a escavação de valas com declive contínuo, a colocação de um filtro (como areia, cascalho ou tecido), o assentamento de tubos corrugados perfurados em cima do filtro e o posterior preenchimento da vala com material de enchimento da própria escavação (Figura 50).



Figura 50 – Ilustrações de drenos fechados que permitem aproveitamento da área e tráfego de maquinários.

Toda a operação exige maquinários apropriados, podendo ser com instalação simultânea, sempre atendendo às definições de projeto e com o acompanhamento técnico especializado.

Sistema semiaberto:
Os drenos laterais são de perímetro fechado e os drenos coletores e principal são abertos.

É o sistema que melhor se adapta à maioria das condições e situações de necessidade de drenagem. Apresenta boa relação custo-benefício e pode ser recomendado para maioria das situações de necessidade de drenagem (Figura 51).



Figura 51 – Ilustrações do funcionamento do sistema de drenagem semiaberto com funções de eliminar a água da superfície e do perfil do solo.

Sistemas semiabertos de drenagem subterrânea referem-se a arranjos de drenagem que combinam drenos fechados (tubos perfurados) com elementos de drenagem aberta, como valas ou canais, para facilitar o escoamento da água sem a necessidade de uma instalação totalmente fechada ou totalmente aberta.

A instalação e o funcionamento ocorrem com drenos laterais entubados que desaguam em coletores abertos, que descarregam em um dreno principal igualmente aberto.
O sistema semiaberto pode exercer dupla finalidade, ou seja, eliminar o excesso de água da superfície e ao mesmo tempo do perfil do solo (Figura 52).



Figura 52 – Funcionamento do sistema de drenagem semiaberto com dreno coletor recebendo o escoamento da água dos drenos laterais fechados.

6.2.1 Movimento de água para os drenos

O movimento da água subterrânea para os drenos ocorre segundo os princípios da hidrodinâmica de meios porosos. Linhas de fluxo são definidas de acordo com os potenciais de energia da água no solo.

É fácil constatar que os drenos descrevem caminhos preferenciais para o escoamento da água.

Quando dois drenos são instalados em linhas paralelas, e na mesma profundidade, cada um exerce, separadamente, influência sobre o lençol até a metade do espaçamento entre os drenos.

Nesse ponto, ocorre a menor distância da superfície do solo até o lençol freático, profundidade considerada nas teorias de drenagem e consequentemente nos planejamentos de drenagem (Figura 53).

O movimento da água em direção aos drenos, sejam eles canais superficiais ou tubos subterrâneos, ocorre principalmente pela força da gravidade e pela diferença de potencial hídrico (pressão) no solo. Esse processo é fundamental para remover o excesso de água que se acumula no solo devido à chuvas ou a irrigação.

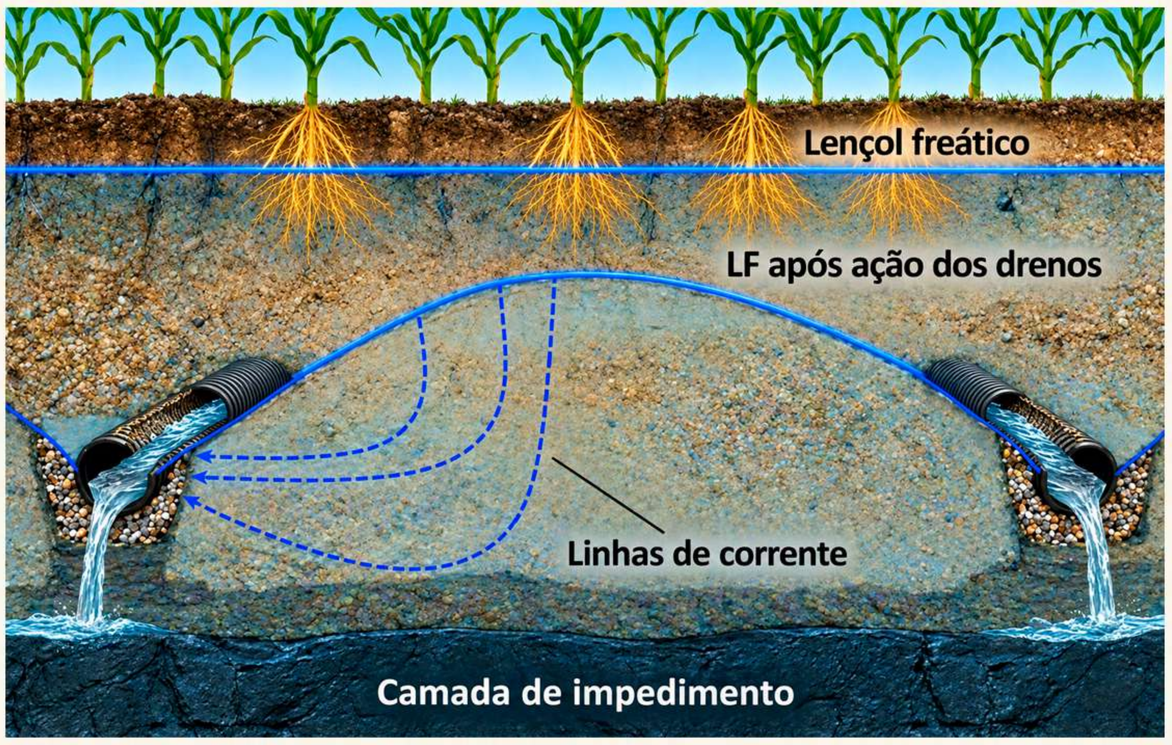


Figura 53 – IlustraçãoIA do movimento de água para os drenos indicando as linhas de corrente de corrente na entrada dos drenos decorrente da presença de zona saturada (lençol freático).

O movimento pode ser dividido em etapas:

- **Movimento vertical (infiltração):** A água da superfície, seja da chuva ou da irrigação, penetra no solo e se move verticalmente para baixo, impulsionada pela gravidade. A velocidade desse processo depende da textura, estrutura e porosidade do solo.

- **Movimento horizontal (fluxo subterrâneo):** Ao atingir o nível do lençol freático, a água começa a fluir lateralmente. Esse fluxo ocorre através dos espaços porosos do solo em direção aos pontos de menor potencial total da água, que são os drenos.

- **Movimento radial (convergência):** À medida que a água se aproxima do dreno, as linhas de fluxo convergem em direção à sua superfície. Esse movimento é radial, pois a água flui de todas as direções ao redor do dreno.

- **Entrada de água no dreno:** Por fim, a água entra no dreno, seja por uma abertura (no caso de tubos perfurados) ou pela própria estrutura porosa do solo ao redor do dreno.

6.2.2 Profundidade e espaçamento dos drenos

No dimensionamento de um sistema de drenagem, a profundidade do dreno é preestabelecida pelo projetista, correspondendo à profundidade mínima de instalação do dreno no campo, admitindo-se que a área tem uma superfície uniforme com certa declividade média.

Na maioria dos casos, a declividade dos drenos varia entre 0,1 e 0,5%, que propicia melhor escoamento.

No estabelecimento da profundidade do dreno deve-se considerar:

- ✔ A profundidade da camada impermeável do solo;
- ✔ A profundidade efetiva do sistema radicular da cultura;
- ✔ A cota do ponto de descarga da área a ser drenada;
- ✔ A profundidade máxima que a máquina consegue operar durante a instalação/abertura dos drenos. Normalmente, a profundidade dos drenos varia entre 1,0 e 2,0 m;
- ✔ O custo-benefício da instalação também pode ser um fator na decisão de profundidade e espaçamento

O espaçamento entre drenos não é um valor fixo, mas sim uma medida que depende de vários fatores para ser calculado de forma precisa e eficaz. Entre os principais fatores estão as características do solo, o tipo de cultura, a profundidade dos drenos e o regime de fluxo de água. Existem diversas equações e métodos para calcular o espaçamento, que levam em conta os fatores mencionados. Softwares de cálculo também foram desenvolvidos para auxiliar nesse processo.

Valores médios de referência estão disponíveis para avalição inicial de projetos (Tabela 8). Porém, para dimensionar corretamente o espaçamento, é essencial realizar estudos de campo. Todas as informações e estudos técnicos permitem a aplicação dos modelos matemáticos (equações) para determinar o layout mais eficiente, a profundidade e o espaçamento adequados para cada projeto.

Tabela 8 – Estimativa de valores médios de condutividade hidráulica do solo, espaçamento entre drenos e profundidade dos drenos em função do tipo de solo.

Tipo de solo	Cond. hidráulica ($mm\ dia^{-1}$)	Espaç. entre drenos (m)	Profundidade dos drenos (m)
Textura fina	< 1,5	10 a 20	1,0 a 1,5
Textura média	1,5 a 5,0	15 a 25	1,0 a 1,5
	5,0 a 20	20 a 35	1,0 a 1,5
	20,0 a 65,0	30 a 40	1,0 a 1,5
Textura grossa	65,0 a 125,0	30 a 70	1,0 a 2,0
Turfa	125,0 a 250,0	30 a 100	1,0 a 2,0

07 Equações de espaçamento entre drenos subterrâneos

07. Equações de espaçamento entre drenos subterrâneos

Em drenagem agrícola, para dimensionamento (espaçamento) dos drenos, objetivando o controle do excesso de umidade com o rebaixamento do lençol freático, são usadas equações de acordo com os regimes permanente e variável.

7.1 Regime permanente

Admite-se que o lençol freático se mantém estável ao longo do tempo em uma dada profundidade. Isso ocorre quando a quantidade de água que chega ao lençol freático é igual àquela descarregada pelos drenos.

Equações de Donann
As equações de Donann se constituem nas expressões mais simples para a determinação do espaçamento entre drenos subterrâneos, considerando apenas o escoamento horizontal da água para os drenos.

Os pressupostos definidos por Donann para o modelo admitem condições simplificadoras do solo e da recarga ou contribuição de água no terreno, que nem sempre representam uma situação real para no projeto.
Pressupostos de Donann:

- ✔ O solo é homogêneo, de condutividade hidráulica Ko, e os drenos são paralelos e espaçados entre si;
- ✔ A recarga do lençol freático, isto é, a percolação “R” é constante e se infiltra

a) Há uma camada impermeável à uma profundidade vertical “D”, abaixo dos drenos, instalados numa profundidade “P” (Figura 54).

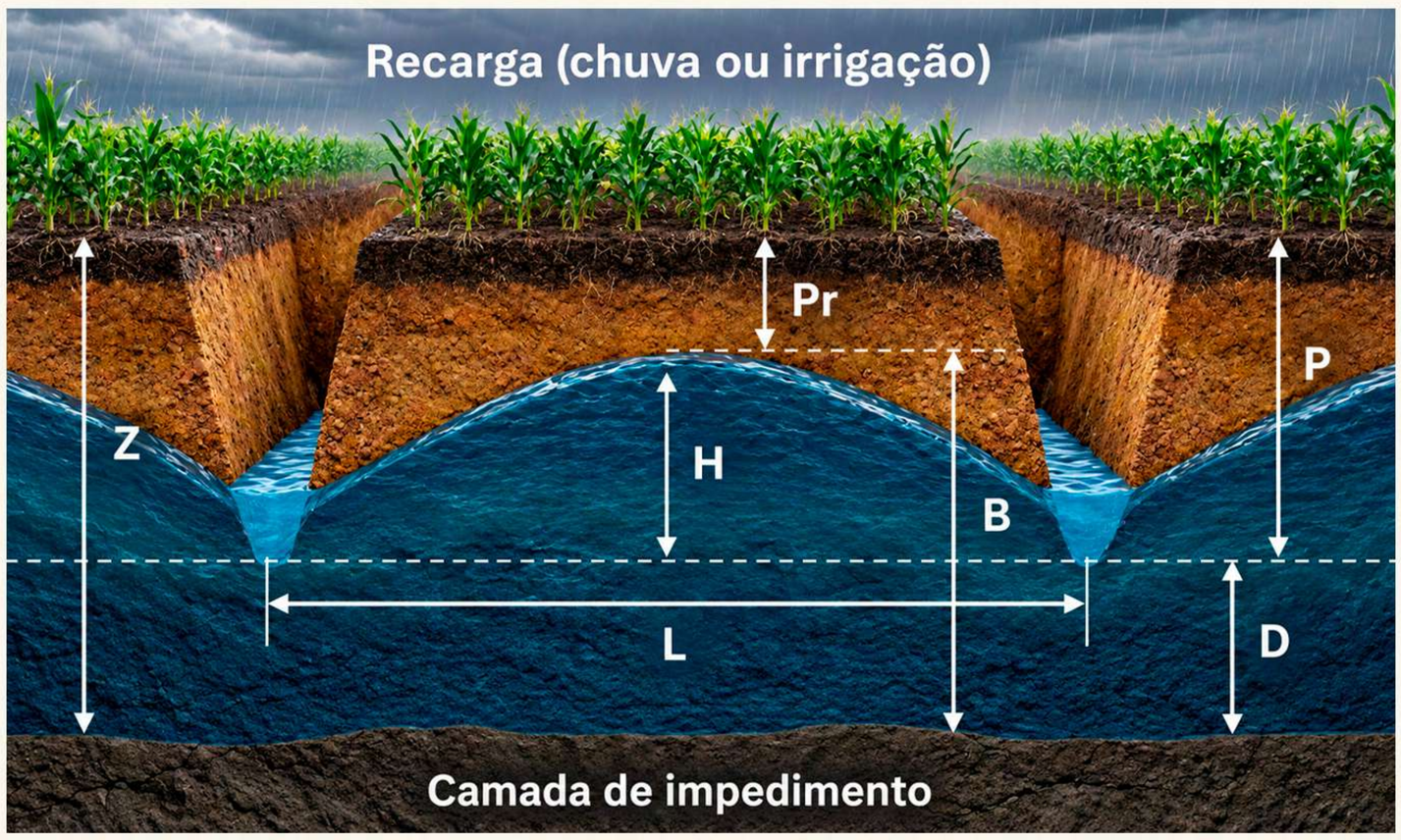


Figura 54 – Ilustração dos elementos do modelo (equação) de Donann para determinação do espaçamento dos drenos.

Eq.22

$$L^2 = \frac{4\,k_o\left(B^2 - d^2\right)}{R}$$

L – espaçamento entre os drenos, m;
K_o – condutividade hidráulica saturada, m dia^{-1};
B – distância entre a altura do LF e a camada impermeável, m;
D – distância da superfície da água até a camada impermeável, m;
R – recarga ou quantidade de água a drenar, m dia^{-1}.

APLICAÇÃO:
Uma área irrigada deve ser drenada a uma profundidade de 1,80 m. O perfil do solo apresenta uma condutividade hidráulica de 0,85 m dia^{-1} e a camada impermeável encontra-se na profundidade de 4,6 m. O sistema deve ser delineado de tal forma que, com uma recarga do excesso de água de irrigação que aumenta o L.F. em 4,0 mm dia^{-1}, o nível não ultrapasse 0,7 m da superfície (Figura 55).

✔ Determinar o espaçamento entre os drenos

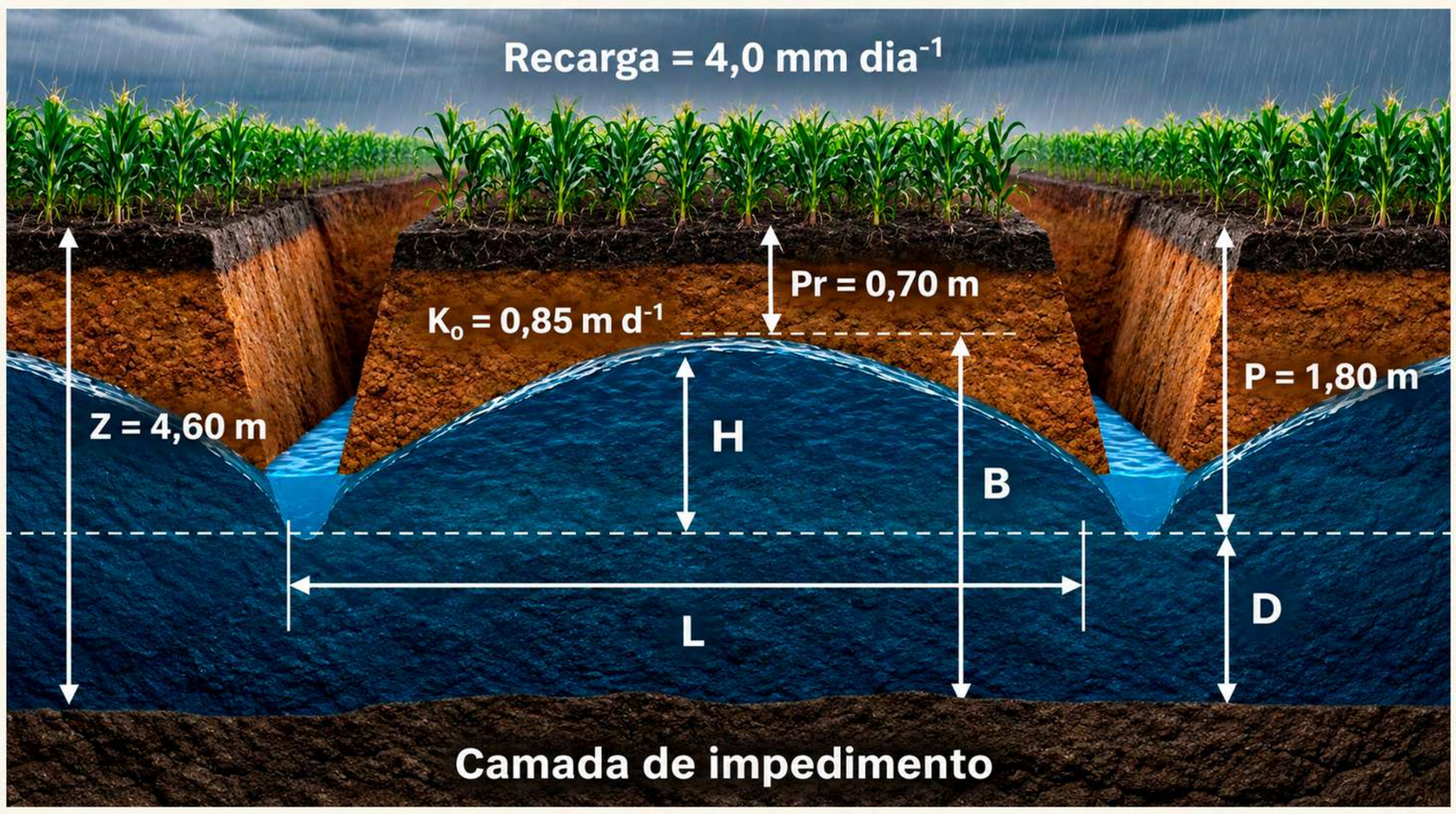


Figura 55 – Esboço gráfico de aplicação do modelo (equação de Donann) para dimensionamento do espaçamento dos drenos com camada de impedimento abaixo da profundidade de instalação.

$$L^2 = \frac{4 \times 0{,}85\left(3{,}90^2 - 2{,}80^2\right)}{0{,}004}$$

$$L = 79{,}15\ m \approx 80{,}0\ m$$

R = 4,0 mm dia^{-1}
K_o = 0,85 m dia^{-1}
D = Z – P = 4,60 – 1,80 = 2,80 m
B = Z – Pr = 4,60 – 0,70 = 3,90 m

b) A instalação dos drenos ocorre sobre a camada impermeável (H = B), ou seja, há distância nula até a barreira (D = 0,0m). Considera-se também o solo homogêneo em uma recarga constante que se infiltra totalmente no solo.

