



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
Departamento de Engenharia de Biosistemas

**Simulação da produtividade do milho e viabilidade econômica da drenagem
pelo modelo SISDRENA**

Simulation of maize productivity and economic feasibility of drainage by
SISDRENA model

Relatório final referente à disciplina
0111000 – “Trabalho de Conclusão de
Curso em Engenharia Agrônômica” da
Escola Superior de Agricultura “Luiz
de Queiroz”-USP.

Aluno: Guilherme Coelho Portilho

(Engenharia Agrônômica nº USP: 8019968)

E-mail: guilherme.coelho.portilho@usp.br

Orientador: Prof. Dr. Jarbas Honorio de Miranda

Piracicaba
Dezembro de 2017

Guilherme Coelho Portilho
Bacharel em Engenharia Agrônômica

**Simulação da produtividade do milho e viabilidade econômica da drenagem
pelo modelo SISDRENA**

Orientador:

Prof. Dr. **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de bacharel em Engenharia Agrônômica

Piracicaba

2017

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso
aos meus pais, Máercio e Marislene.

Agradecimentos

Gostaria em primeiro lugar de agradecer à Deus por me proporcionar sempre saúde e força para chegar até aqui.

Agradecer também aos meus pais, Maércio de Góis Portilho e Marislene Guimarães Coelho Portilho e a minha irmã, Isadora Coelho Portilho, por me apoiarem nas decisões tomadas e me motivarem sempre que foi necessário, principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos meus avós Tércio Alves Portilho e Cleuza de Góis Portilho, que me deram todo o apoio necessário e que me ofereceram suporte em muitos momentos da jornada de dedicação.

Agradecer pelo apoio que tive de todos os amigos que a vida em república me proporcionou. Durante os anos de graduação, o suporte de todos os membros da República Capim K-nela foi essencial.

Ao meu amigo Luciano Alves, doutorando do Departamento de Engenharia de Biosistemas, e que foi uma pessoa fundamental em minha motivação para finalizar esse trabalho e que ofereceu sempre todo o suporte de conhecimento graças a ampla experiência no campo de estudo do presente trabalho.

Agradecimento especial ao Prof. Dr. Jarbas Honorio Miranda, que me instruiu semanalmente para a elaboração desse trabalho, oferecendo todos os recursos necessários, e que possibilitou a realização do trabalho.

Por fim, agradecer também a minha namorada, Poliana Silva Rezende, que me ouviu sempre que foi necessário, me apoiou nos momentos de dificuldade e que foi de extrema importância para a finalização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	7
SUMMARY	8
1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. Objetivos Gerais do TCC.....	13
2.2. Objetivos da Pesquisa	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. Milho.....	14
3.2. Água no solo.....	15
3.2.1. Solo.....	15
3.2.2. Tipos de Solo	15
3.2.3. Densidade do solo	17
3.2.4. Porosidade do solo	17
3.2.5. Curva de retenção de água no solo	18
3.3. Drenagem de terras agrícolas.....	20
3.3.1. Objetivos.....	20
3.3.2. Águas subterrâneas.....	20
3.3.3. Lençol freático.....	21
3.4. Modelagem computacional.....	22
3.4.1. Modelagem computacional aplicada à drenagem	23
3.5. Análise econômica de projetos de drenagem.....	26
3.5.1. Indicadores econômicos.....	27
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
4.1. Modelo SISDRENA	29
4.2. Curva de retenção de água.....	33
4.3. Dados climáticos	35
4.4. Viabilidade econômica.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5.1. Simulações da produtividade relativa do milho (espaçamento entre drenos, profundidade do dreno e diferentes tipos de solo)	38
5.2. Análise econômica.....	48
6. DIFICULDADES SURGIDAS	51
7. CONCLUSÕES.....	51
8. REFERÊNCIAS.....	53

Simulação da produtividade do milho e viabilidade econômica da drenagem pelo modelo SISDRENA

Autor: GUILHERME COELHO PORTILHO

Orientador: Prof. Dr. JARBAS HONORIO DE MIRANDA

RESUMO

A drenagem de áreas agrícolas tem a finalidade de viabilizar o cultivo de uma área ou de aumentar o potencial produtivo por meio da retirada do excesso hídrico da região da zona radicular das plantas. Embora a prática de drenagem não tenha impacto tão significativo no Brasil quanto em outros países como os Estados Unidos e Holanda, os estudos sobre o tema têm evoluído. Os estudos contribuem para avaliar as condições adequadas de implantação do sistema de drenagem. Portanto, é de grande importância a realização de projeto de drenagem. Com o propósito de simular o comportamento do projeto de drenagem em campo, modelos computacionais foram desenvolvidos. Dessa forma, os objetivos do presente trabalho foram simular as produtividades relativas da cultura de milho em três diferentes tipos de solo para diferentes profundidades de drenos e espaçamento entre drenos, além de realizar análise de viabilidade econômica do projeto de drenagem para cada um dos tipos de solo. O SISDRENA foi o modelo utilizado e tem a funcionalidade de contabilizar os principais parâmetros que tenham impacto no balanço de água. O modelo tem como dados de saída a previsão da flutuação do lençol freático e o impacto do excesso ou déficit hídrico na zona radicular em produtividade relativa da cultura. Para a realização das simulações, foram utilizados três solos de classes texturais distintas (condutividade hidráulica saturada K_s : 0,148 m dia⁻¹ (Solo 1, “médio”), 0,132 m dia⁻¹ (Solo 2, “argiloso”) e 0,182 m dia⁻¹ (Solo 3, “arenoso”). As características dos solos utilizados foram obtidas a partir de valores tabelados do USDA, e que foram utilizados para a simulação da produtividade relativa da cultura de milho para condições climáticas de Piracicaba, SP. A série histórica utilizada no presente estudo foi de 100 anos (1917 a 2016). Nas simulações realizadas pelo modelo SISDRENA, foram utilizadas como variáveis a profundidade dos drenos (0,9 m, 1,1 m e 1,3 m) e o espaçamento entre drenos (variando de 10 a 100 m), para cada um dos três tipos de solo e para os anos com valores distintos de chuva acumulada anual (valores médios, maior, menor e intermediário em termos de acúmulo de chuva). Dessa forma, foi possível identificar o comportamento da produtividade relativa de milho para as diferentes condições e em uma etapa final foi realizada uma análise econômica. Em relação ao tipo de solo, foi observado que o solo de textura arenosa apresentou as melhores produtividades relativas, enquanto o solo argiloso apresentou os menores valores de produtividade. Por outro lado, foi observado maiores ganhos de produtividade relativa para o solo argiloso com a adição da drenagem quando comparado aos solos de textura arenosa e média. Diante dos resultados de viabilidade econômica, foi observado retorno para os três tipos de solos estudados, sendo que o de textura mais arenosa foi o que obteve melhores respostas econômicas. O espaçamento de 20 m e a profundidade de drenos igual a 1,3 m foi a mais econômica.