Eq.23

$$L^2 = \frac{4\, k_o\, B^2}{R}$$

APLICAÇÃO:
Após avaliação criteriosa do perfil do solo de uma área a ser drenada, identificou-se uma camada de impedimento na profundidade de 2,0 m. A condutividade hidráulica estimada foi de 0,98 m dia^{-1}. Determinar o espaçamento entre os drenos, instalados sobre a camada de impedimento, considerando que para uma recarga do excesso de água de irrigação que aumenta o L.F. em 4,0 mm dia^{-1}, o nível não ultrapasse 0,40 m da superfície (Figura 56).



Figura 56 – Esboço gráfico de aplicação do modelo (equação de Donann) para dimensionamento do espaçamento dos drenos instalados sobre a camada de impedimento.

$$L^2 = \frac{4 \times 0{,}98 \times 1{,}60^2}{0{,}004}$$

$$L \approx 50{,}0 \text{ m}$$

B = 1,60 m
R = 4,0 mm dia^{-1}
K_o = 0,98 m dia^{-1}
B = Z – Pr = 2,00 – 0,40 = 1,60 m

Equação de Fukuda
Essa equação é resultado de pesquisas do autor com solos muito argilosos e drenos tubulares instalados sobre a camada impermeável. O autor observou que a correlação entre a descarga (R) dos drenos e a altura do lençol freático (H) não era quadrática como preconizada por Donnan, mas sim uma correlação mais linear entre os drenos.

Apesar de empírica, a equação é mais recomendada para o caso de solos argilosos muito pesados, com dreno sobre a camada de impedimento. Essa condição não é comum, com raras exceções, na maioria dos solos tropicais (Figura 57).

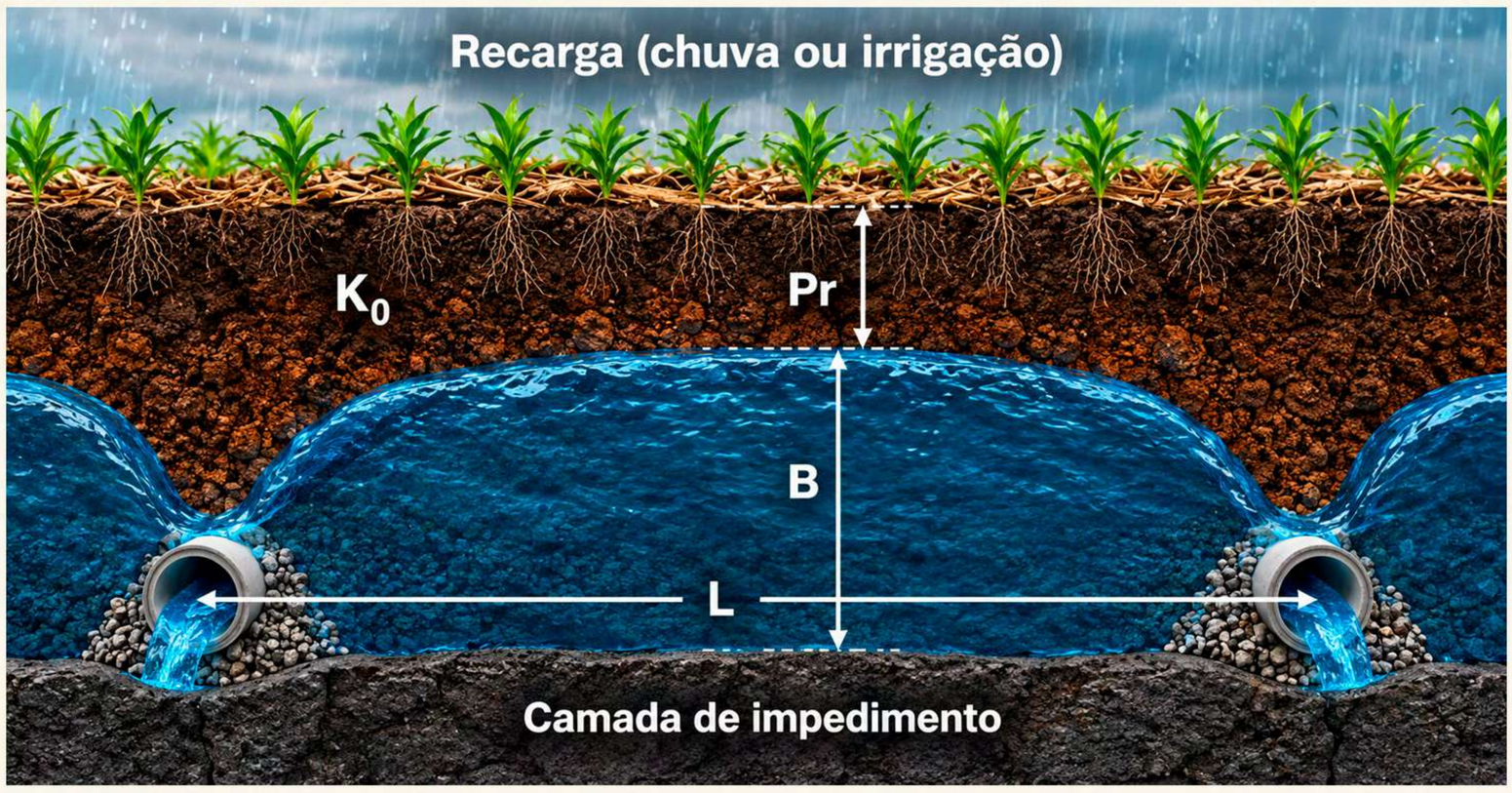


Figura 57 – Ilustração da condição de aplicação da equação de Fukuda em solos muito argilosos com drenos instalados sobre a camada de impedimento.

Eq.24

$$L^2 = \frac{1{,}5\ k_o\ B}{R}$$

Possivelmente a conformação do lençol freático que permanece praticamente plano é decorrente das características físico-hídricas dos solos argiloso e muito pesados, que apresentam elevada capacidade de permanecer com umidade excessiva, decorrente disso a necessidade de remoção por drenagem.

APLICAÇÃO:
Em uma área cultivada, cujo solo apresenta-se muito argiloso, a condutividade hidráulica é de 0,086 m dia^{-1}. Identificou-se uma camada de impedimento a 1,30 m, uma recarga do excesso de água de irrigação que aumenta o L.F. em 6,0 mm dia^{-1} e o nível não deve ultrapassar 0,35 m da superfície.

- ✔ Determinar o espaçamento entre os drenos, instalados sobre a camada de impedimento aplicando as equações de Donnan e Fukuda.

Donnan

$$L^2 = \frac{4\ k_o\ B^2}{R} = \frac{4 \times 0{,}086 \times 0{,}952}{0{,}006}$$

$$L \approx 7{,}2\ m$$

K_o = 0,086 m dia^{-1}
B = H= (1,30 – 0,35) = 0,95 m
R = 6,0 mm dia^{-1}

Fukuda

$$L^2 = \frac{1{,}5\ k_o\ B}{R} = \frac{1{,}5 \times 0{,}086 \times 0{,}95}{0{,}006} = 20{,}42\ m^2$$

$$L \approx 4{,}52\ m$$

Os espaçamentos se mostram economicamente inviáveis, no entanto, a equação de Fukuda parece estar mais coerente, considerando as condições na área com a possível conformação plana do lençol freático.

Equação de Hooghoudt
Utilizando as mesmas suposições de Donnan, a equação de Hooghoudt é amplamente utilizada no dimensionamento de sistemas de drenagem subterrânea em áreas agrícolas, considerando: solo homogêneo e estratificado, drenos paralelos, infiltração total da precipitação (recarga), sendo essa igual a descarga dos drenos, mantendo o lençol freático na posição desejada para a cultura (Figura 58).

a) Aplicação em um perfil do solo não estratificado, com condutividade hidráulica uniforme em toda a profundidade.

Eq.25

$$L^2 = \frac{4\ k_o \left(H^2 + 2\ H\ D \right)}{R}$$

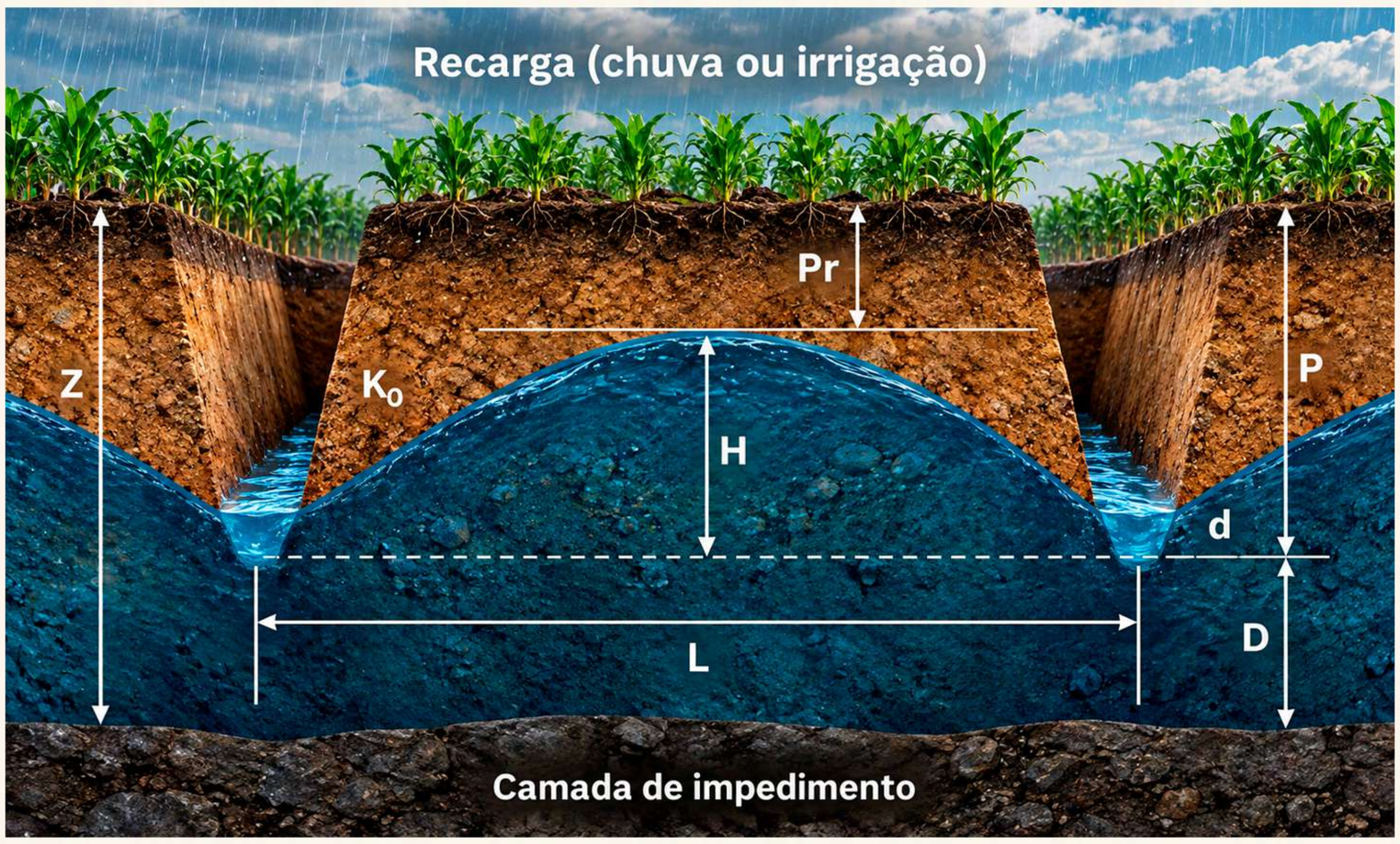


Figura 58 – Ilustração do modelo (equação de Hooghoudt) para dimensionamento do espaçamento dos drenos com camada de impedimento abaixo da profundidade de instalação do dreno e com isso o solo não estratificado.

O entendimento do solo não estratificado (homogêneo) e a condutividade hidráulica uniforme no perfil encontram validação na maioria dos solos tropicais numa profundidade razoávelmente superior à zona radicular das culturas.

APLICAÇÃO:
Uma área irrigada deve ser drenada a uma profundidade de 1,80 m. O perfil do solo apresenta uma condutividade hidráulica de 1,25 m dia^{-1} e camada impermeável encontra-se na profundidade de 3,4 m. O sistema deve ser delineado para uma condição de recarga do excesso de água de irrigação que aumenta o L.F. em 11,0 mm dia^{-1}, de forma que o nível não ultrapasse 0,40 m da superfície (Figura 59).

✔ Determinar o espaçamento entre os drenos.

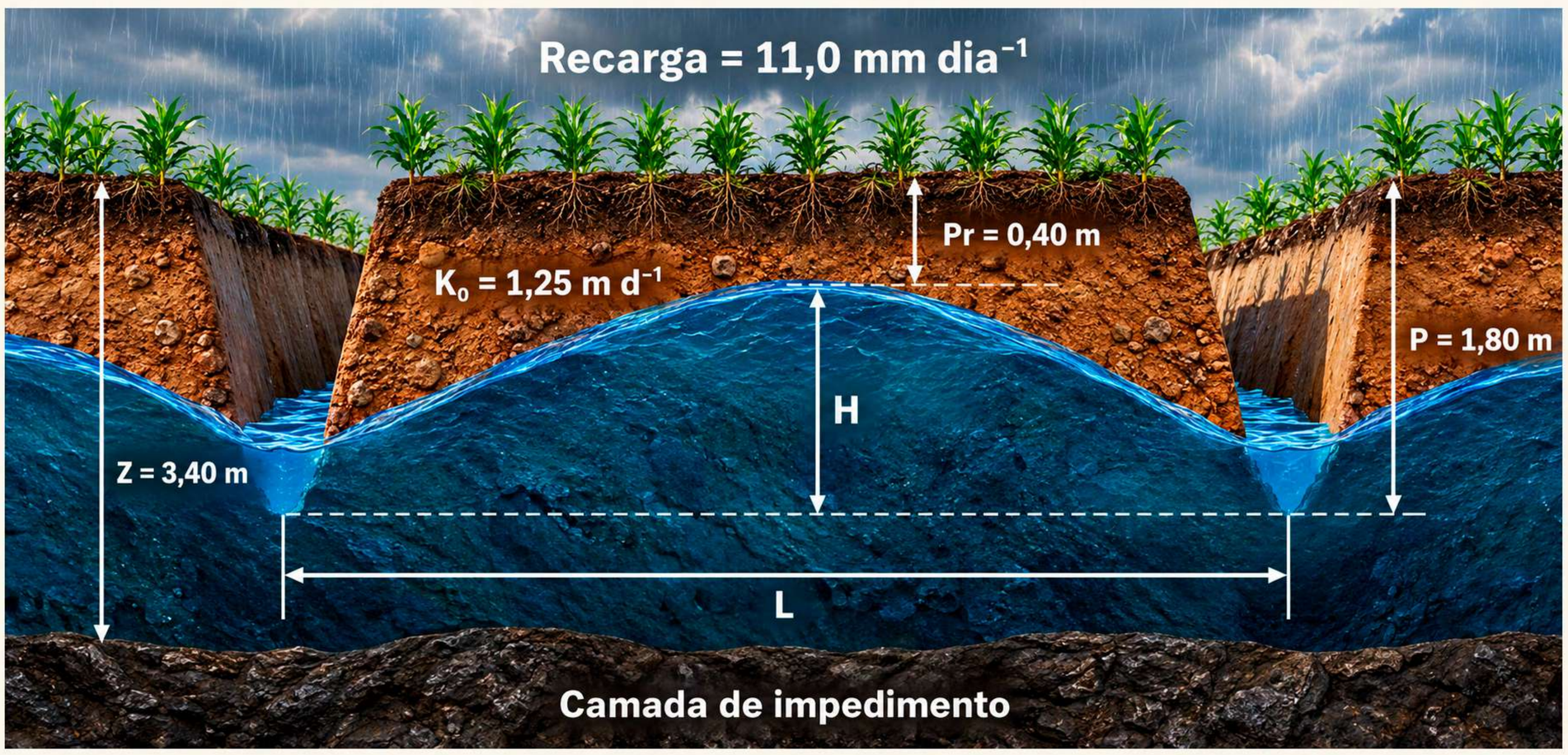


Figura 59 – Esboço gráfico de aplicação do modelo (equação de Hooghoudt) para dimensionamento do espaçamento dos drenos com camada de impedimento abaixo da profundidade de instalação e solo não estratificado.