Palavras-chave: Drenagem, SISDRENA, Lençol Freático.

Simulation of maize productivity and economic feasibility of drainage by the SISDRENA model

Author: GUILHERME COELHO PORTILHO

Adviser: Prof. Dr. JARBAS HONORIO DE MIRANDA

SUMMARY

The drainage of agricultural areas has the purpose of enabling the cultivation of an area or increasing the productive potential by removing the water excess from the region of the root zone of the plants. Although drainage practice does not have as significant an impact in Brazil as in other countries such as the United States and the Netherlands, studies have evolved. The studies contribute to assess the proper conditions of drainage system implantation. Therefore, drainage design is of great importance. With the purpose of simulating the behavior of the drainage project in the field, computational models were developed. Thus, the objectives of the present work were to simulate the relative yields of maize crop in three different soil types for different drainage depths and spacing between drains, as well as to perform economic feasibility analysis of the drainage project for each type of soil. SISDRENA was the model used and has the functionality to account for the main parameters that have an impact on the water balance. The model has as output data the prediction of the water table fluctuation and the impact of the excess or water deficit in the root zone on the relative productivity of the crop. For the simulations, three soils of different textural classes (saturated hydraulic conductivity K_s : 0.148 m day⁻¹ (Soil 1, "medium"), were used 0.132 m dia⁻¹ (Soil 2, "clayey") and 0.182 m day⁻¹ (Soil 3, "sandy"). The characteristics of the soils used were obtained from tabulated USDA values, which were used to simulate the relative productivity of the maize crop for the climatic conditions of Piracicaba, SP. used in the present study was 100 years (1917 to 2016). In the simulations performed by the SISDRENA model, the depth of the drains (0.9 m, 1.1 m and 1.3 m) and the spacing between drains (ranging from 10 to 100 m) were used as variables for each of the three types (mean, major, minor and intermediate values in terms of accumulation of rainfall). In this way, it was possible to identify the behavior of the relative productivity of maize for the different conditions and in a final stage an economic analysis was performed. Regarding the soil type, it was observed that the soil with sandy texture presented the best relative productivity, while the clay soil had the lowest values of productivity. On the other hand, higher relative productivity gains were observed for clayey soils with the addition of drainage when compared to soils of sandy and medium texture. Considering the results of economic feasibility, a return was observed for the three types of soils studied, and the one with the sandy texture was the one that obtained better economic responses. The spacing of 20 m and the depth of drains equal to 1.3 m was the most economical.

Keywords: Drainage, SISDRENA, Water Table.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema dos principais componentes de fluxo considerados pelo modelo SISDRENA (Miranda, 1997).	29
Figura 2. Fluxo de água no solo em mm dia^{-1} para os solos de textura “argilosa”, “média” e “arenosa”, variando do nível 0 do solo até a profundidade de 200 centímetros.	35
Figura 3. Variação da produtividade relativa da cultura do milho em relação ao espaçamento entre drenos variando de 10 a 100 metros para solo 1 de “textura média” e profundidade dos drenos igual a 0,9 metros (a), 1,1 metros (b) e 1,3 metros (c).	40
Figura 4. Variação da produtividade relativa da cultura do milho em relação ao espaçamento entre drenos variando de 10 a 100 metros para solo 2 de “textura argilosa” e profundidade dos drenos igual a 0,9 metros (a), 1,1 metros (b) e 1,3 metros (c).	43
Figura 5. Variação da produtividade relativa da cultura do milho em relação ao espaçamento entre drenos variando de 10 a 100 metros para solo 3 de “textura arenosa” e profundidade dos drenos igual a 0,9 metros (a), 1,1 metros (b) e 1,3 metros (c).	45
Figura 6. Variação da produtividade relativa da cultura do milho em relação ao espaçamento entre drenos variando de 10 a 100 metros para os diferentes tipos de solo e profundidade dos drenos igual a 0,9 metros (a), 1,1 metros (b) e 1,3 metros (c).	47
Figura 7. Análise de Valor Presente Líquido (VPL) para os solos de textura “média” (a), “argilosa” (b) e “arenosa” (c) para três profundidades de drenos, 0,9 metros, 1,1 metros e 1,3 metros para diferentes espaçamentos entre drenos de 10 a 100 metros.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros de condutividade hidráulica para classes de solos USDA de acordo com o modelo Rosetta.	34
Tabela 2. Relação dos parâmetros de entrada no modelo de van Genuchten (1980) dos três tipos de solos utilizados na simulação.	34
Tabela 3. Condições de máxima produtividade relativa (YR) para os três tipos de solo.	48
Tabela 4. Condições de espaçamento entre drenos e profundidade do dreno de melhor viabilidade econômica medido em Valor Presente Líquido (VPL) para os três tipos de solos.	49

1. INTRODUÇÃO

A drenagem é uma técnica globalmente praticada com o intuito de retirada do excesso de água da zona radicular. Dessa forma, o uso da drenagem está diretamente relacionado às condições climáticas da região e também do solo em questão. A prática da técnica é pouco utilizada no Brasil quando comparada com países que possuem problemas mais sérios de drenagem e também problemas com extensão de áreas, como a Holanda.

A retirada do excesso hídrico promovida pela drenagem ocorre devido ao rebaixamento do lençol freático do ambiente drenado. O objetivo da retirada do excesso de água é tornar agricultável uma determinada área, ou aumentar o potencial produtivo proporcionando às plantas ambiente mais apropriado ao cultivo.

Embora o uso da drenagem possa ter incidência significativa em aumentos de produtividade, é fundamental a realização de projeto para determinar a viabilidade ou não de implantação do sistema. Existem inúmeros parâmetros a serem considerados em projeto de drenagem para determinar o espaçamento entre drenos e a profundidade de dreno que tenha melhor retorno econômico do investimento. Embora o objetivo da etapa de projeto do sistema seja determinar o modelo de melhor viabilidade econômica, não necessariamente esse projeto coincidirá com as condições de maior produtividade da cultura.

Existem inúmeros fatores que impactam na produtividade das culturas e que devem ser considerados nos projetos de drenagem. Dentre as variáveis consideradas, deve-se destacar a curva de retenção de água no solo, é um atributo físico que pode ser estimado pela câmara de Richards e expressa a relação entre a quantidade de água do solo e o potencial mátrico. A curva de retenção de água varia de um solo para o outro por consequência da diferença em estruturação e composição textural, que acarretam em diferentes quantidades de macro e microporos.

Devido à grande quantidade de parâmetros envolvidos para o dimensionamento adequado de um projeto de drenagem e que acabam dificultando a avaliação do melhor sistema para cada situação de solo e climática, modelos computacionais têm sido desenvolvidos com o objetivo de facilitar a elaboração de projetos. Os modelos atualmente utilizados auxiliam na computação das inúmeras variáveis que impactam no sistema de drenagem, além de garantir agilidade e precisão na elaboração dos projetos, auxiliando, portanto, na tomada de decisão mais assertiva quanto ao modelo de drenagem a ser utilizado. Dentre os modelos computacionais em destaque no mercado atualmente, destaca-se o DRAINMOD, SIMDRENO e o SISDRENA.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais do TCC

2.1.1 – Proporcionar ao estudante de Engenharia Agrônômica a chance de atualizar os conhecimentos obtidos ao longo do curso e aprimorar estes em uma determinada área em que se tem maior afinidade;

2.1.2 – Desenvolver um trabalho técnico-científico com “caráter profissional” esperado por Engenheiros Agrônomos em atividade no Brasil; e

2.1.3 – Desenvolver senso crítico ao analisar trabalhos e extrair destes tudo que for relevante e possível de aplicar no campo.

2.2. Objetivos da Pesquisa

2.2.1 – Simular a produtividade de milho utilizando o modelo SISDRENA para diferentes tipos de solo (Tabela do USDA), para diferentes espaçamentos entre drenos (10 a 100 m) e diferentes profundidades de dreno (0,9 m, 1,1 m e 1,3 m) para o município de Piracicaba, SP; e

2.2.2 – Realizar análise de viabilidade econômica para cada variação de espaçamento entre drenos, para as três profundidades de drenos distintas e para os três diferentes tipos de solo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Milho

A cultura do milho (*Zea Mays*) é originária da região Andina da América Central. É um dos cereais mais importantes tanto para o consumo do homem quanto para o animal. É utilizado para produção de sementes e alimento. Em termos de produção global, o milho é a terceira cultura mais importante, ficando atrás do arroz e do trigo. A demanda por milho está crescendo por ambos os tipos, fresco e processado. A redução de áreas disponíveis para a expansão de plantio significa que a produtividade terá de ser aumentada. O correto fornecimento de água, incluindo o uso eficiente de toda a água disponível, ajudará nesta dificuldade. A produção mundial atual fica em torno de 876 milhões de toneladas de grãos de milho, produzida em 158 milhões de ha. Os EUA, China e Brasil são os maiores produtores de milho do mundo, respondendo por aproximadamente 62% da produção mundial total. Os quatro países que mais exportam são os Estados Unidos, União Europeia, África do Sul e Argentina. O milho é um forte candidato a cultura de produção de etanol, com rendimento de 3 a 4 m³ ha⁻¹ (NETAFIM, 2013).

O milho é uma cultura amplamente disseminada por todo o planeta e é utilizado principalmente como fonte de energia, seja ela para animais, por meio de rações, para o homem, diretamente ou mesmo para a produção de etanol. Os Estados Unidos se destacam como maior produtor de milho do mundo, sendo responsáveis por quase metade do milho produzido pelo mundo todo. O Brasil se destaca como o terceiro maior produtor de milho do mundo, totalizando 72,8 milhões de toneladas produzidas do grão (EMBRAPA, 2012).

A cultura de milho pode ser cultivada nas mais variadas condições de clima e manejo: do nível do mar até áreas acima de três mil metros de altitude; de áreas de menos de 600 milímetros de precipitação até áreas com mais de 2.500 milímetros no ano; em lavouras com menos de 10 mil plantas ha⁻¹ e produtividades menores que 1.000 kg ha⁻¹ até lavouras com mais de 100 mil plantas ha⁻¹ e produtividades maiores do que 15.000 kg ha⁻¹; de sementes de paiol ou de variedades antigas até sementes transgênicas triple stacks (com três diferentes características combinadas) com tratamentos adicionais. Em todo o mundo, a área anual destinada para o plantio de milho é de cerca de 160 milhões de hectares, sendo que a maior parte desta área é concentrada na Ásia, cerca de 30 milhões de hectares cultivados apenas na China (ABRAMILHO, 2010).