$$L^2 = \frac{4 \times 1{,}25 \left(1{,}402 + 2 \times 1{,}40 \times 1{,}6 \right)}{0{,}011}$$

$$L \approx 54{,}0 \text{ m}$$

R = 11,0 mm dia^{-1}
K_o = 1,25 m dia^{-1}
D = Z – P = 3,40 – 1,80 = 1,60 m
H = Z – Pr = 1,80 - 0,40 = 1,40 m

b) O perfil do solo apresenta-se estratificado, com condutividade hidráulica diferenciada na profundidade, com os drenos instalados na interface dos estratos. Essa condição se aproxima da maioria dos solos (Figura 60).
Portanto, o modelo (equação) passa a ser:

Eq.26

$$L^2 = \frac{4\ k_1 H^2}{R} + \frac{8\ k_2 H D}{R}$$

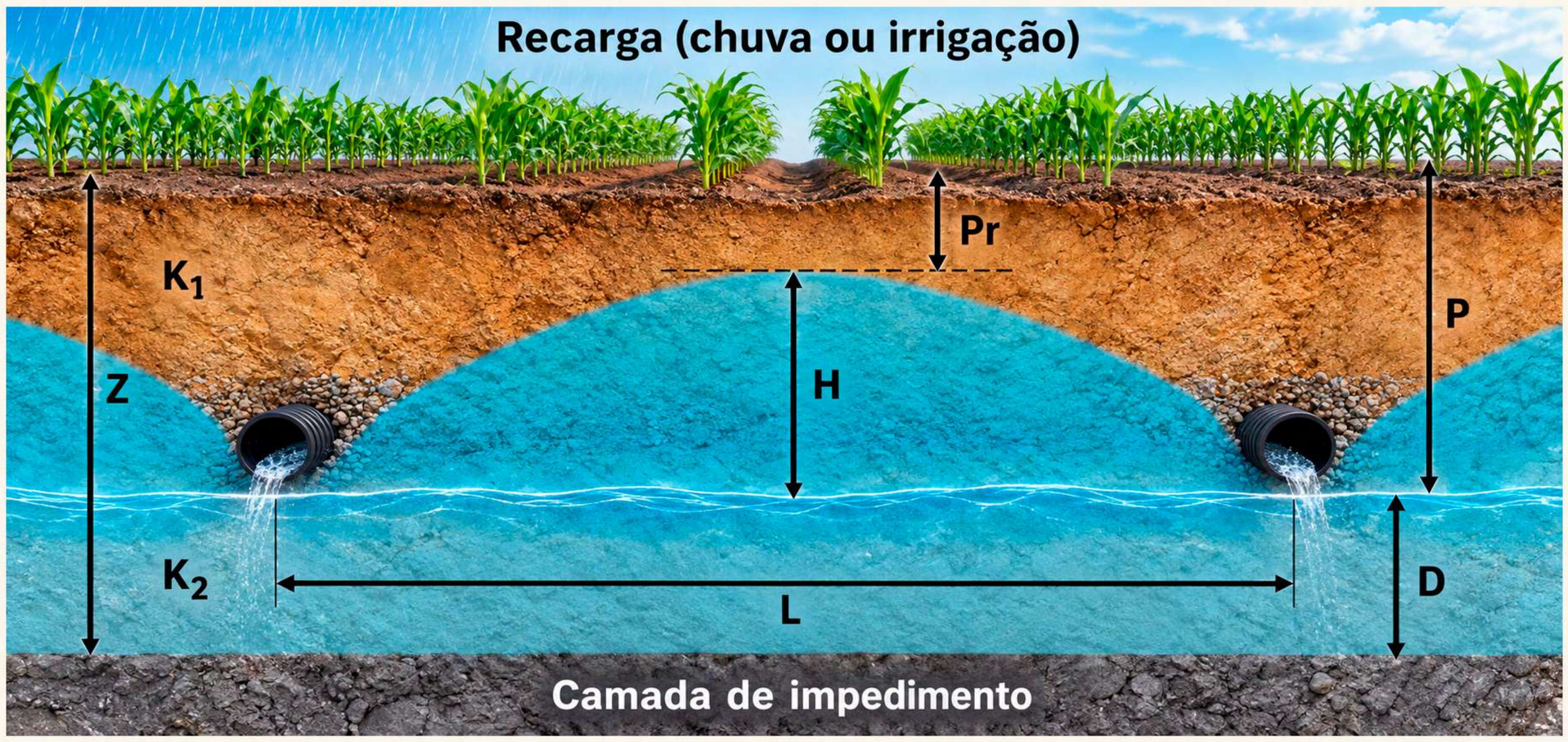


Figura 60 – Ilustração do modelo (equação de Hooghoudt) para dimensionamento do espaçamento dos drenos com camada de impedimento abaixo da profundidade de instalação e solo estratificado.

APLICAÇÃO:
O solo apresenta um perfil estratificado com condutividades hidráulicas de 1,22 m dia^{-1} no estrato superior e 0,98 m dia^{-1} no estrato inferior. A camada impermeável encontra-se na profundidade de 3,7 m. O sistema deve ser delineado para uma recarga do excesso de água que aumenta o L.F. em 6,30 mm dia^{-1}. O nível do LF não deve ultrapassar 0,40 m da superfície.

- ✔ Determinar o espaçamento entre os drenos, para uma profundidade de instalação de 1,80 m.

$$L^2 = \frac{4 \times 1{,}22 \times 1{,}40^2}{0{,}0063} + \frac{8 \times 0{,}98 \times 1{,}40 \times 1{,}90}{0{,}0063}$$

$$L = 70{,}0 \text{ m}$$

$R = 6{,}30$ mm dia^{-1}
$K_1 = 1{,}22$ m dia^{-1}
$K_2 = 0{,}98$ m dia^{-1}
$D = Z - P = 3{,}70 - 1{,}80 = 1{,}90$ m
$H = P - Pr = 1{,}80 - 0{,}40 = 1{,}40$ m

Equação de Hooghoudt - corrigida

Como o fluxo de água ocorre não apenas horizontalmente, mas também radialmente em direção aos drenos, ou seja, há efeito da convergência do escoamento, a equação de Hooghoudt corrigida considera o conceito de "camada ou estrato equivalente" como sendo uma menor distância entre o fundo dos drenos e a camada impermeável (Figura 61).

Para a condição de solo estratificado e o dreno instalado entre as camadas de diferentes condutividades hidráulicas, tem-se:

Eq.27

$$L^2 = \frac{4\ k_1 H^2}{R} + \frac{8\ k_2 H d_e}{R}$$

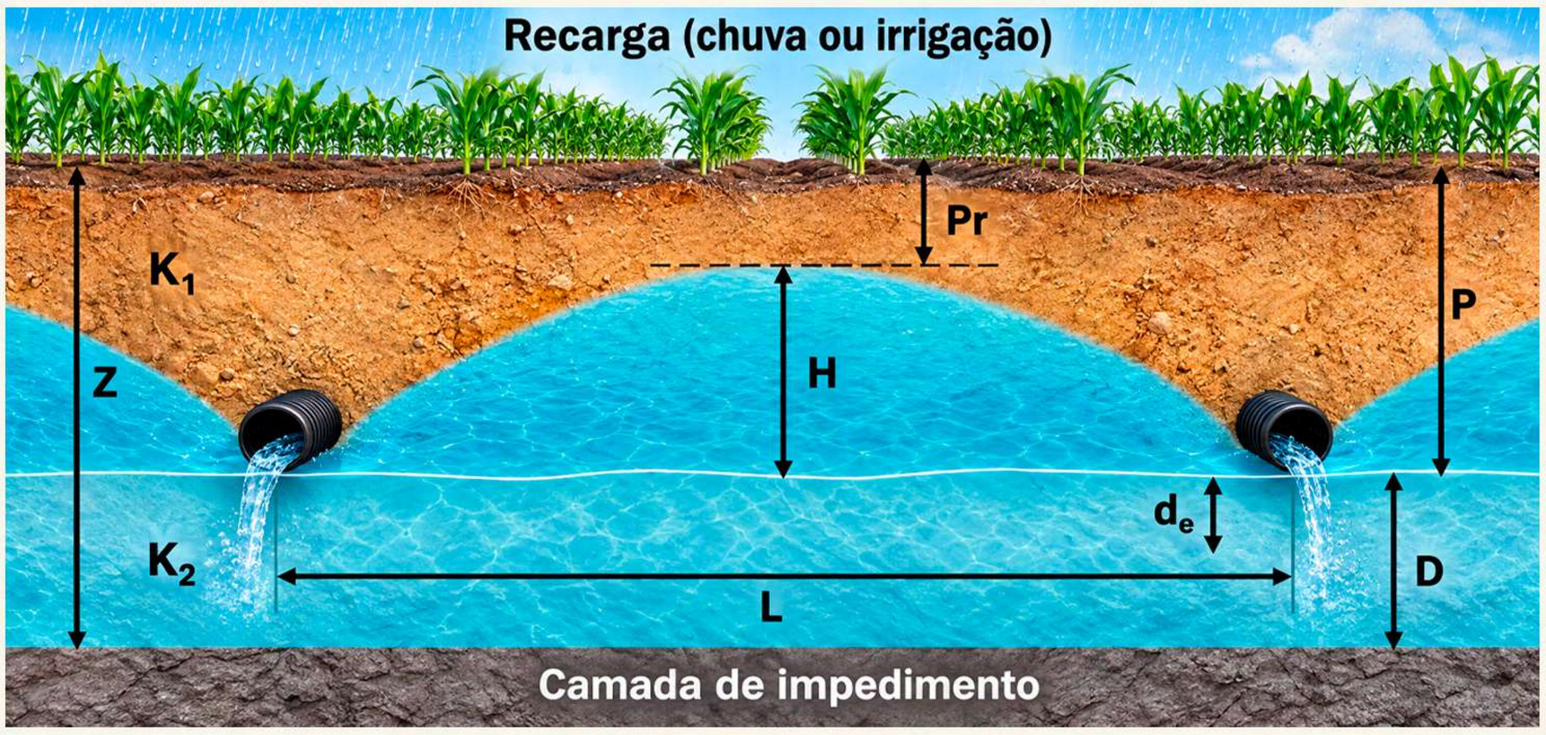


Figura 61 – Ilustração do modelo (equação) de Hooghoudt corrigido para uma camada equivalente à uma certa distância do fundo dos drenos e a camada de impedimento, com solo estratificado.

Sendo a camada equivalente (d_e):

$$d_e = \frac{D}{2{,}55 \left(\frac{D}{L_{est}}\right) \ln\left(\frac{D}{P_m}\right) + 1}$$

Eq.28

L_{est} – espaçamento estimado, m;
P_m – perímetro molhado do dreno, m.

A determinação do espaçamento entre os drenos (L) ocorre por tentativas, fazendo com que o valor de L seja aproximadamente igual a $L_{est.}$

- ✔ Atribui-se um valor de "Lest" para determinação de "d_e", uma vez também definido o perímetro molhado dos drenos;
- ✔ Com o valor de "d_e" é calculado o valor "L" pela equação;
- ✔ Esse procedimento se repete tantas vezes até que o valor de "L" se aproxime do valor de "Lest".

Esse procedimento é facilmente realizado com as rotinas disponíveis em calculadoras programáveis, aplicativos e recursos do Microsoft Excel.

Correção de van Beers

Para substituir o processo de tentativas para determinação da camada equivalente (d_e), van Beers propôs um fator de correção (C). O valor "L" final é subtraído desse fator.

Portanto:

$$C = D \ln\left(\frac{P}{P_m}\right)$$

Eq.29

APLICAÇÃO:
Numa área a ser drenada o solo apresenta um perfil estratificado com valores de condutividades hidráulica de 1,22 m dia^{-1} na camada superior e 0,98 m dia^{-1} na camada inferior A camada impermeável encontra-se à 3,7 m. O sistema de drenagem proposto deve ser delineado para uma recarga do excesso de água que infiltra cerca de 6,30 mm dia^{-1} (Figura 62).

De acordo com a cultura a recomendação é que o nível do LF não deve ultrapassar 0,40 m da superfície.

- ✔ Determinar o espaçamento entre os drenos, instalados à 1,80 m, sendo esses com diâmetro de 110 mm e seção de escoamento pela metade.

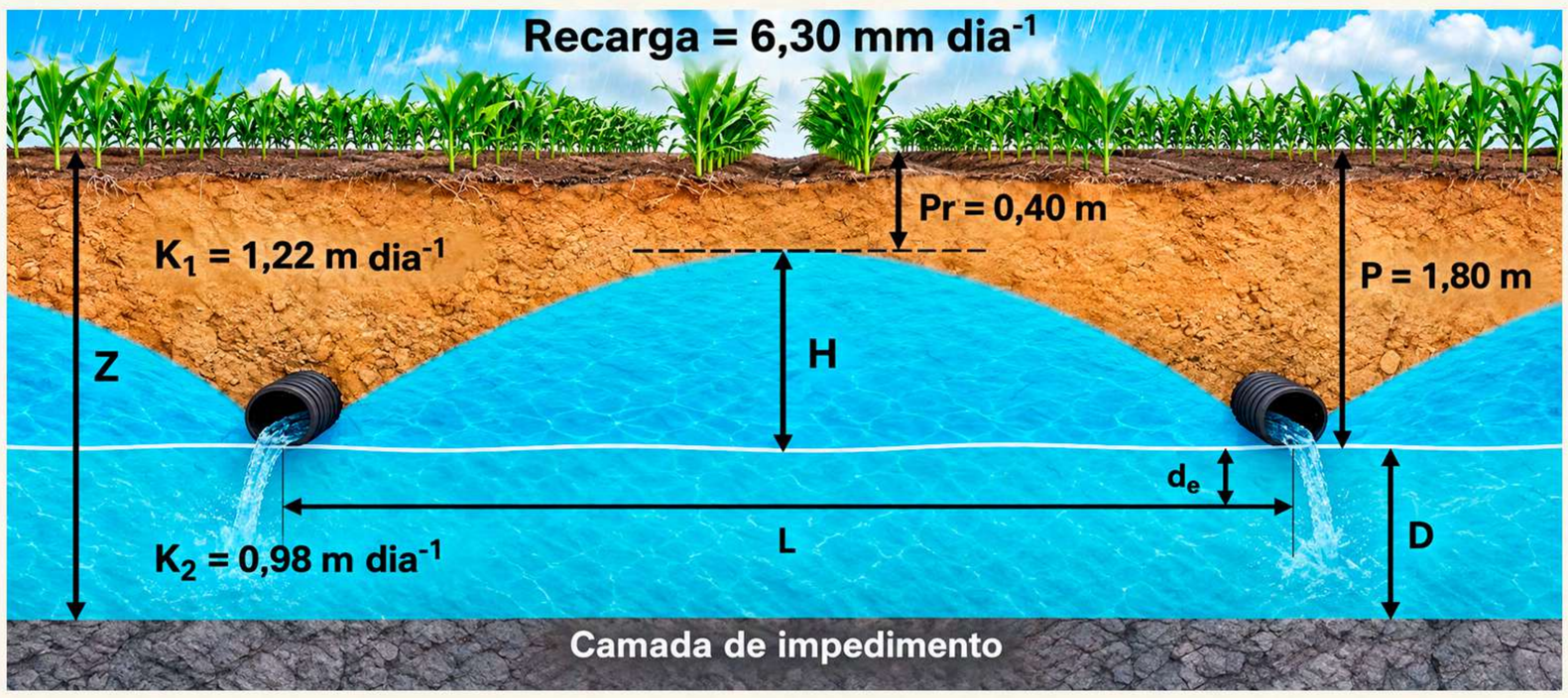


Figura 62 – Esboço gráfico da aplicação do modelo (Hooghoudt) para dimensionamento do espaçamento dos drenos com solos estratificado, com correção de van Beers.

$$L^2 = \frac{4 \times 1{,}22 \times 1{,}40^2}{0{,}0063} + \frac{8 \times 0{,}98 \times 1{,}40 \times 1{,}90}{0{,}0063}$$

$$L = 69{,}50 \text{ m}$$

Correção de van Beers
Tubo corrugado de polietileno com diâmetro nominal de 110,0 mm e diâmetro interno de 96,0 mm. Os drenos devem funcionar com metade da seção de escoamento, portanto, perímetro molhado = π r.

$$C = 1{,}90 \times \ln\left(\frac{1{,}80}{\pi\ 0{,}048}\right) = 4{,}71 \text{ m}$$

O comprimento final (L') do espaçamento entre os drenos, será:

$$L' = 69{,}50 - 4{,}71 \qquad L' \approx 65{,}0 \text{ m}$$

7.2 Regime variável

No regime variável, a posição do lençol freático se eleva em decorrência de chuva ou irrigação, ou desce quando cessam esses eventos. Em condições de precipitações pluviais de alta intensidade e curta duração, a teoria do regime variável é mais aplicável.

Em climas tropicais ou subtropicais, onde as chuvas são intensas e intermitentes, o regime permanente é ineficiente. O regime variável permite projetar um sistema que "aceita" a subida do lençol, focando na recuperação da aeração do solo logo em seguida.

Em áreas irrigadas, o regime variável é usado para calcular o tempo necessário para que a água de lixiviação (que carrega os sais) passe pelo perfil do solo e saia pelos drenos, evitando o acúmulo de sais na zona radicular.

As equações para cálculo do espaçamento entre os drenos consideram a movimentação vertical do lençol freático, ou seja, a sua elevação decorrente de chuva ou irrigação e o rebaixamento ocasionado pela remoção do excesso.