O cultivo do milho é realizado sob diferentes formas e com diferentes propósitos para cada região do planeta. Na China, por exemplo, o plantio e a colheita são realizados principalmente de forma manual, devido ao fato da mão-de-obra barata do país, porém pouco qualificada. Dessa

forma, a implantação de tecnologias é pequena nestas propriedades, o que acaba resultando em baixas produtividades. Como contra exemplo, existem os Estados Unidos, maiores criadores e usuários de tecnologias do planeta. Como resultado de tamanho investimento em mecanização e automação do cultivo, desde o plantio até a colheita, eles são também responsáveis pelas maiores produtividades de milho, produzindo cerca de 313,9 milhões de toneladas de milho, com médias superiores a 10 toneladas por hectare (EMBRAPA, 2012).

3.2. Água no solo

3.2.1. Solo

Para o campo de estudos da engenharia agrônoma, o termo solo refere-se à camada terrestre agricultável. O material de origem do solo são os diferentes tipos de rochas, que sofrem processos de intemperismo físicos, químicos e biológicos, além de decomposição e recombinação. A partir da ocorrência combinada desses processos ao longo dos anos, o material rochoso se transformou em material poroso de características peculiares (REICHARDT E TIMM, 2004).

Segundo Grigolon (2013), o solo é um material poroso que armazena líquido e gases em seus poros. O tamanho do espaço entre os poros do solo é consequência do arranjo de suas partículas sólidas. Dessa forma, o solo é dividido em composição sólida, líquida e gasosa. Segundo Reichardt e Timm (2004), o espaço poroso do solo que não está preenchido com água é ocupado pela fração gasosa. Basicamente, a fração gasosa é constituída por ar com altos níveis de CO₂ e baixa concentração de O₂.

A fração sólida do solo é constituída por material mineral e orgânico. A proporção mineral de constituição provém da rocha de material de origem, enquanto a parte orgânica é composta por organismos vivos e resíduos de plantas e animais em decomposição. Por outro lado, a fração líquida de composição do solo é uma solução aquosa de sais minerais e substâncias orgânicas que está retida nos poros em diferentes graus de persistência, variando de acordo com a composição mineralógica do solo (GRIGOLON, 2013).

3.2.2. Tipos de Solo

O solo pode ser classificado em diferentes classes texturais. A textura do solo refere-se à proporção relativa das classes de tamanho de partículas. As classes de tamanhos diferentes são areia, silte e argila e que podem conter partículas de mesma classe mineral (COOPER, 2015).

As partículas areia, silte e argila, em condições normais, encontram-se aglomeradas em unidades conhecidas por agregados ou unidades estruturais. Esse termo refere-se ao tamanho, forma e aspecto do conjunto dos agregados que aparecem naturalmente no solo (LEPSCH, 2010).

A fração mineralógica areia é composta por minerais primários, sendo eles quartzo e outros silicatos. Já a fração argila é composta por minerais secundários, sendo eles argilominerais como a caulinita e esmectita, além de óxidos como hematita e goethita. Dessa forma, a composição de cada fração mineralógica do solo determina o tamanho da granulometria. A fração areia é a composição de maiores partículas, silte são partículas de tamanho intermediário e a fração argila é composta por partículas de menor tamanho (COOPER, 2015).

Segundo Lepsch (2010), a estrutura do solo é atributo fundamental porque faz com que ele seja um meio poroso. A estrutura agregada do solo ocorre devido às partículas de areia, silte e argila que aderem umas às outras, mantendo assim maior ou menor grau de coesão. De qualquer forma, de acordo com Reinert e Reichert (2006), a estrutura do solo não é um fator de crescimento das plantas ou um indicativo direto de qualidade ambiental. Entretanto, a estrutura está indiretamente correlacionada com diversos fatores que impactam no crescimento das plantas e na produtividade dos cultivos, dentre eles o suprimento de água para as plantas, a aeração das raízes, a disponibilidade de nutrientes, atividade microbiana, profundidade de raízes e outros fatores.

De forma geral, os arenitos geralmente originam solos de textura arenosa, de baixa fertilidade, alta propensão a sofrer erosão e baixa capacidade de armazenamento de água. Por outro lado, as rochas basálticas originam solos de textura argilosa e com altos teores de ferro. Solos de textura argilosa tem diferentes colorações e podem ter variáveis durezas, pegajosidades e plasticidades, dependendo da composição de minerais e matéria orgânica (LIMA et al., 2007). Como consequência, os solos argilosos têm maior capacidade de retenção de água e nutrientes que os arenosos (LIMA E LIMA, 2000).

Segundo Lima et al. (2007), a textura do solo determina algumas propriedades importantes de cada tipo de solo. Solos com textura argilosa tem como principais características a capacidade de retenção de água elevada, propriedades químicas mais favoráveis que os solos arenosos, maior porosidade total e estruturação do solo em formatos, o que ajuda contra alguns problemas físicos, como a dificuldade de aeração ou a circulação de água. Entretanto, para os solos argilosos que não são bem estruturados, acabam apresentando dificuldade de circulação de água e aeração deficiente.