No caso de regime variável, o lençol freático deve ser rebaixado em um tempo “t”, expresso em dias, de uma profundidade inicial em relação a superfície do terreno, supondo que não haverá recarga durante “t” dias (a capacidade de descarga dos drenos não corresponde a recarga por chuva ou irrigação na área).

São duas as condições apresentadas para a estimativa do espaçamento entre drenos:

- ✔ Drenos sobre a camada de impedimento;
- ✔ Drenos afastados da camada de impedimento.

Equação de Boussinesq-Glover
Desenvolvida para a condição de “barreira rasa”, considerando apenas o movimento horizontal em direção aos drenos (Figura 63).

Estudos comparativos indicam que esta é a melhor equação de regime variável para estimar o espaçamento quando os drenos tocam a camada impermeável, superando em precisão outros modelos nas condições específicas.

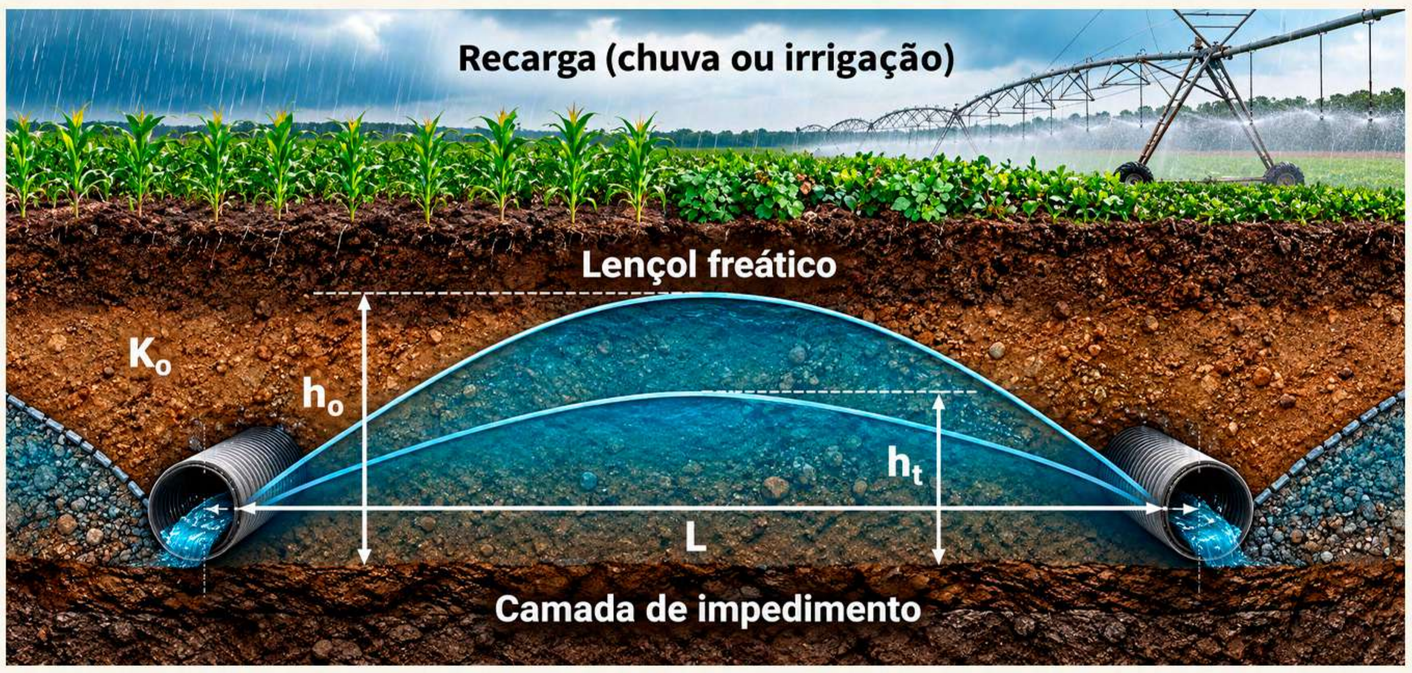


Figura 63 – Ilustração do modelo (equação) de Boussinesq-Glover para a condição de instalação dos drenos sobre a camada de impedimento.

Eq.30

$$L^2 = \frac{9\,K_o\,t}{2\alpha}\left[\frac{h_o\ h_t}{\left(h_o - h_t\right)}\right]$$

L – espaçamento entre os drenos, m;
K_o – condutividade hidráulica do solo saturado, m dia^{-1};
t – tempo necessário para o rebaixamento do LF, dias;
α – porosidade drenável do solo, decimal;
h_o – altura do LF, sobre a camada de impedimento, logo após a recarga, m; e
h_t – altura do LF após passados "t" dias, m.

APLICAÇÃO:
Para a drenagem de uma área agrícola as informações de estudos são as seguintes:

- ✔ Camada impermeável: 3,30 m de profundidade;
- ✔ Condutividade hidráulica do solo saturado: 0,45 m dia^{-1};
- ✔ Tempo necessário para o rebaixamento do LF: 15 dias;
- ✔ Porosidade drenável do solo: 7%;
- ✔ Coeficiente de escoamento do solo: 0,50;
- ✔ Equação de chuva intensa da região:

$$i = \frac{1436{,}743\ T^{0{,}125}}{(t + 24{,}980)^{0{,}781}}$$

i – intensidade da chuva, mm h^{-1};
T – tempo de retorno, anos; e
t – duração da chuva, minutos.

Considerar uma chuva com duração (t) de 6 horas, tempo de retorno (T) de 5 anos e altura do LF após rebaixamento: 50 cm.

- ✔ Determinar o espaçamento entre os drenos (Figura 64).

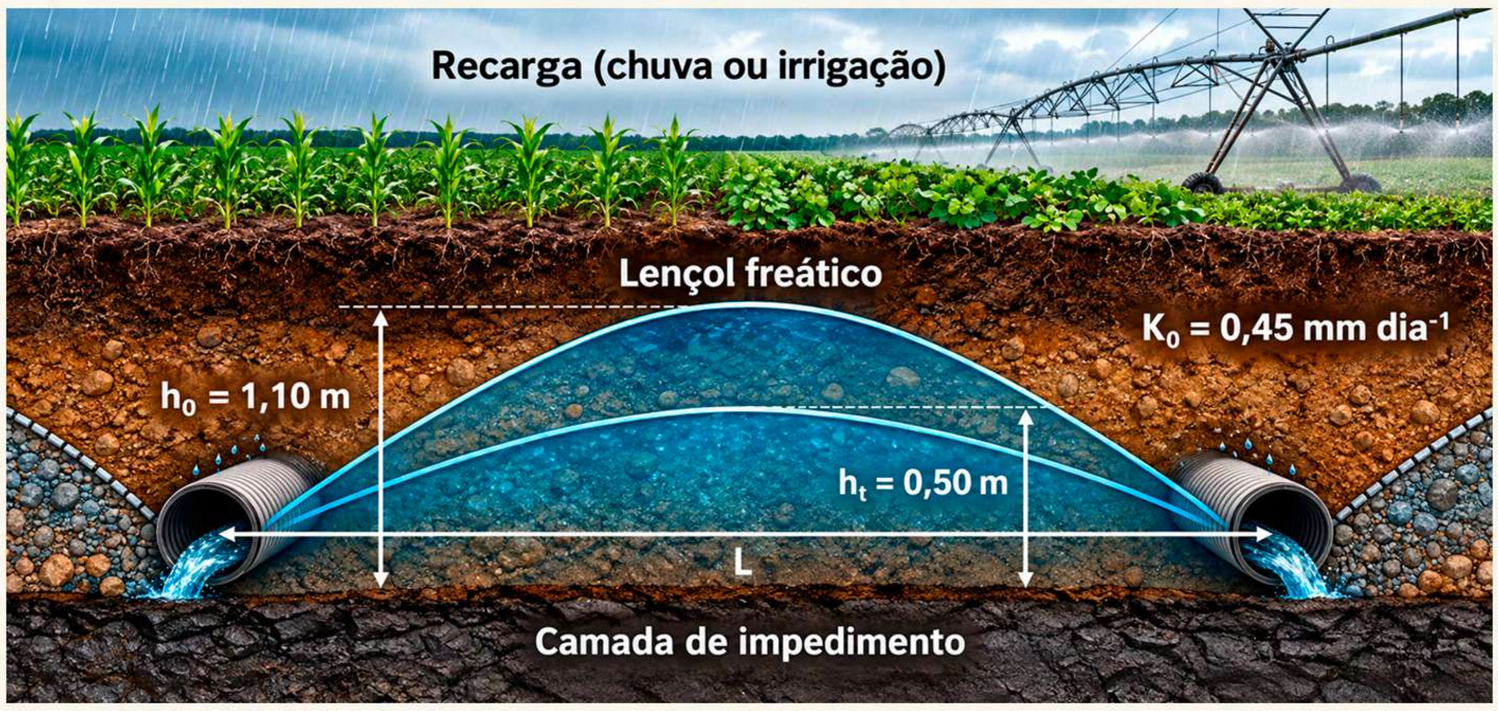


Figura 64 – Esboço gráfico da aplicação do modelo (equação) de Boussinesq-Glover para a condição de instalação dos drenos sobre a camada de impedimento.

Para uma chuva com duração de 6 h e tempo de retorno de 5 anos:

$$i = \frac{1436,7 \times 5^{0,125}}{(360 + 24,980)^{0,781}} = 16,8 \text{ mm h}^{-1}$$

- Total precipitado = 16,8 mm h^{-1} x 6 horas = 100,8 mm;
- Considerando um coeficiente de escoamento de 0,50, a quantidade infiltrada corresponde a 50,4 mm;
- Para uma porosidade drenável de 7%, a infiltração de água equivale a uma altura de 72,0 cm;
- Para uma altura do LF de 50 cm entre os drenos, a altura de água após a chuva seria de 1,22 m, que ultrapassa 1,10 m de profundidade do solo até a camada impermeável. Essa diferença, em excesso, corresponde ao escoamento superficial que ocorreu;
- Assim, o LF aflorou a superfície: h_o = 1,10 m e o excedente dever ser drenado superficialmente.

$$L^2 = \frac{9 \times 0,45 \times 15}{2 \times 0,07} \left[\frac{1,10 \times 0,50}{1,10-0,50} \right]$$

L = 20,0 m

(Verificar a viabilidade técnica e econômica de drenos nesse espaçamento.)

Equação de Glover-Dumm

Desenvolvida para a condição de drenos afastados da camada de impedimento, portanto, deve ser utilizada a correção de van Beers ou o conceito de camada equivalente (Figura 65).

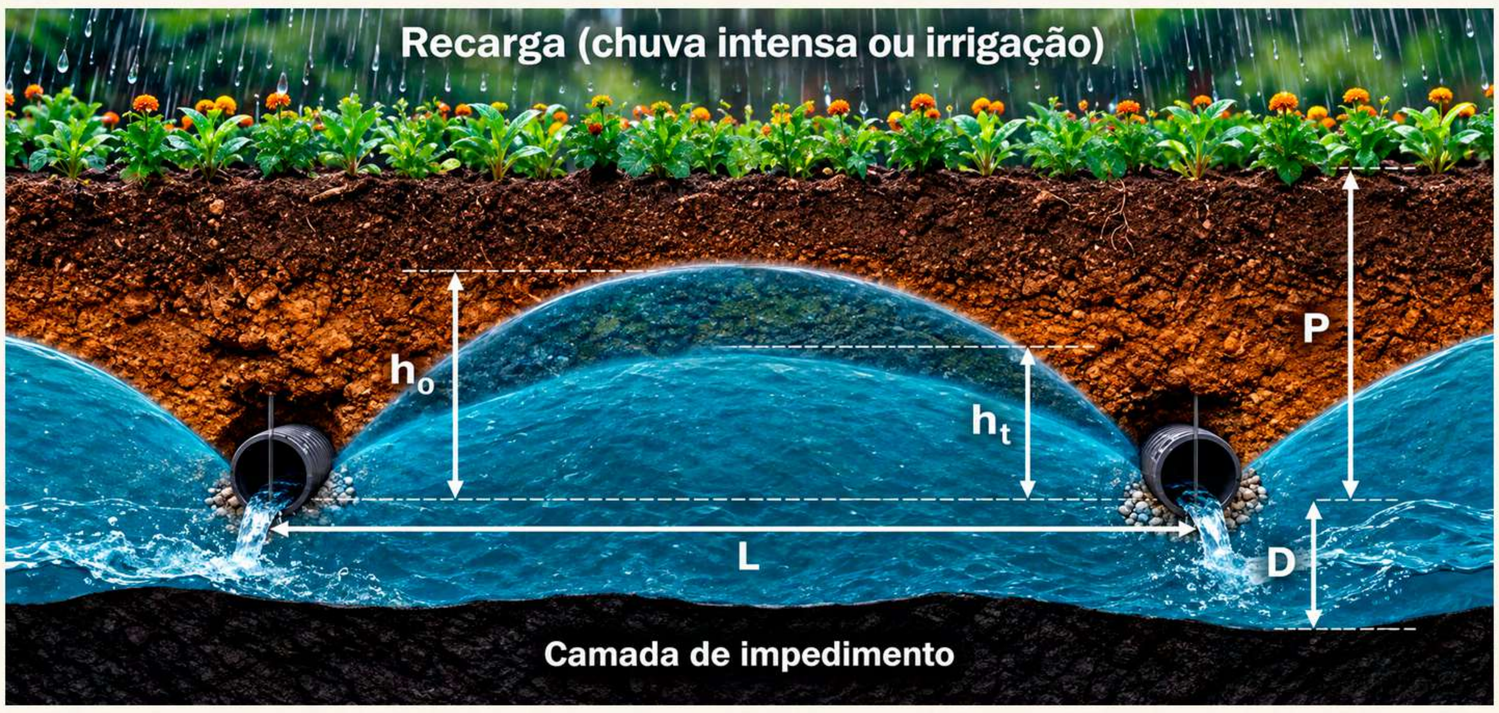


Figura 65 – Ilustração do modelo (equação) de Glover-Dumm para dimensionamento do espaçamento entre os drenos, afastados da camada de impedimento.

Eq.31

$$L^2 = \frac{\pi^2 K_o D t}{\alpha \ln\left(1{,}16 \frac{h_o}{h_t}\right)}$$

APLICAÇÃO:

- ✔ Camada impermeável: 3,30 m de profundidade;
- ✔ Profundidade dos drenos: 1,50 m
- ✔ Condutividade hidráulica do solo saturado: 0,45 m dia^{-1};
- ✔ Tempo necessário para o rebaixamento do LF: 15 dias;
- ✔ Porosidade drenável do solo: 7%;
- ✔ Coeficiente de escoamento do solo: 0,50;
- ✔ Equação de chuva intensa da região:

$$i = \frac{1436{,}7\ T^{0{,}125}}{(t + 24{,}980)^{0{,}781}}$$

i – intensidade da chuva, mm h^{-1};
T – tempo de retorno, anos; e
t – duração da chuva, minutos.

- ✔ Considerar uma chuva com duração (t) de 6 horas, tempo de retorno (T) de 5 anos e altura do LF após rebaixamento: 50 cm.

Determinar o espaçamento entre os drenos.

$$L^2 = \frac{\pi^2 \times 0{,}45 \times 1{,}80 \times 15}{0{,}07 \times \ln\left(1{,}16\,\frac{1{,}47}{0{,}90}\right)}$$

L = 51,77 m

K_o = 0,45 m dia^{-1}
t = 15 dias
α = 0,07
D = 3,30 – 1,50 = 1,80 m
h_o = 1,47 m (altura inicial = 0,75mm + lâmina de 72,0 mm)
h_t = 0,90 m (prof. dos drenos = 1,5 m – prof. do LF após rebaixamento = 0,60 m)

Correção de van Beers

Tubo corrugado de polietileno com diâmetro nominal de 110,0 mm e diâmetro interno de 96,0 mm. Os drenos devem funcionar com metade da seção de escoamento, portanto, perímetro molhado = π r.

$$C = 1{,}90 \times \ln ln\left(\frac{1{,}50}{\pi 0{,}048}\right) = 4{,}13 \text{ m}$$

O comprimento final (L') do espaçamento entre os drenos, será:

L' = 51,77 – 4,13 ≈ 47,60 m

Equação de Schilfgaarde

A equação foi desenvolvida para descargas instantâneas e drenos também afastados da camada de impedimento.

Em muitos estudos a equação de Schilfgaarde é comparada com outras fórmulas de drenagem para avaliar a precisão dos resultados. Pesquisas mostram que essa equação apresenta um bom desempenho. Não é tão popular quanto a equação de Glover-Dumm.

Eq.32

$$L^2 = \frac{9\,K_o\,D\,t}{\alpha \ln\left[\frac{h_o\left(2D + h_t\right)}{h_t\left(2D + h_o\right)}\right]}$$

APLICAÇÃO:

Considerando as mesmas condições anteriores, determinar o espaçamento entre os drenos para a condição anterior utilizando a equação de Schilfgaarde, com a correção de van Beers.

$$L^2 = \frac{9 \times 0{,}45 \times 1{,}80 \times 15}{0{,}07 \ln \left[\frac{1{,}47 \left(2 \times 1{,}80 + 0{,}90 \right)}{0{,}90 \times \left(2 \times 1{,}80 + 1{,}47 \right)} \right]}$$

$K_o = 0{,}45 \text{ m dia}^{-1}$
$t = 15$ dias
$\alpha = 0{,}07$
$h_o = 1{,}47$ m
$h_t = 0{,}90$
$D = 1{,}80$ m

L = 64,85 m

Correção de van Beers

Tubo corrugado de polietileno com diâmetro nominal de 110,0 mm e diâmetro interno de 96,0 mm. Os drenos devem funcionar com metade da seção de escoamento, portanto, perímetro molhado = π r.

$$C = 1{,}80 \times \ln \left(\frac{1{,}50}{\pi 0{,}048} \right) = 4{,}13 \text{ m}$$

O comprimento final (L') do espaçamento entre os drenos, será:

L' = 64,85 – 4,13 ≈ 60,70 m

Comparando com o modelo de Glover-Dumm, verifica-se que a equação de Schilfgaarde fornece um maior espaçamento de drenos, indicando vantagem econômica para as mesmas condições de projeto e drenos também afastados da camada de impedimento.