Os solos de textura arenosa, ou seja, teor de argila inferior a 30%, são predominantemente claros, com exceção aos solos arenosos com elevada presença de matéria orgânica. Quando comparados aos solos de textura fina (solos argilosos e muito argilosos), os solos arenosos possuem menor capacidade de retenção de água e menor porosidade total. Além disso, para os solos arenosos com baixo teor de matéria orgânica, grande parte dos nutrientes adicionados via adubação permanecem na solução do solo, intensificando a lixiviação e a consequente contaminação das águas subterrâneas (LIMA et al., 2007).

3.2.3. Densidade do solo

A densidade do solo (eq. 1), é afetada diretamente pelas intervenções e alterações realizadas pelo homem, como a compactação do solo causada pelo uso de máquinas agrícolas. A compactação promove redução do volume total do solo (V_t) para uma mesma massa de solo (m_s), aumentando consequentemente a densidade do solo, o que acaba impactando significativamente na capacidade de retenção e o movimento de água no solo.

$$d_s = \frac{m_s}{V_t} \quad (1)$$

Em que:

d_s – Densidade do solo (g cm^{-3});

m_s – Massa de solo seco (g);

V_t – Volume total de uma amostra de solo com estrutura indeformada (cm^3).

3.2.4. Porosidade do solo

A porosidade do solo indica a fração de poros contidos numa determinada amostra de solo. A equação de porosidade do solo “ α_s ” está apresentada na equação 2.

$$\alpha_s = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

α_s – Porosidade do solo (%);

V_p – Volume de poros do solo (cm^3);

V_t – Volume total do solo (cm^3);

V_s – Volume da fase sólida (cm^3).

3.2.5. Curva de retenção de água no solo

O solo, além de funcionar como suporte físico para o apoio das plantas, funciona também como um reservatório natural de água. Em condições naturais de cultivo, o reabastecimento do reservatório do solo ocorre descontinuamente pela chuva. Dessa forma, é importante acompanhar a variação do armazenamento de água no solo para determinar a necessidade ou não de complementar o sistema com irrigação (GRIGOLON, 2013).

A curva de retenção de água no solo é fundamental para definir as condições que potencialmente podem provocar o processo de fluxo em um meio poroso não saturado (LEE, 2011). Para avaliar as características de retenção de água no solo, a curva relaciona o teor ou o conteúdo de água no solo com a força (tensão) com que ela está retida pelo mesmo. As características de condutividade hidráulica e retenção de água do solo que determinam a facilidade com que a água é conduzida através do solo e a capacidade de armazenamento de água para cada determinada classe textural (GRIGOLON, 2013).

Segundo Reichardt (1990), o principal fator que interfere na capacidade de retenção de água no solo é o tipo de solo, uma vez que a composição textural do solo define a área de contato entre as partículas sólidas e a água. Além disso, a estrutura do solo também influencia na capacidade de condução hidráulica e retenção de água em determinado tipo de solo, e como consequência, a distribuição de macroporos e microporos.

Existem dois processos básicos que explicam a retenção de água pelo solo, a capilaridade e a adsorção. Em solos em que a sucção é baixa, geralmente solos arenosos e siltosos, o mecanismo responsável pela ascensão e retenção de água é a capilaridade, governada pela estrutura das partículas e dos vazios (MONCADA, 2008). A capilaridade ocorre devido à presença de microporos no solo, que são poros com diâmetro inferior a 30 μ m. A capilaridade é muito importante na faixa mais úmida do solo e é mais influenciada pela estrutura. Por outro lado, a adsorção é muito importante na faixa mais seca do solo e é influenciada principalmente pela textura e pela superfície específica. Graças à adsorção, algumas moléculas de água são firmemente retidas nas superfícies das partículas sólidas do solo (HILLEL, 1971; REICHARDT, 1990 e LIBARDI, 1995).

Para uma amostra de solo com água no seu espaço poroso, quanto mais seca estiver a amostra, maior é quantidade de energia necessária para tirar a água restante do seu interior por meio da sucção. Dessa forma, pode-se observar que o solo retém a água no seu espaço poroso com forças cujas intensidades aumentam conforme a quantidade de água retida diminui. Essa força de

retenção de água é denominada de força mátrica e está relacionada à capilaridade e à adsorção e dão origem ao potencial mátrico (LIBARDI, 1995).

Dado ao aumento de dificuldade de se retirar água do solo por meio da sucção para solos com baixa quantidade de água, pode-se criar um gráfico relacionando as umidades volumétricas (θ) com os esforços de sucção ou potenciais matriciais da água (ψ_m), que no caso é a curva de retenção de água no solo (JURY et al, 1991). Segundo Libard (1995), foram desenvolvidos mecanismos que pudessem buscar uma correlação entre o aparelho e o conteúdo de água no solo e determinar a curva de retenção.

De acordo com Pereira (2004), as curvas de retenção de água no solo variam de acordo com a textura do solo. Para solos arenosos, pequenas variações de tensão de sucção podem proporcionar uma variação de umidade significativa, enquanto que essa variação de umidade é menor para solos mais argilosos. Esse fato dos solos argilosos serem mais resilientes à maiores pressões de sucção se deve ao fato de possuírem uma maior quantidade de poros de dimensões menores, quando comparados com solos arenosos. Dessa forma, os poros de menor diâmetro (microporos) intensificam o efeito de capilaridade. Além disso, em solos argilosos ainda existem um efeito do mecanismo de adsorção mais intenso que para de texturas grosseiras.

3.2.5.1. Câmara de Richards

Dentre os diferentes aparelhos para determinação da curva de retenção de água no solo, o método da câmara de pressão de Richards é considerado clássico e o mais utilizado (RICHARDS E FIREMAN, 1943).

O sistema da câmara de Richards consta de panela de pressão, placa cerâmica porosa e equipamentos de produção e controle de pressão, que podem utilizar tanto amostras deformadas como indeformadas de solo. A estrutura do solo tem influência na retenção de água para valores desde próximo a 0 kPa até valores entre -100 a -200 kPa (HILLEL, 1998; RICHARDS, 1965). Segundo Richards (1965), a extração de água realizada pela câmara acontece em razão da diferença de potencial entre a placa porosa e a amostra de solo. O fluxo de água é exponencialmente reduzido quanto mais negativo for o potencial matricial, principalmente por volta de -1500 kPa.

Embora a câmara seja tradicionalmente utilizada, esse método de determinação da curva de retenção apresenta algumas dificuldades, dentre elas: “a determinação do ponto de equilíbrio entre a pressão aplicada e a água retida no solo, o contato amostra-placa, o longo tempo exigido para as medidas e o custo do equipamento” (TAVARES et al., 2008). Dessa forma, alguns métodos

alternativos à câmara vêm sendo pesquisados, como o método da centrifugação de amostras de solo, o Dewpoint Potentia Meter, o funil de Haines e a mesa de tensão, dentre de outros.

3.3. Drenagem de terras agrícolas

3.3.1. Objetivos

A prática da drenagem é muito realizada em escala global, o uso dessa técnica no Brasil é muito inferior quando comparado a países que necessitam da drenagem como prática fundamental para o cultivo, como os Estados Unidos e a Holanda por exemplo. Dessa forma, o principal objetivo que se almeja através da drenagem agrícola é criar um ambiente favorável ao crescimento das plantas e preservar as propriedades físicas e químicas do solo (FERREIRA, 2003).

Segundo Lima (2012), o objetivo da drenagem artificial é “retirar o excesso de água aplicada na irrigação ou proveniente das chuvas, isto é, controlar a elevação do lençol freático, bem como possibilitar a lixiviação dos sais trazidos nas águas de irrigação, evitando a salinização”. Entretanto, antes de realizar a drenagem artificial de uma área, é importante avaliar os possíveis impactos ambientais.

Dentre os inúmeros benefícios proporcionados por meio da realização da drenagem do solo, pode-se destacar a incorporação de novas áreas à produção agrícola, aumento da produtividade, recuperação de solos salinos, dentre outros. Entretanto, caso haja uma drenagem excessiva, fazendo com que o lençol freático abaixe de forma drástica, as plantas acabam sofrendo déficit hídrico, o que também impacta severamente em produtividade (FERREIRA, 2003).

Para a utilização da drenagem, é fundamental a realização de um projeto para adequar o melhor espaçamento e profundidade de drenos para cada tipo de solo e regime pluviométrico da região. Miranda (1997), destaca que para a realização de projetos, muitas vezes aspectos como o espaçamento entre drenos não tem sido aplicado de acordo com a teoria, mas sim com base na experiência prática do projetista. Além disso, de acordo com Duarte (1997), os critérios conservadores de dimensionamento fornecem o espaçamento entre drenos que acarreta em máxima produtividade para determinada cultura, mas não necessariamente retratando o cenário mais econômico.

3.3.2. Águas subterrâneas

De acordo com Borghetti et al. (2004), água subterrânea é toda a água que ocorre abaixo da superfície da Terra, preenchendo os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares,

ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas, e que sendo submetida a duas forças (de adesão e de gravidade) desempenha um papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios, lagos e brejos.

A água subterrânea constitui o maior reservatório de água doce do mundo, representando mais de 97% de toda a água doce disponível no planeta (excluindo glaciares e calotas polares). Os restantes 3% são, sobretudo, constituídos por águas superficiais (lagos, rios e pântanos) e pela umidade da zona superficial do solo (BORGHETTI et al., 2004).

De maneira geral, as águas subterrâneas são alocadas no que são conhecidos por aquíferos. Para o melhor entendimento do significado de aquífero, basta pensar numa enorme cisterna construída pela natureza para filtrar e armazenar a água localizada abaixo da Terra. Do ponto de vista científico, aquífero é uma formação geológica do subsolo, constituída por rochas permeáveis, que armazenam água em seus poros ou fraturas. O aquífero precisa ser uma formação rochosa capaz de permitir o armazenamento natural da água, caso contrário, esta água evaporaria ou tomaria outros rumos (BORGHETTI et al., 2004).

Dentre as inúmeras abundâncias do Brasil, uma das principais é o volume de água subterrânea armazenada em aquíferos, em especial, o Aquífero Guarani. O Aquífero Guarani é uma das maiores reservas de água subterrânea do mundo, estendendo-se desde a bacia Sedimentar do Paraná até a Bacia do Chaco-Paraná. Está localizado no centro-leste da América do Sul, entre o 12° e o 35° de latitude sul e o 47° e o 65° de longitude Oeste (REBOUÇAS, 2004).

No Brasil, o uso das águas do Aquífero Guarani destina-se, na maioria, para abastecimento humano (70%), em segundo lugar, ao setor industrial (25%) e os restantes 5% são usados em irrigação, no hidrotermalismo de lazer recreativo e terapêutico (CALCAGNO, 2001).

3.3.3. Lençol freático

De acordo com Borghuetti et al. (2004), os aquíferos são reservas permanentes de água que recebem reabastecimento de água a partir das precipitações. Esta área de reabastecimento é conhecida como zona de recarga, que pode ser direta ou indireta. Abaixo da linha conhecida como nível freático ou lençol freático o solo estará na condição de submersão (se em condição de água livre) e acima o solo estará saturado até uma determinada altura. Nos solos, acima da região de saturação, a água se eleva por entre os interstícios de pequenas dimensões deixados pelas partículas sólidas, além do nível do lençol freático por capilaridade e a altura alcançada depende da natureza do solo.