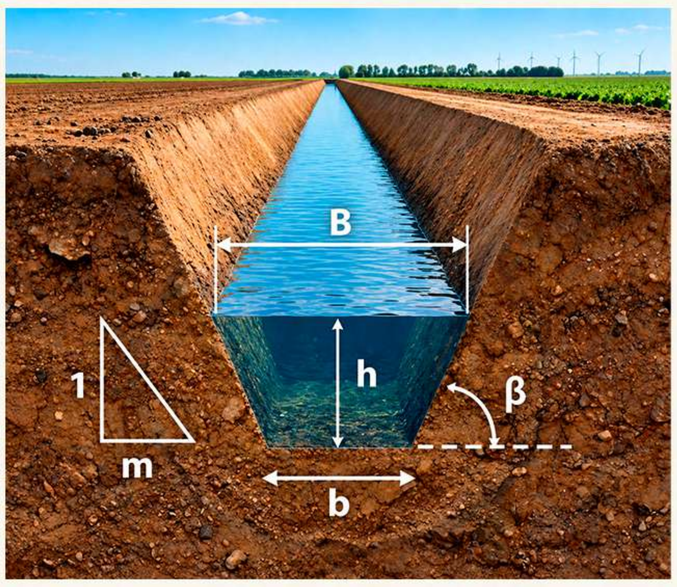
08 Dimensionamento dos drenos

08. Dimensionamento dos drenos

Drenos ou valas abertas
Nesse caso, a seção transversal é sempre suficiente para transportar a vazão subterrânea escoada, que dificilmente ultrapassa poucos litros por segundo.

A profundidade sempre é pré-definida e adotam-se os critérios técnicos para a adequada inclinação dos taludes. O fator econômico da operação de abertura das valas também é importante.

Calculada a vazão a ser eliminada, para manter o lençol freático na posição desejada, o dimensionamento segue os critérios apresentados no item 6.1.3.



Drenos fechados
Quando a opção é pelo uso de drenos tubulares, é necessária a avaliação econômica para a seleção do diâmetro comercial (Figura 66).

Nesse caso, sempre é necessário, inicialmente, estimar a vazão que deverá ser eliminada.
É indispensável análise de custos e de viabilidade econômica do projeto para a área e opção de exploração.

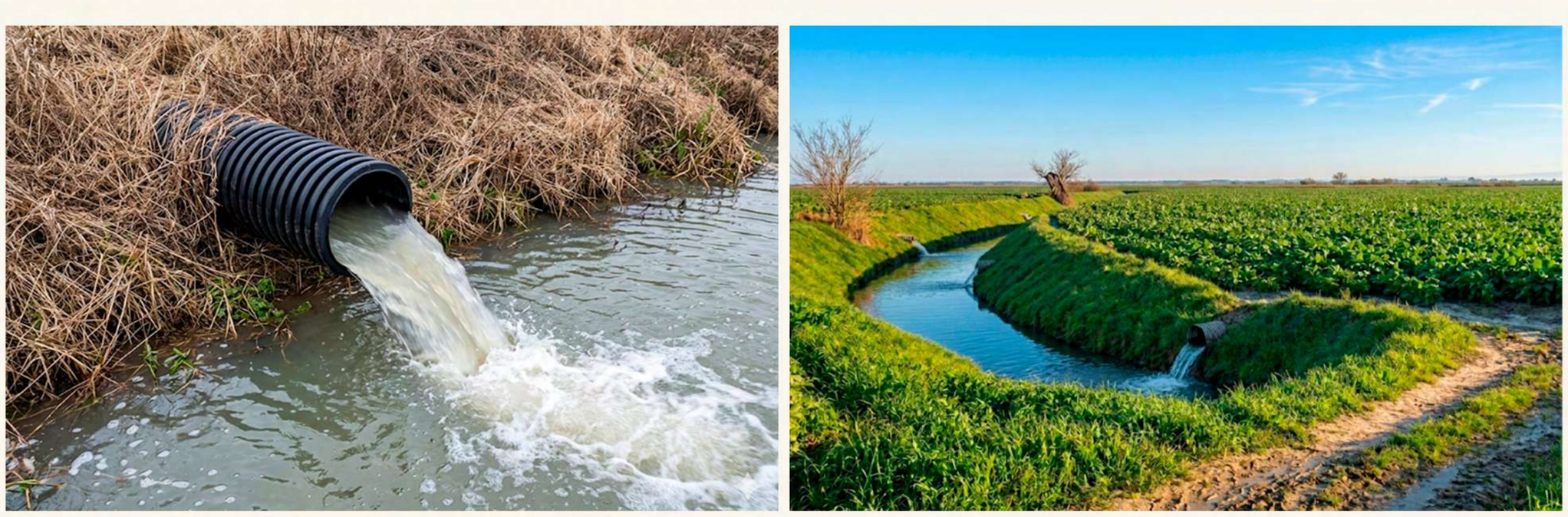


Figura 66 – Ilustração de drenos laterais fechados instalados para remoção da água no perfil do solo cultivado.

Estimativa da vazão subterrânea
Há que se levar em consideração a área de contribuição resultante da disposição em campo dos drenos paralelos entre si e espaçados de acordo com os critérios adotados (Figura 67).

L – espaçamento, m;
C – comprimento, m.

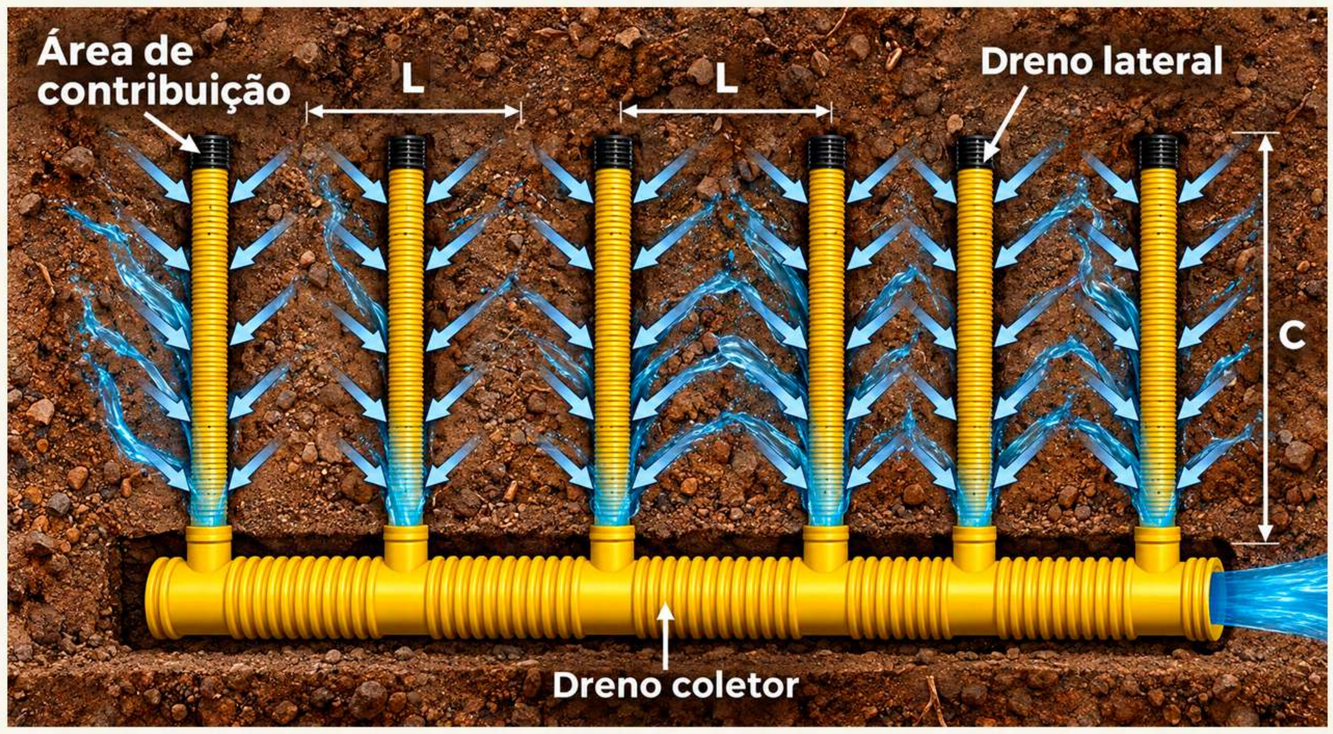


Figura 67 – Ilustração dos elementos espaçamento e comprimento dos drenos que definem a área de contribuição.

A área de contribuição de água de cada dreno na parcela, corresponde ao produto do comprimento (L) pelo espaçamento de instalação calculado (C).

A vazão subterrânea a ser eliminada deve considerar o regime de fluxo verificado e definido no projeto.

Regime permanente
Quando nessa condição de regime permanente, com a área sob recarga, a vazão escoada por cada dreno será o produto da área de contribuição (L x C) pela recarda (R). Smedema & Rycroft (1983) sugerem o uso de um coeficiente de segurança de 30%.

Eq.33

$$Q = 1{,}30 \left(\frac{L \times C \times R}{24 \times 3600} \right)$$

Q – vazão do dreno em regime permanente, $m^3\ s^{-1}$;
L – espaçamento entre drenos, m;
C – comprimento do dreno, m; e
R – recarga constante, m dia^{-1}.

Regime variável
Nesse caso tem-se que a vazão decresce à medida que a carga hidráulica diminui de ho para ht, ao longo de "t" dias.

É comum adotar uma vazão média ao longo de "t" dias.

Eq.34

$$Q = \frac{\alpha \left(h_o - h_t \right) L \times C}{t \times 24 \times 3600}$$

Q – vazão média escoada pelo do dreno, $m^3\ s^{-1}$;
h_o – altura do LF, sobre a camada de impedimento, logo após a recarga, m;
h_t – altura do LF após passado "t" dias, m;
α – porosidade drenável do solo, decimal;
t – tempo necessário para o rebaixamento do LF, dias;
L – espaçamento entre drenos, m; e
C – comprimento do dreno, m.

Cálculo do diâmetro do dreno tubular

Uma vez conhecida a vazão a ser drenada, o diâmetro do tubo pode ser determinado a partir da equação de Manning (modificada), assumindo uma seção circular parcialmente cheia.

$$D = \left(\frac{Q\, n}{k\, I^{0,5}} \right)^{0,375}$$

Eq.35

- **D** – diâmetro teórico do dreno tubular, m;
- **Q** – vazão média escoada pelo do dreno, $m^3\ s^{-1}$;
- **n** – coeficiente de rugosidade de Manning;
- **k** – coeficiente que depende da relação entre a lâmina de água no dreno e o diâmetro (y/D);
- **I** – declividade de assentamento do dreno, $m\ m^{-1}$.

Valores usuais do coeficiente de rugosidade de Manning “n” para drenos tubulares, em função do tipo de material, bem como valores do coeficiente “k” para uso da equação de Manning modificada aplicada a seções circulares parcialmente cheias, estão disponíveis na literatura são apresentados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Valores usuais do coeficiente de rugosidade de Manning “n” para drenos tubulares.

Material do tudo	Coef. Maning (n)
Concreto em acabamento	0,014 - 0,016
Manilhas de argila	0,012 - 0,015
PVC ou polietileno liso	0,009 - 0,011
PVC ou polietileno corrugado	0,015 - 0,017

Tabela 10 – Valores do coeficiente “k” para uso da equação de Manning modificada, aplicada a seções circulares parcialmente cheias.

Y/D	k
0,5	0,156
0,6	0,209
0,7	0,260
0,8	0,304
0,9	0,331
1,0	0,334



APLICAÇÃO:
Para uma área a ser drenada, sob condição de regime permanente e com recarga de 4,0 mm dia^{-1}., drenos espaçados de 70,0 m serão instalados com comprimento de 200,0 m. O terreno apresenta uma declividade de 3 por mil.

A opção foi pelo uso de tubos de polietileno corrugado (coeficiente de Manning, n = 0,016) com fator k = 0,209 (relação lâmina de água e diâmetro do tubo – Y/D = 0,6).

- ✔ Determinar a vazão a ser drenada (escoada) e o diâmetro dos drenos.

$$Q = 1{,}30 \left(\frac{70{,}0 \times 200{,}0 \times 0{,}004}{24 \times 3600} \right) \qquad \mathbf{Q = 8{,}426 \times 10^{-4}\ m3\ s^{-1} = 0{,}8426\ L\ s^{-1}}$$

$$D = \left(\frac{0{,}0008426 \times 0{,}016}{0{,}209 \times 0{,}003^{0{,}5}} \right)^{0{,}375} \qquad \mathbf{D \approx 80{,}0\ mm}$$

Comercialmente há disponibilidade de tubo corrugado de polietileno para drenagem com diâmetro nominal de 65, 110 e 160 mm. Portanto, o tubo de 110 mm (diâmetro interno de 96 mm), será suficiente para assegurar o escoamento da vazão subterrânea prevista.



09 Modelos computacionais aplicados à drenagem

09. Modelos computacionais aplicados à drenagem

A modelagem computacional tem fundamental importância e aplicação nas mais variadas situações e em diversas áreas do conhecimento, facilitando a rapidez e a precisão dos resultados e os diagnósticos desejados, e no caso da atividade agrícola, permite simulações e otimização de sistemas produtivos.

A dinâmica da água no solo e, portanto, a drenagem e o escoamento da água, envolve um considerável número de variáveis e diferentes situações, fatores e efeitos. Isso requer a utilização de modelos matemáticos que nem sempre são facilmente desenvolvidos e aplicados sem as ferramentas computacionais.

Quando se trata da dinâmica da água no solo e as estruturas de drenagem, há que se entender que o projeto considera todo o sistema, envolvendo a interação entre as condições de clima, solo, demanda de água pela planta e a própria estrutura a ser dimensionada. Daí a modelagem computacional permite ao projetista prever o desempenho e propor a otimização da estrutura de drenagem, resultando diretamente na produtividade das culturas e resultados econômicos do empreendimento.

A grande maioria dos sistemas de drenagem implantados se comportam diferentemente de acordo com as condições de maior e menor umidade (períodos úmidos e secos), dada a sazonalidade climática, influenciando com isso a produtividade das culturas. A deficiência de aeração, devido ao excesso de umidade, tem várias consequências de amplo conhecimento, com prejuízos às plantas por comprometimentos diversos.

Quanto maior a diversidade das variáveis, condições e situações, os recursos computacionais ganham importância para agilidade de dimensionamento e simulações e previsão do movimento (profundidade) do lençol freático no perfil do solo e sua proximidade com o sistema radicular das plantas. O desempenho dos sistemas pode ser avaliado a partir das ferramentas computacionais de previsão e simulação, permitindo inferir sobre a capacidade de resposta das culturas, ou seja, produtividade esperada.

O início do uso de modelagens com grande quantidade de fatores ocorreu a partir da década de 1960, com pesquisadores americanos e holandeses, considerando equações que descrevem o movimento do lençol freático sob condições de recarga intermitente.

Com base em série de dados de precipitação, evapotranspiração e condições de solo, entre outros, os modelos previam o balanço hídrico na zona radicular, bem como a contribuição da precipitação na recarga do lençol freático. Assim, com as simulações determinava-se o comportamento do lençol freático e o período que permanecia acima de uma data altura.

Os modelos foram sendo aperfeiçoados e com isso foram viabilizadas as simulações mais precisas do comportamento (profundidade) do lençol freático, considerando o máximo de processos físicos, como precipitação e componentes hidrológicos, infiltração, ocorrência do escoamento superficial, retenção de água na zona radicular das culturas e outros. Os modelos e metodologias agregadas com bases matemáticas de vários pesquisadores, sempre apresentam o propósito de simular a movimentação do lençol freático no solo e com isso permitir o dimensionamento dos sistemas de drenagem (profundidade e espaçamento entres os drenos).

São vários os modelos desenvolvidos e aperfeiçoados, buscando sempre atender a necessidade de simulações para o dimensionamento da drenagem, controle, e otimização das estruturas em campos agrícolas. Exemplos de modelos: DRAINMOD, SWAP, SWATREN, SISDRENA.

A aplicação de modelos de simulação, com maior ou menor complexidade (exigência de dados de entrada) é uma ferramenta importante para os produtores, especialmente, em regiões que apesentam deficiência de drenagem que compromete a produção.
A seguir estão apresentadas as informações iniciais de dois modelos, dentre muitos desenvolvidos em estudos, disponíveis na literatura.

9.1 Modelo DRAINMOD

Esse modelo de simulação computacional foi desenvolvido pelo Dr. Wayne Skaggs na North Carolina State University.

Ele simula a hidrologia de solos com drenagem deficiente e lençol freático alto, hora a hora, dia a dia, ao longo de longos períodos (por exemplo, 50 anos). Prevê os efeitos das práticas de drenagem e da gestão da água sobre a profundidade do lençol freático, as condições da água no solo e a produtividade das culturas.

O DRAINMOD tem sido usado para analisar a hidrologia de zonas úmidas e avaliar sistemas de drenagem para tratamento de águas residuais.

Nos últimos 20 anos, suas capacidades foram expandidas para avaliar a hidrologia e a qualidade da água em áreas agrícolas e florestais, em escalas de campo e de bacia hidrográfica.

O modelo permite o dimensionamento, avaliação e otimização de sistemas de drenagem. É possível prever, em base horária, o escoamento subterrâneo e o superficial, a profundidade do lençol freático, o teor de água na zona radicular e a evapotranspiração da cultura em resposta às informações de entrada.

Na elaboração do modelo, foi evitado o uso de métodos numéricos complexos para os componentes hidrológicos do balanço hídrico e assim permitir processar as simulações mais rapidamente. O fluxo de água em direção aos drenos é estimado por equações para o regime permanente, utilizando na maioria das vezes a equação de Houghoudt, ou a equação de Kirkham quando a superfície do solo está alagada.

Com o aperfeiçoamento do modelo, o DRAINMOD tem sido testado e comparado com outros modelos e o seu desempenho tem obtido sucesso em vários tipos de solo, culturas e condições climáticas. Vários autores de diferentes instituições internacionais e brasileiras realizaram testes que confirmam o bom desempenho deste modelo.

Entrada e saída de informações (dados) do DRAINMOD:
As informações de entrada do modelo incluem dados climáticos de vários anos, propriedades físicas do solo, tipo de drenagem, dados de cultura e outros.

Como informações de saída, o modelo fornece estimativas diárias dos volumes relativos aos componentes do balanço hídrico (precipitação, infiltração, drenagem, evapotranspiração, escoamento superficial, etc.), bem como as estimativas da posição diária do lençol freático.

O modelo também permite prever anualmente a produtividade esperada para a cultura em estudo, em função das características do sistema de drenagem sob simulação.

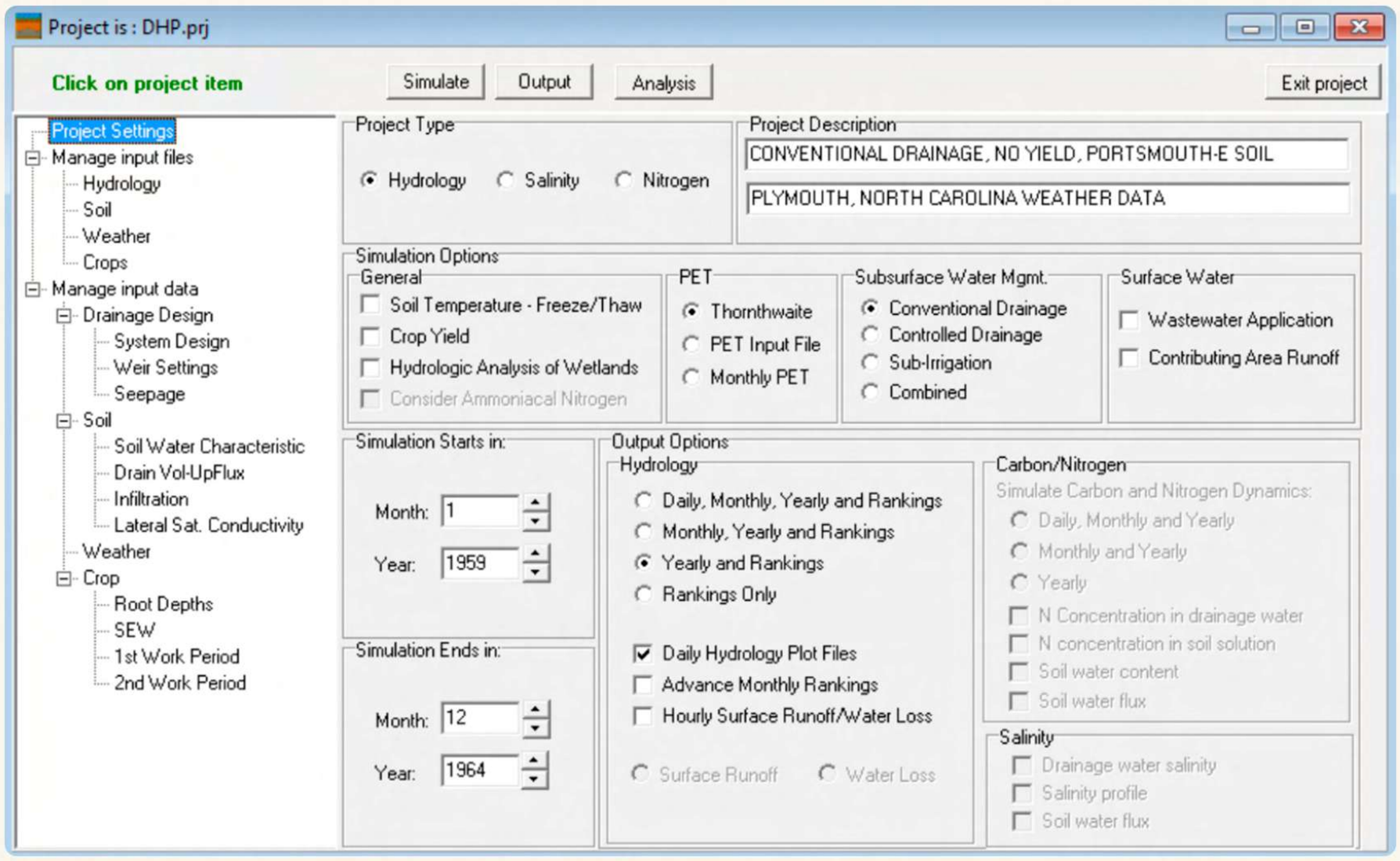


Figura 68 – Imagem de tela do modelo DRAINMOD com identificação de rotinas para simulação de condições e manejo de estruturas de drenagem.

9.2 Modelo SISDRENA

Esse modelo, de acesso livre, foi desenvolvido no Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP.

Trata-se de um modelo unidimensional que contabiliza os principais componentes que afetam o balanço de água em um volume de solo homogêneo e de superfície unitária, localizado equidistante entre dois drenos paralelos e que se estende desde a camada de impedimento até a superfície do solo. Estes componentes são: precipitação, escoamento superficial, infiltração, percolação para o lençol freático (LF), fluxo ascendente do LF para a zona radicular, evapotranspiração, drenagem e “seepage” vertical.

Entrada e saída de informações (dados) do SISDRENA:
Os parâmetros de entrada necessários à simulação são: precipitação total diária (mm dia^{-1}); evapotranspiração potencial diária (mm dia^{-1}); condutividade hidráulica do solo saturado (m dia^{-1}); profundidade da camada de impedimento (m); valores de espaçamento entre drenos a serem submetidos à avaliação (m); “seepage” vertical ascendente diário (opcional) (mm dia^{-1}); profundidade de instalação dos drenos (m); raio efetivo do dreno (m); curva de retenção de água no solo; data de plantio e colheita da cultura; variação da profundidade efetiva do sistema radicular ao longo do ano (m); fatores diários de sensibilidade da cultura ao excesso e à falta de umidade (adimensional); posição do lençol freático acima da linha dos drenos no dia inicial (m); e umidade volumétrica do solo no dia inicial (adimensional) (Figura 69).

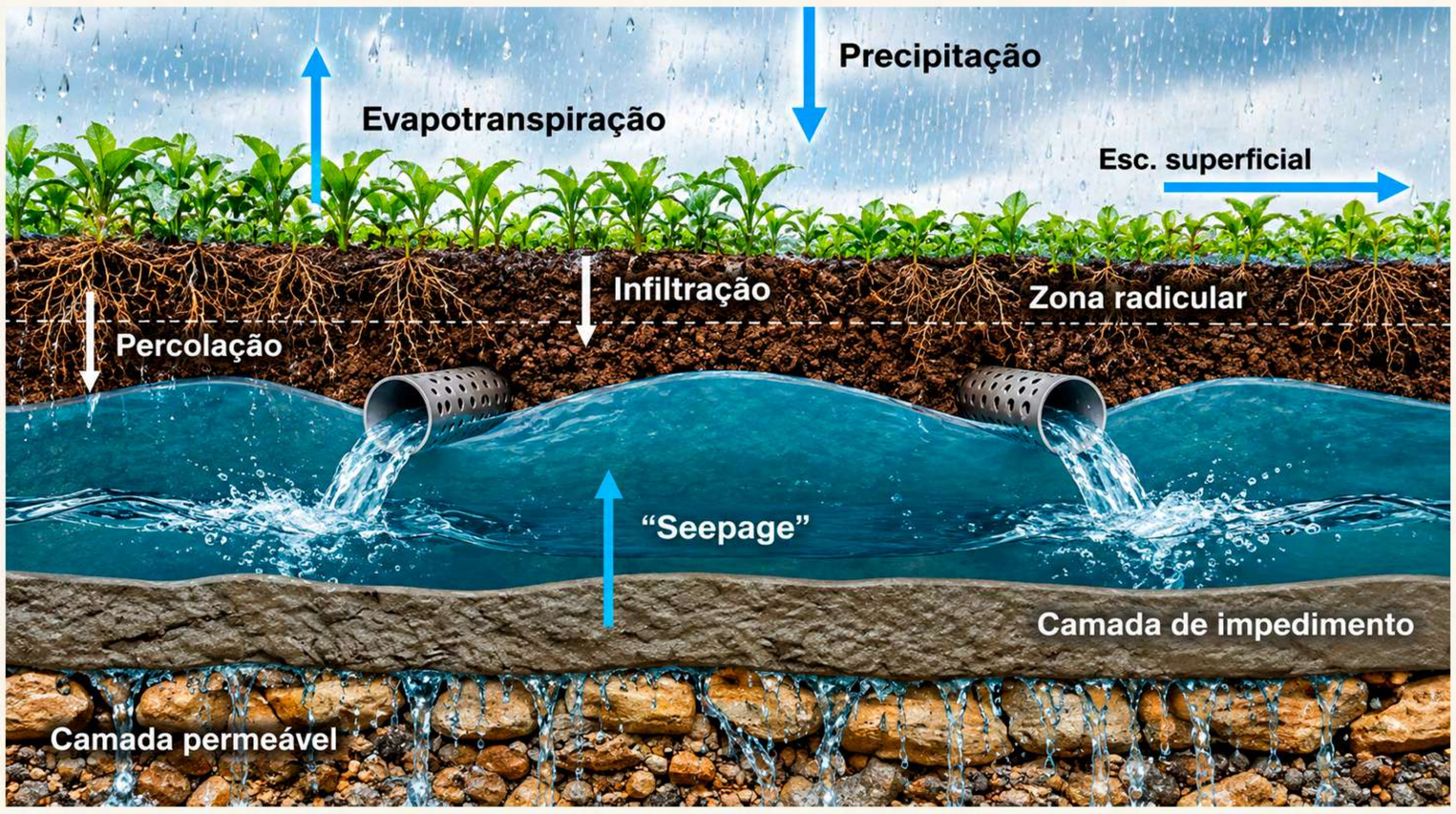


Figura 69 – Ilustração dos principais componentes que afetam o balanço de água em um volume de solo homogêneo, utilizados no modelo SISDRENA.

Após a simulação, o modelo SISDRENA fornece os seguintes parâmetros de saída: fração da precipitação diária que escoa sobre o solo (mm dia^{-1}); fração da precipitação diária que infiltra no solo (mm dia^{-1}); altura diária do LF (m); lâmina escoada através dos drenos subterrâneos (mm dia^{-1}); armazenamento diário de água na zona radicular (mm); evapotranspiração real diária da cultura (mm dia^{-1}); parâmetros que avaliam o desempenho do sistema de drenagem; e espaçamento mais econômico entre drenos.

O SISDRENA, após a simulação, fornece outras informações importantes para o desempenho e manejo mais eficiente da estrutura de drenagem, uso da água e resultados da cultura na área.

- ✔ Separa, da precipitação que atinge o solo, a fração que infiltra no solo daquela que escoa superficialmente. A lâmina infiltrada é considerada como a diferença entre o total precipitado e a fração da precipitação que escoa superficialmente.

- ✔ O modelo interpola, para cada profundidade diária do lençol, o fluxo correspondente à posição do lençol do dia corrente. Em seguida é feita uma comparação entre o fluxo ascendente máximo obtido para a respectiva profundidade do lençol freático e a evapotranspiração potencial. O objetivo desta fase é separar diariamente a fração da evapotranspiração potencial que provém do LF e a que é oriunda da água da zona radicular.

- ✔ Partindo dos valores da umidade em que se encontra o solo e da profundidade do LF, correspondentes ao final do dia anterior, o modelo realiza um balanço hídrico diário na zona radicular, e calcula o armazenamento da água no solo, a evapotranspiração real e corrige a parcela da precipitação que atinge o LF.

- ✔ O SISDRENA faz uma correção do armazenamento caso o lençol invada a zona radicular. Se a altura do LF atinge a superfície do solo, assume-se o valor do armazenamento como sendo saturado. Caso a altura do lençol calculada atinja apenas parte da zona radicular, o modelo assume que a fração que está acima da altura do lençol está na capacidade de campo e o restante está saturado, calculando o novo armazenamento baseado em uma ponderação.

- ✔ O modelo calcula índices que refletem o desempenho do sistema de drenagem, número de dias secos e produtividades relativas médias e prováveis, para o ano e espaçamento de drenos, e em seguida realiza uma análise econômica e apresenta qual o espaçamento mais viável (Figuras 70 a 73).

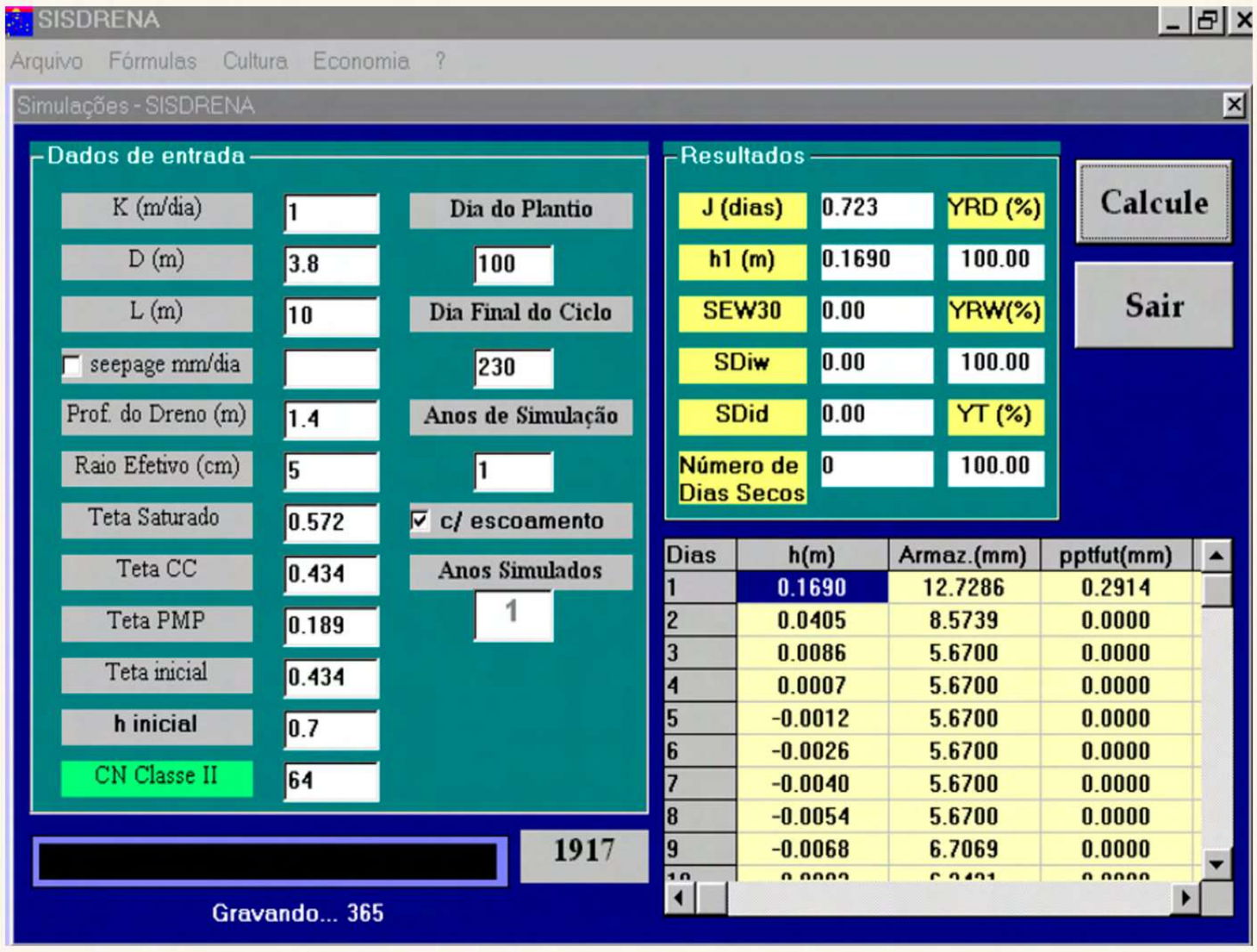


Figura 70 – Tela do modelo SISDRENA com identificação de dados de entrada e saída.