As zonas de recarga direta são aquelas em que as águas da chuva se infiltram diretamente no aquífero pelas suas áreas de afloramento e fissuras de rochas sobrejacentes. Sendo assim, a recarga sempre é direta nos aquíferos livres, ocorrendo em toda a superfície acima do lençol freático. Já as zonas de recarga indireta são aquelas em que o reabastecimento do aquífero se dá a partir da drenagem superficial das águas e do fluxo subterrâneo indireto, ao longo do pacote confinante sobrejacente, nas áreas em que a carga potenciométrica favorece os fluxos descendentes. Por fim, as zonas de descarga são aquelas por onde as águas emergem do sistema, alimentando os rios e jorrando com pressão por poços artesianos (SILVA, 2011).

3.4. Modelagem computacional

De acordo com Caixeta Filho (2001), modelagens são representações idealizadas para situações do mundo real. Apesar da dificuldade para a validação de modelos, sempre haverá indicação do nível de sucesso do processo da modelagem. Thornley (1976) relata que são equações ou o conjunto delas, podendo representar quantitativamente as suposições e hipóteses idealizadas sobre o sistema real.

Os modelos iniciaram-se nos anos 50, pois sua viabilidade tornou-se possível com o avanço das máquinas de processar e armazenar cálculos, que possibilitaram definir e determinar interações entre diferentes variáveis. Nos meados dos anos 60, emergiu o conceito de sistemas dinâmicos, facilitando as representações dos processos de fluxos e suas interações. Durante os anos 70, os sistemas dinâmicos foram formalizados, refinados e continuados através dos anos 80, primeiramente nas técnicas de programação computacional para verificação, validação e evolução dos modelos, tornando-se parte integral da ciência agrícola (CARVALHO, 2009).

Segundo Thorney e Johnson (2000) existem diversos tipos de modelos, sendo didaticamente divididos em modelos empíricos e mecanísticos. Modelos empíricos são fundamentalmente descrições diretas de dados observados, porém, podem ser extremamente úteis. Em um modelo empírico, todas as relações matemáticas descritas a partir da observação do sistema, por informações biológicas ou por qualquer conhecimento da estrutura do sistema estudado. Em geral, considera-se que os modelos empíricos sejam mais convenientes para o produtor rural, por não necessitar de aquisição de novas informações e serem normalmente mais simples.

Os modelos mecanísticos são relativamente mais complexos que os modelos empíricos. Entretanto, seu conteúdo normalmente aplica-se a uma maior gama de fenômenos. Baseiam-se na física e nos processos fisiológicos envolvidos no crescimento da cultura e, por este motivo,

oferecem mais possibilidades para manipulação e melhoria do sistema. Wallach et al. (2001) afirmaram que os modelos mecanísticos tornaram-se cada vez mais importantes nos últimos anos como ferramentas de ensino e pesquisa, bem como ferramentas de auxílio a tomada de decisão sobre o manejo de culturas.

Os modelos matemáticos podem ser positivos (observam vantagens comparativas quanto à reprodução adequada de séries históricas), tendo como exemplos o empírico-descritivo, mecanicista-explicativo, qualitativo e quantitativo ou normativo (impõe um determinado padrão, um comportamento), como exemplo a programação linear (CAIXETA FILHO, 2001).

3.4.1. Modelagem computacional aplicada à drenagem

Em função das inúmeras variáveis envolvidas na avaliação de dimensionamento dos sistemas de drenagem, a utilização de modelos computacionais torna-se desejável pela rapidez, precisão dos resultados obtidos e por permitir que um grande número de fatores e efeitos sejam contabilizados. Dessa forma, a modelagem é responsável em auxiliar na previsão de desempenho e ponderações de otimização existentes quanto ao sistema de drenagem agrícola (MIRANDA, 1997).

Os sistemas de drenagem projetados se comportam diferentemente em anos bastante úmidos e secos, o que acarreta em variações de produtividade das culturas. Portanto, ao correlacionar as variáveis de produção e a produtividade registrada nos diferentes anos, se torna possível avaliar os efeitos da drenagem sobre o crescimento e a produtividade das culturas (FEDDES, 1988).

De acordo com Costa (1994), um dos principais parâmetros para o desenvolvimento das culturas é a umidade do solo na zona radicular. A extrema importância desse fator é a facilidade no transporte de água e minerais quando as raízes se encontram em condições ideais. Entretanto, quando ocorre excesso ou déficit de umidade na zona radicular, as condições passam a ser de estresse para a planta. No caso de excesso de umidade, a adversidade não é necessariamente a presença direta do lençol freático por si só, mas sim a deficiência de aeração do solo nessas condições, o que acaba comprometendo a absorção de água e nutrientes e também no transporte destes através do sistema radicular. Consequentemente, as plantas acabam se tornando mais susceptíveis a doenças e a deficiências nutricionais.

Utilizando a equação de Schifgaarde, Wisser et al (1974) criaram um modelo para simular a variação temporal do lençol freático e estimar a produtividade para a cultura da alfafa. O

procedimento empírico utilizado na avaliação foi o proposto por Tovey (1964), sendo, portanto, consideradas as posições do lençol freático e a produtividade realizada para cada altura.

Desde o surgimento do modelo criado por Wisser et al (1974), melhorias na criação de novos modelos foram propostas por pesquisadores. Nos novos modelos propostos, além de considerar as posições de flutuação do lençol freático, o escoamento superficial e a retenção de parte da precipitação na zona radicular passaram a ser considerados nos cálculos.

3.4.1.1. Drainmod

Apesar da existência de limitações nos procedimentos de dimensionamento dos sistemas de drenagem, existem alguns modelos já desenvolvidos e atualmente em uso que apresentam resultados confiáveis de aplicação. Dentre os modelos computacionais em uso, um dos que vem tendo destaque é o modelo norte-americano DRAINMOD (SKAGGS, 1981).