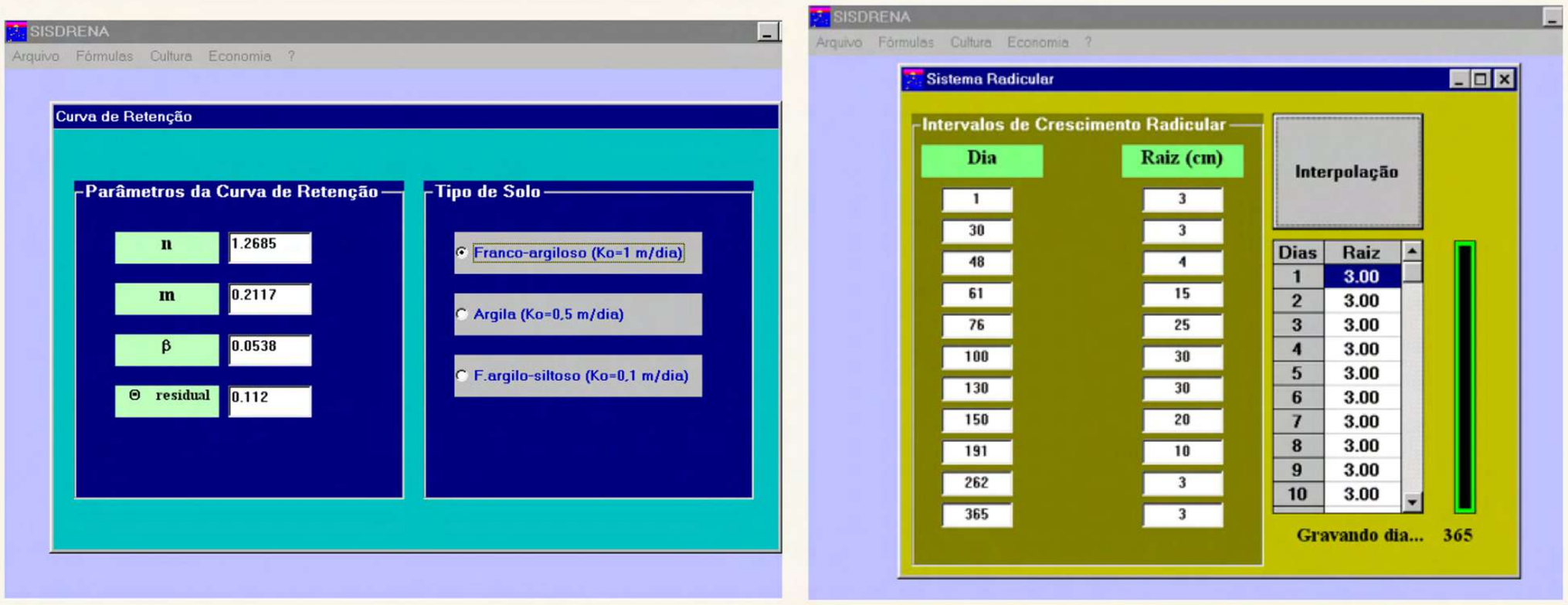


Figura 71 – Imagem de telas do modelo SISDRENA para determinação da curva de retenção de água do solo e simulação de crescimento de raízes.

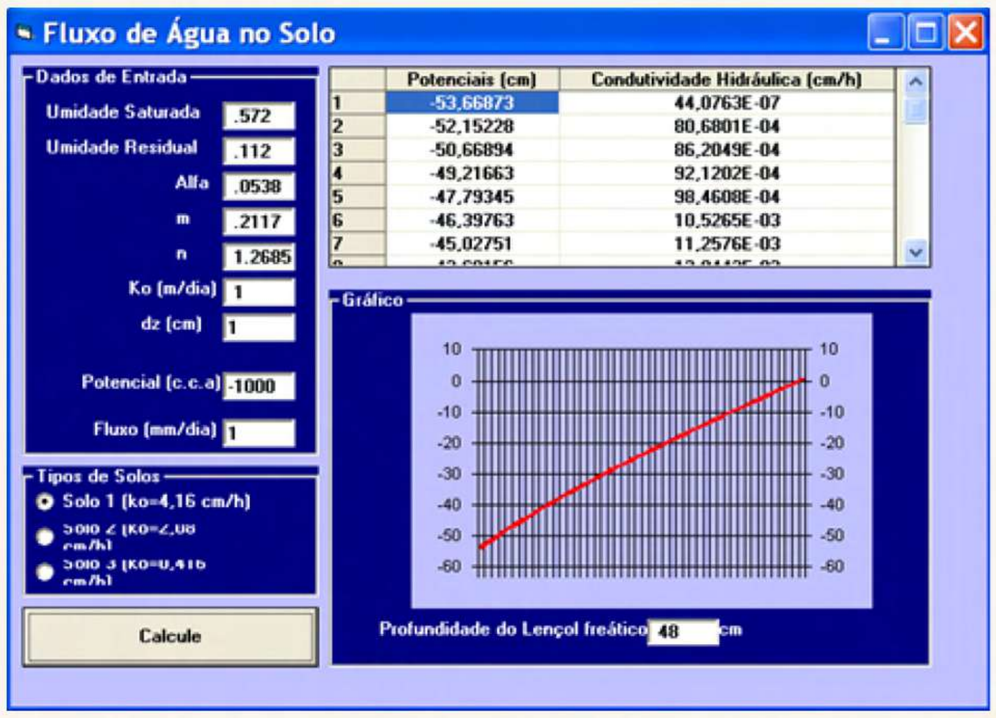


Figura 72 – Imagem de telas do modelo SISDRENA com simulação de fluxo de água no solo em estudo para diferentes tipos de solo.

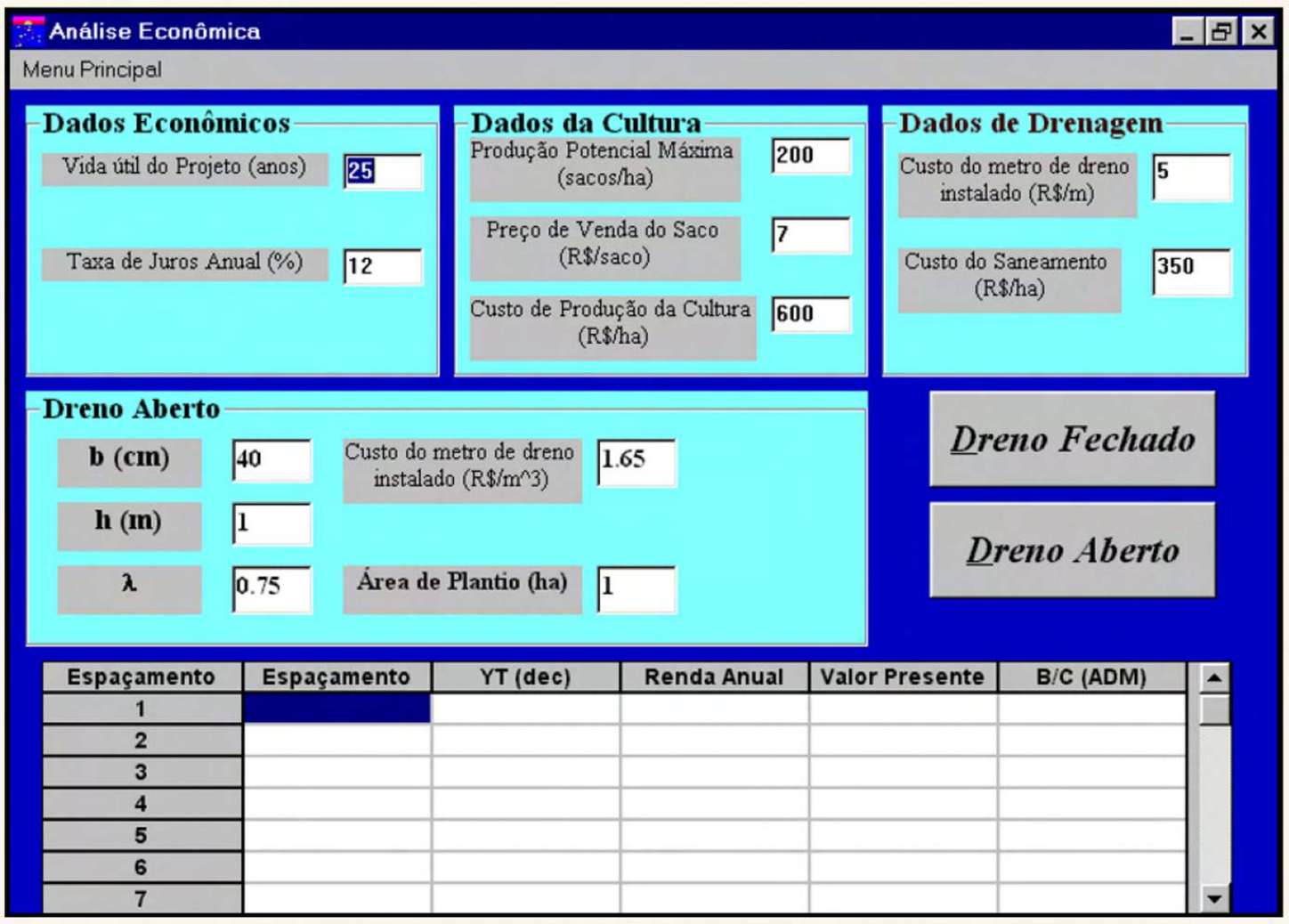


Figura 73 – Imagem de tela do modelo SISDRENA com rotina de análise econômica de acordo com as opções de instalação dos drenos, especialmente o espaçamento entre drenos.

10 Materiais de drenagem e instalação de drenos

10. Materiais de drenagem e instalação de drenos

São vários os tipos de materiais utilizados para drenagem, desde a construção de dutos (caminhos preferenciais para a água) de pedras, tijolos, bambu, cerâmicas, PVC e polietileno corrugado.

Materiais

Os materiais mais recentemente desenvolvidos apresentam durabilidade e flexibilidade para assentamento em curva e em desnível, sem comprometimento da operação e funcionalidade. Os drenos indicados para drenagem agrícola devem apresentar espaços ou furos que permitam facilmente a entrada da água e sua condução para os pontos de descarga. Ao seu entorno são usados materiais filtrantes para evitar, principalmente, a deposição de sedimentos e a intrusão de raízes.

Certos materiais de drenagem melhoram os espaços para transmissão da água no entorno dos drenos e o escoamento pelas estruturas de remoção.

Os principais materiais incluem tubos corrugados de PEAD (perfurados), manta geotêxtil (bidim) para filtragem, brita ou cascalho para camada filtrante, e tubos de PVC. Têm-se também, mas de pouco uso atualmente, os tubos cerâmicos com juntas de conexão que permitem o fluxo de água para o interior e com isso o escoamento para fora do terreno drenado em seu perfil do solo (Figuras 74 e 75).

- ✔ Tubos de Dreno (PEAD): tubos corrugados de polietileno de alta densidade, leves e resistentes, ideais para sistemas subterrâneos devido à sua flexibilidade e durabilidade;
- ✔ Manta Geotêxtil (Bidim): material permeável de fibras sintéticas usado para envolver os tubos, agindo como filtro para evitar que partículas de terra entrem e obstruam o dreno;
- ✔ Tubos de PVC: também utilizados, especialmente em sistemas tradicionais, embora o PEAD seja mais comum atualmente;
- ✔ Material Filtrante (Brita/Cascalho): camada de cascalho colocada ao redor do tubo para facilitar o fluxo de água.



Figura 74 – Materiais utilizados para drenos subterrâneas, cerâmica (A), PEAD corrugado (B) e PVC liso (C).



Figura 75 – Material de drenagem tipo PEAD corrugados perfurados amplamente utilizados em projetos com excelente benefício-custo (https://techduto.com.br)

Instalação de drenos

Os drenos são instalados em sua maioria com uso de maquinários, principalmente em áreas de maior dimensão e amplitude do projeto desenvolvido.

A escavação do terreno para instalação em níveis mais profundos pode acarretar maiores custos, exigindo uma análise econômica de acordo com os custos da maquinaria e da mão-de-obra.

Em área de menor dimensão, a opção de escavação manual pode ser vantajosa visto os custos da maquinaria.

Em qualquer situação, é importante adotar a recomendação de envelopamento dos drenos com material filtrante para evitar a ocorrência de transporte de sedimentos para o interior da tubulação, com redução da seção de escoamento no decorrer do tempo, principalmente nos casos de solos argilosos ou de maior percentual de partículas finas (silte). O envelopamento deve ser feito com uso de material com maior granulometria (areia grossa, brita, cascalho) ou uso de manta de poliéster (bidim) disponível no mercado para drenagem (Figuras 76 a 78).

A instalação de drenos sem o devido envelopamento (Figura 79) pode resultar na acumulação de sedimentos de solo, como demonstrado na Figura 77A, muito recorrente em solos siltosos e argilosos. Como o tempo, a manutenção por pressurização de água e dispersantes demanda elevados custos para a restabelecer o fluxo de água de drenagem projetado inicialmente.



Figura 76 – Envelopamento de drenos perfurados com material filtrante (areia ou brita) tipo PEAD (A) e corrugados perfurados com manta têxtil “bidim” (https://www.casadavedacao.com.br/) (B).

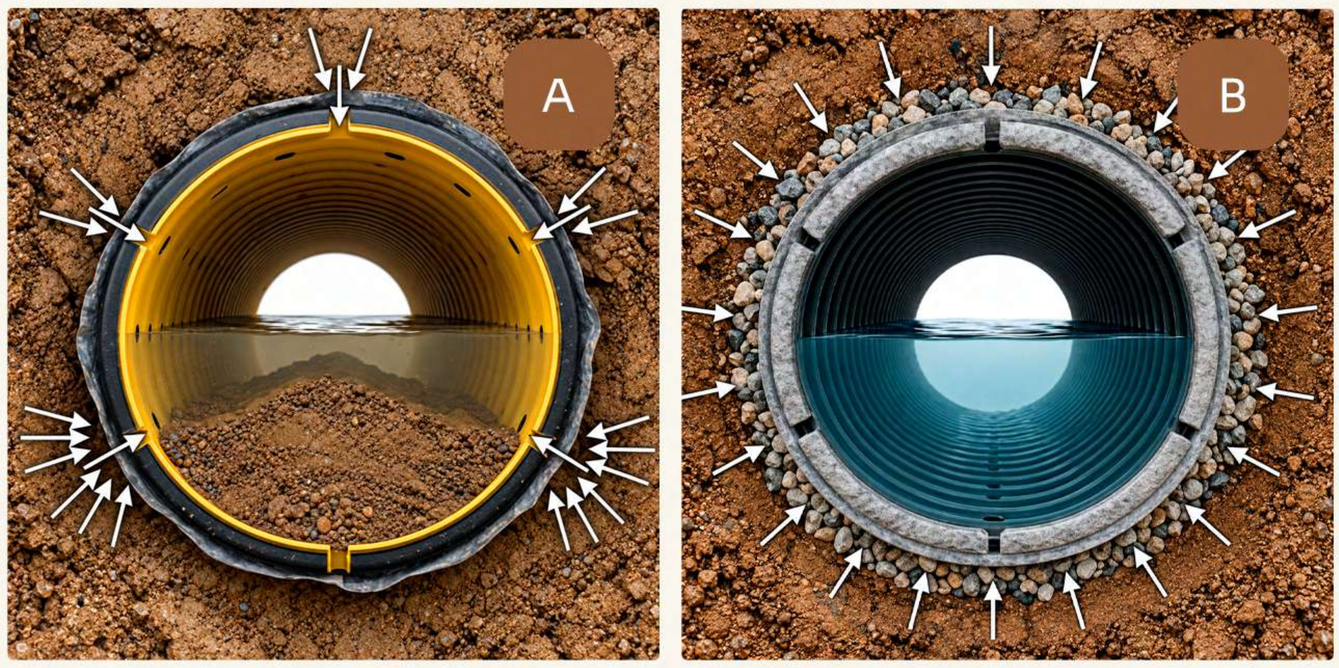


Figura 77 – Ilustração do envelopamento de drenos sem material drenante no entorno (podendo resultar em sedimentos de partículas finas do solo no fundo (A) e com incorporação de material filtrante, garantindo ausência de sedimentos no fundo (B).



Figura 78 – Ilustração do processo de escavação e instalação posterior dos drenos envelopados com “bidim” (A) e operação simultânea de escavação e instalação com maquinário espacial (http://docplayer.com.br) (B).



Figura 79 – Ilustração do processo de escavação e instalação posterior dos drenos sem envelopamento com “bidim”, podendo ser utilizado outro material filtrante na base do dreno (areia grossa ou brita)

11 Salinidade do solo

11. Salinidade do solo

A salinização do solo, como o próprio nome indica, é o processo de acúmulo de sais minerais na forma de íons (Na+ e Cl–) nos solos. Os sais minerais ficam acumulados, geralmente, em razão da evaporação da água junto à superfície. Como consequência, geralmente acarretam elevados níveis de comprometimento para a exploração agrícola.

O processo de salinização do solo é muito comum em áreas áridas ou semiáridas, que geralmente também são propensas a apresentar desertificação. Isso significa que em todas as regiões que apresentam climas nos quais a evaporação potencial é maior do que a precipitação, é necessário ter cuidado no manejo dos recursos hídricos.

A relação entre a drenagem agrícola e a salinidade do solo se dá principalmente pelos seguintes fatores, dentre outros:

- **Remoção de sais**
  Em áreas com problemas de salinidade, a drenagem adequada permite a lixiviação dos sais para camadas mais profundas do solo e sua remoção da zona radicular das plantas em direção dos drenos.

- **Controle do lençol freático**
  A drenagem ajuda a manter o nível do lençol freático baixo. Quando o lençol freático é superficial e salino, a água com sais pode subir por capilaridade até a superfície do solo e, ao evaporar, deixar os sais acumulados.

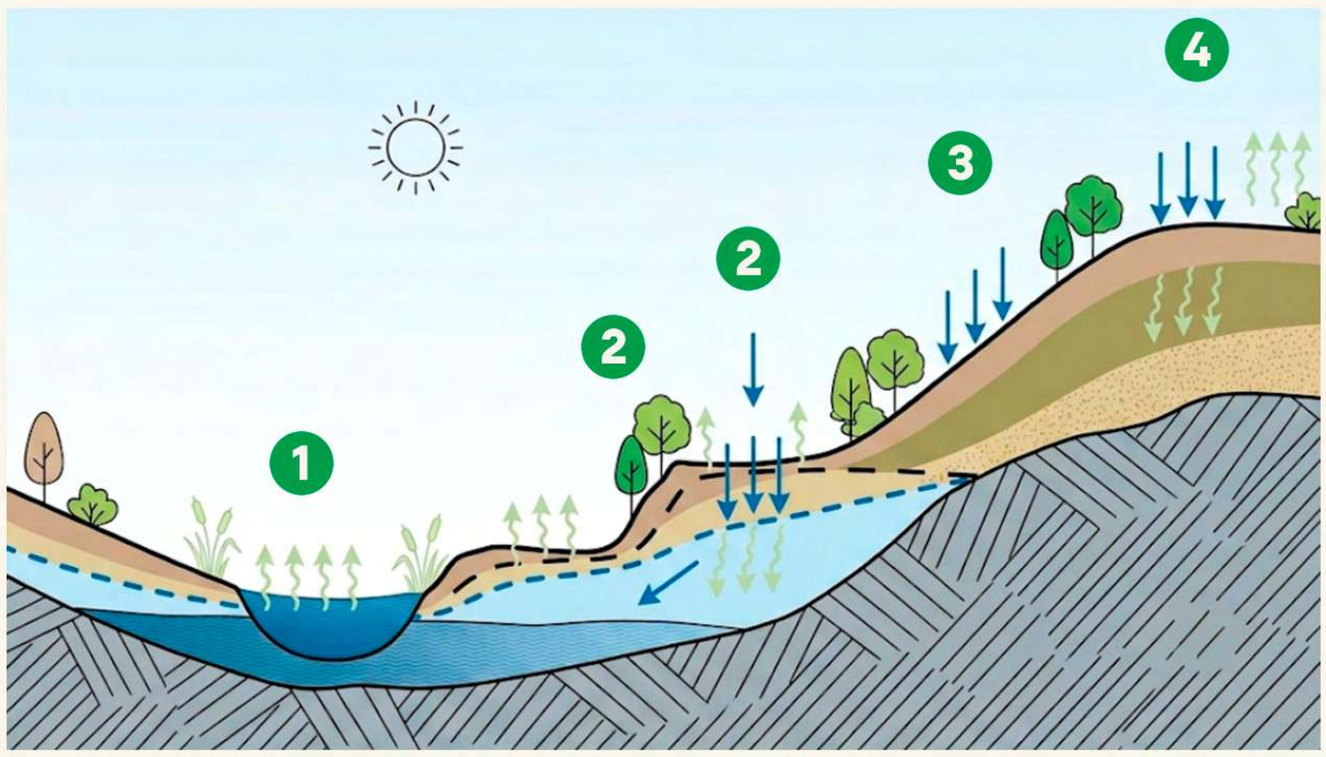
11.1 A origem dos sais

O problema da salinização dos solos agricultáveis acompanha a humanidade desde tempos remotos. Os livros de História citam o caso da civilização dos Sumérios, que ocupavam a antiga Mesopotâmia (atual Iraque), e que salinizaram as terras ao longo do rio Eufrates devido ao fato de manejarem mal a irrigação. Esse tipo de problema perdura até hoje: estima-se que cerca de 20% da área irrigada no mundo esteja de alguma forma salinizada; no semiárido brasileiro também há problemas dessa ordem de grandeza (Figura 80).



Figura 80 – Salinização do solo com surgimento na superfície de camada marcada de concentração de sais e indicação de efeitos na sua estrutura (https://eos.com/pt/blog/salinizacao-do-solo/).

A salinização pode ser um processo pedogenético natural do solo (salinização primária) ou um processo causado pela ação do Homem (salinização secundária), como é ilustrado na Figura 81.



1. Salinização primária
2. Salinização secundária: elevação do lençol freático
3. Salinização secundária: irrigação sem lixiviação
4. Salinização secundária: irrigação com água salina

Figura 81 – Processos de salinização do solo (Duarte et al., 2023)

Salinização primária

A salinização primária pode ser originada da intrusão marinha, da ação de ventos ou da presença de lençol freático raso em zonas árida ou semiárida; este último processo parece ser o mais frequente. Em zonas úmidas, à medida que o material rochoso vai sendo intemperizado durante a formação do solo, o perfil é intensamente lixiviado; os sais se deslocam para a zona saturada e de lá para os rios que correm para o mar. Já em regiões semiáridas, como a lixiviação é menos intensa, os sais se acumulam na zona saturada que ocupa a parte mais baixa da topossequência.

Quando o lençol freático está raso, ocorre fluxo ascendente (ou capilar) em direção à superfície; a água evapora e os sais salinizam as camadas mais rasas do perfil. Esse fenômeno é possível porque, nessas regiões, a evapotranspiração potencial é maior que a precipitação pluvial.

Salinização secundária

O principal processo de salinização secundária se deve à irrigação realizada com perdas excessivas por percolação profunda e ausência de drenagem. Esse problema ocorre principalmente quando se irriga por sulcos ou por inundação, em solos com camada de impedimento rasa.

Nesse caso, com o passar dos anos, o lençol freático vai subindo e, quando atinge cerca de 1 a 2 m de profundidade, inicia-se o fluxo ascendente em direção à superfície, salinizando-a.

11.2 Caracterização da salinidade

Os inconvenientes da salinização dos solos agrícolas podem ser divididos em três problemas básicos: excesso de sais na solução do solo, excesso de sódio trocável nas micelas e excesso de íons tóxicos.

Quando a solução do solo apresenta excesso de sais, o potencial osmótico desta diminui e a planta tende a apresentar dificuldade na absorção de água pelas raízes.

Quando esse problema é ligeiro, sua constatação é difícil, exigindo que a produtividade da cultura seja comparada ano a ano, para caracterizar o decréscimo. Entretanto, quando o problema é severo, as plantas não se desenvolvem a contento, apresentam folhas coriáceas e verde azuladas e, muitas vezes, não produzem.

O problema do excesso de sódio trocável pode se expressar do ponto de vista físico ou químico. Do ponto de vista físico, o excesso de sódio promove o aumento da dupla camada iônica das micelas de argila, de forma que, quando o solo seca, apresenta-se maciço ou desestruturado, acarretando uma série de problemas de manejo (dificuldade de destorroamento, dificuldade de infiltração, aeração deficiente, entre outros).

Do ponto de vista químico, o excesso de sódio acarreta a elevação do pH, causando dificuldade de absorção de certos micronutrientes (Cu e Zn, por exemplo); por competição, a absorção de potássio e cálcio também pode ser comprometida.

O excesso de cloreto, sódio e boro na solução do solo ou na água aplicada via irrigação pode causar a absorção desses elementos em excesso, que tendem a se acumular nas bordas das folhas, dando o aspecto de queimadura. Embora esse problema ocorra mais frequentemente quando se irriga por aspersão, pode ocorrer, também, quando se utilizam métodos de irrigação que não molham as folhas, se a solução do solo apresentar níveis elevados (Figura 11).

Tabela 11 – Identificação de problemas de drenagem e os efeitos sobre o solo e as culturas.

Problema	Efeitos	
Excesso de sais	Redução do potencial osmótico	Dificuldade de absorção de água pela cultura
Excesso de Na trocável	Desestruturação do solo	Comprometimento da disponibilidade de nutrientes para a cultura
Excesso de Cl e B Excesso de Na em relação ao Ca e Mg	Toxicidade para a cultura devido à absorção excessiva	

11.3 Necessidade de lixiviação

A irrigação em regiões semiáridas deve ser realizada com a aplicação de uma certa fração de lixiviação para evitar que os sais presentes na água de irrigação se acumulem no solo.

Quando a irrigação é conduzida com uma eficiência de aplicação excessivamente alta (sem esta fração), existe o risco de salinização do solo, mesmo que a água de irrigação seja relativamente de boa qualidade. Esse problema é comum em Vertissolos, pois estes têm velocidade de infiltração e percolação muito baixas (Figura 82).



Figura 82 – Salinização do solo (https://eos.com/pt/blog/salinizacao-do-solo/) (A) e aplicação de água salina por gotejamento (B).

Quanto mais salina é a água de irrigação ou mais sensível é a cultura à salinidade, mais lixiviação deve existir para manter o rendimento da cultura em nível elevado. A quantidade de sais que deve ser lixiviada abaixo da zona radicular da cultura depende da concentração de sais na água de irrigação e no solo, da tolerância da cultura à salinidade e do manejo da irrigação

11.4 Razão de lixiviação

A razão de lixiviação de sais representa a fração mínima da quantidade total de água aplicada que deve passar através da zona radicular, para prevenir a redução no rendimento econômico da cultura.

A salinidade do solo deve ser continuamente monitorada e considerada no manejo da irrigação, de forma a manter um balanço adequado de sais na zona radicular da cultura.
A razão de lixiviação pode ser calculada para os casos de irrigação por aspersão de baixa frequência e aspersão de alta frequência:

Aspersão de baixa frequência Eq.36

$$RL = \frac{LS}{IRN + LS} = \frac{CE_i}{CE_d} = \frac{CE_i}{5\,CE_e - CE_i}$$

Aspersão de alta frequência Eq.37

$$RL = \frac{LS}{IRN + LS} = \frac{CE_i}{CE_d} = \frac{CE_i}{2\,(CE_e)}$$

RL – razão de lixiviação, adimensional;
LS – lâmina de irrigação para lixiviar o excesso de sais na zona radicular, mm;
CE_i – condutividade elétrica da água de irrigação, dS m^{-1} (mmhos cm^{-1});
CE_d – condutividade elétrica da água de drenagem, dS m^{-1} (mmhos cm^{-1});
CE_e – condutividade elétrica do extrato de saturação do solo na zona radicular para uma apropriada redução da produção, dS m^{-1} (mmhos cm^{-1});
máxCE_e – condutividade elétrica do extrato de saturação do solo que reduz a produtividade para zero, dS m^{-1} (mmhos cm^{-1}).

APLICAÇÃO:
Calcular a razão de lixiviação (RL) e a lâmina adicional de lixiviação (LS) necessárias para um sistema de irrigação por aspersão, utilizado na cana-de-açúcar, considerando que a IRN é 25,0 mm e a condutividade elétrica da água de irrigação igual a 2,5 dS m^{-1}. A condutividade elétrica do extrato de saturação do solo na zona radicular que proporciona 10 % de redução na produção da cultura é 3,4 dS m^{-1}.

$$RL = \frac{2,5}{5 \times 3,4 - 2,5} = 0,172$$

Reorganizando a equação,

$$LS = \frac{RL \times IRN}{1 - RL} = \frac{0,172 \times 25,0}{1 - 0,172} = 5,2 \text{ mm}$$

Existem informações na literatura de tolerância das culturas à salinidade em função da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo. Essas informações podem ser utilizadas para selecionar as culturas mais adaptadas à qualidade da água disponível para irrigação e ao nível médio de salinidade a que elas estarão submetidas.

O processo de lixiviação é parte do controle da salinidade do solo, indispensável para a manutenção das melhores condições de manejo, de forma a evitar os efeitos mínimos da presença de sais na zona radicular das culturas, resultando no maior rendimento e retorno econômico.

Quanto maior a concentração salina na zona radicular, menor será o número de culturas adaptadas e o retorno econômico.

O efeito da salinidade na redução da produção das culturas ocorre por diversas razões, destacando-se: 1. Efeito osmótico: o excesso de sais solutos na solução do solo reduz o potencial hídrico do solo, dificultando a absorção de água pelas raízes (a planta sofre "seca fisiológica", mesmo com o solo úmido); 2. Toxicidade iônica: o acúmulo de íons específicos (como Na^+ e Cl^-) no interior do tecido vegetal causa injúrias foliares e inibe processos fotossintéticos; e 3. Desequilíbrio nutricional: o excesso de sódio e cloro interfere na absorção de nutrientes essenciais, como potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e nitrato (NO_3^-).

Há uma relação de redução da produção em função da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo na zona radicular (Tabela 12).

Tabela 12 – Redução de produção esperada das culturas em função dos níveis de CEe (dS m-1) do extrato de saturação do solo.

Culturas	Redução da produção esperada em função do nível de CEe (dS m-1) indicado				
	0%	10%	25%	50%	100%
Algodoeiro	7,7	9,6	13,0	17,0	27,0
Soja	5,0	5,5	6,2	7,5	10,0
Sorgo	4,0	5,1	7,2	11,0	18,0
Amendoim	3,2	3,5	4,1	4,9	6,5
Milho	1,0	1,5	2,3	3,6	6,5
Feijoeiro	7,7	3,4	6,0	10,3	19,0
Cana-de-açúcar	1,7	9,6	13,0	17,0	27,0
Laranjeira	1,7	2,3	3,3	4,8	7,9
Limoeiro	1,7	2,3	3,3	4,8	7,9
Videira	1,5	2,5	4,1	6,7	12,0
Abacateiro	1,3	1,8	2,5	3,7	6,0
Coqueiro	4,0	6,8	11,0	18,0	32,0
Beterraba	4,0	5,1	6,8	9,6	15,0
Tomateiro	2,5	3,5	5,0	7,6	12,5
Pimentão	1,5	2,2	3,3	5,1	8,5
Alface	1,3	2,1	3,2	5,2	4,0
Cebola	1,2	1,8	2,8	4,3	7,2

Literatura consultada e recomendada

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. 8 ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

COSTA, R. N. T. Drenagem agrícola (Universidade Federal do Ceará - UFC). Disponível em http://www.gpeas.ufc.br/disc/dren/apostila_drenagem.pdf

COSTA, R.N.T. 1994. Espaçamento econômico de drenos laterais e a dinâmica do lençol freático sobre o rendimento da cultura de milho (Zea mays, L.). Piracicaba. 88 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

CRUCIANI, D. E. A Drenagem na agricultura. 4 ed. São Paulo. Editora Nobel, 1989. 337p.

DUARTE, S. N.; ARAÚJO, J. C.; COSTA, R. N. T.; GHEYI, H. R. Hidrologia: conceitos e exercícios com aplicações práticas. Piracicaba: FEALQ, 2024. 563p.

DUARTE, S. N.; SILVA, Ê. F. F.; MIRANDA, J. H.; MEDEIROS, J. F.; COSTA, R. N. T.; GHEYI, H. R. Fundamentos de drenagem agrícola. Piracicaba: LEB/ESALQ/USP, 2023. 339p.

DUARTE, S.N. 1997. Modelo para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem subterrânea e cálculo de espaçamento de drenos. Viçosa. 143 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa. 1988.

FRIZZONE, A. A.; REZENDE, R.; CAMARGO, A. P.; COLOMBO. A. Sistema pivô central. Editora Eduem – Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2018. 355p.

MELLO, J. L. P. Drenagem agrícola (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ). Disponível em http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/jorge/downloads/Drenagem_Versao 3.0.pdf

MILLAR, A. A. Drenagem de terras agrícolas: bases agronômicas. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1978. 276p.

MIRANDA, J.H. 1997. Modelo para simulação da dinâmica da água em sistemas de drenagem subterrânea e cálculo do espaçamento econômico entre drenos. Piracicaba. 89 p. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 1990.

PAULINELLI, A., DOURADO NETO, D., MANTOVANI, E. C. Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: técnica e cultura. Piracicaba: ESALQ – USP, 2021. 598p. Disponível em http://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/630

SCALOPPI, E.J.; BRITO, R.A.L. Qualidade da água e do solo para irrigação. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.12, n.139, p.80-94, 1986.

SKAGGS, R. Wayne; YOUSSEF, M. A.; CHESCHEIR, G. M. DRAINMOD: Model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE, v. 55, n. 4, p. 1509-1522, 2012.

Um dos grandes desafios da agricultura contemporânea está em manter o equilíbrio entre a produção agrícola e a sustentabilidade do meio ambiente. Isto requer o uso de tecnologias que sejam capazes de reduzir as vulnerabilidades e estresses no ambiente produtivo.

Dentre as tecnologias de maior impacto na sustentabilidade dos sistemas agrícolas destaca-se a Drenagem que tem multifuncionalidade na instalação, manutenção e recuperação de Projetos agrícolas por sua aplicabilidade no controle do excesso de água e sais no solo, na melhoria das condições mecânicas, físicas e químicas do ambiente edáfico e na prevenção de processos de degradação que podem comprometer a produtividade.

O reconhecimento da importância da Drenagem Agrícola para uma agricultura sustentável a longo prazo é observado no e-book Drenagem Agrícola – Fundamentos e Aplicações, concebido de forma a estimular o desenvolvimento intelectual, crítico e prático do seu público alvo (docentes, graduandos, pós-graduandos e profissionais da área) de modo a capacitá-los para o planejamento e execução da drenagem eficiente, que promova a aeração do solo, evite o acúmulo de sais e viabilize a realização de operações agrícolas, conforme as demandas da propriedade, com o propósito de contribuir para o manejo eficiente da água no solo, resultando em sistemas produtivos mais sustentáveis.

Vera Lucia Antunes de Lima
Professora Titular – Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Campina Grande

Entre os principais benefícios da drenagem agrícola destacam-se a incorporação de novas áreas à produção, o aumento da produtividade agrícola, o controle da salinidade do solo, a recuperação de solos salinos e/ou alcalinos, bem como a contribuição para a melhoria das condições de saúde pública e animal.

A Engenharia Agrícola brasileira demanda informações técnico-científicas que contribuam para a adequada gestão dos recursos hídricos, incluindo, de forma especial, o manejo e a drenagem dos solos utilizados para fins agrícolas. Nesse contexto, o Brasil dispõe de ampla experiência nas áreas de ensino, pesquisa e extensão, desenvolvida por suas instituições e por profissionais que vêm contribuindo para o avanço do conhecimento e das tecnologias relacionadas à agricultura irrigada e à conservação dos recursos naturais.

É nesse cenário que se insere o e-book versão 2 Drenagem Agrícola – Fundamentos e Aplicações, que se apresenta uma importante contribuição para estudantes de Graduação e Pós-Graduação, profissionais, pesquisadores e demais interessados no tema. A obra busca abordar os fundamentos e as aplicações da drenagem agrícola de maneira pragmática, didática e acessível, aproximando os conhecimentos técnico-científicos das demandas e dos desafios encontrados na prática agrícola.

Marcos Vinícius Folegatti
Professor Titular Sênior
Departamento de Engenharia de Biossistemas - ESALQ/USP

ISBN 978-65-02-45027-7