Skaggs (1974) propôs o modelo numérico DRAINMOD para simulação da movimentação do lençol freático utilizando da equação de Richards para o cálculo de água na zona não saturada, enquanto o fluxo para drenos foi estimado pela equação de Hooghoudt. Entretanto, os recursos computacionais da época não permitiam que este modelo fosse aplicado para períodos de tempo maiores do que poucos dias.

O modelo DRAINMOD foi desenvolvido na Universidade Estadual da Carolina do Norte em 1980. O modelo prevê efeitos de drenagem e associações entre práticas de manejo da água no lençol freático, regime da água no solo e a produtividade dos cultivos. O modelo é utilizado com o intuito de analisar a hidrologia de certos tipos de áreas encharcadas e determinar se os critérios hidrológicos são satisfeitos para esse tipo de áreas em locais drenados ou parcialmente drenados. Além disso, o modelo é também utilizado para determinar a capacidade hidráulica dos sistemas de tratamento de águas residuais (SKAGGS, 1974).

O DRAINMOD foi originalmente criado para prever os efeitos de drenagem e práticas de manejo de água para controle da profundidade do lençol freático, além de prever as condições de água no solo, regime de fluxo de água e produtividade de cultivos artificialmente drenadas em regiões agrícolas em que o lençol freático é elevado (E.G., LUO et al., 2010; THORP et al., 2010). Para a utilização do modelo, é necessário a estruturação de balanço hídrico horário e diário no perfil de solo (SKAGGS, 1999). Dessa forma, a utilização deste modelo se torna inviável para a maior parte das localidades no Brasil por falta de banco de dados.

Devido à dificuldade encontrada de abastecer o DRAINMOD com os dados necessários para o seu funcionamento, Bengston et al. (1993) desenvolveu o modelo FWTMOD – Fluctuating Watertable Model que visa contornar a dificuldade de banco de dados a serem adicionados, uma vez que este modelo utiliza apenas entrada de dois parâmetros básicos, sendo eles o fator de reação (α) e um coeficiente de recarga para estimar a parcela infiltrada no solo da precipitação. Dentre as comparações realizadas entre os modelos DRAIMOD e FWTMOD, foi observado que ambos obtiveram resultados semelhantes em sistemas de drenagem convencional quanto a flutuação do lençol freático.

3.4.1.2. Simdreno

Com o objetivo de melhorar as simulações para o Brasil, Duarte (1997) desenvolveu o modelo conhecido como SIMDRENO. Esse modelo simula a posição do lençol freático e a umidade do solo na zona radicular. Entretanto, os dados de entrada do modelo são de séries históricas de dados diários de precipitação, evapotranspiração, parâmetros físico-hídricos do solo, cultura e geometria do sistema de drenagem, ao invés de dados horários como no modelo DRAINMOD. O modelo SIMDRENO estima a fração da precipitação que gera o escoamento superficial a partir do método do Número da Curva, calculando a posição do lençol freático, a recarga intermitente do lençol e ainda estima a umidade do solo na zona radicular.

O modelo SIMDRENO foi desenvolvido para o sistema operacional DOS, o que o torna de difícil utilização, além do modelo ter como dados de entrada de série histórica inseridos via teclado, demandando por essa razão grandes arquivos com as bases de dados. Por essa razão, Miranda (1997) considerou relevante o desenvolvimento de um novo modelo de simulação que fosse de mais fácil utilização e que atingisse representatividade a nível comercial.

3.4.1.3. Sisdrena

O modelo computacional SISDRENA que simula a posição do lençol freático, a evapotranspiração real e o armazenamento de água na zona radicular. Como dados de entrada, o modelo demanda séries históricas de dados diários de precipitação e evapotranspiração potencial, além de características físico-hídricas do solo, dados de sensibilidade da cultura ao excesso e à falta de água, sistema radicular e características do sistema de drenagem (MIRANDA, 1997).

O modelo SISDRENA tem como principais objetivos ser um modelo de simulação que contabilize o fluxo ascendente de água sobre o rebaixamento do lençol freático, estime escoamento superficial dependendo da profundidade do lençol freático no dia corrente, permitindo dessa forma contabilizar o efeito da drenagem subterrânea sobre a drenagem superficial, além de viabilizar o

modelo em linguagem de programação VISUAL BASIC 4.0, o que facilita ao usuário na utilização do modelo (MIRANDA, 1997).

3.5. Análise econômica de projetos de drenagem

De acordo com Miranda (1997), para a elaboração de projetos de drenagem, é de grande importância o conhecimento técnico, porém é imprescindível considerar também outros aspectos importantes para ajudar o projetista a decidir pela implantação do sistema de drenagem. Dentre os inúmeros aspectos a serem considerados na elaboração de um projeto de drenagem, um deles é o econômico. O objetivo primordial da drenagem é tornar produtiva uma área improdutivo ou aumentar o potencial produtivo de uma determinada área, correspondendo assim a expectativa do produtor. O lado econômico deve ser levado em consideração devido a influência significativa do valor econômico do projeto na tomada de decisão de implementar ou não o projeto.

Para determinar a viabilidade econômica dos investimentos é necessário realizar uma avaliação do projeto mediante o uso de critérios que busquem uma ordenação, com o objetivo de desconsiderar as opções menos atrativas ou de maior risco. Para projetos de drenagem, a viabilidade econômica deve resultar de uma análise de benefícios e custos econômicos de longo prazo, atendendo ao princípio de maximização da rentabilidade do investimento, ou seja, que o valor presente dos benefícios totais gerados pelo projeto seja maior que o valor presente de todos os custos necessários à sua implantação e posterior funcionamento, ambos descontados à mesma taxa (SOUSA NETO, 2012).

Segundo Buras (1974), é esperado que diferentes sistemas de drenagem, com características distintas, venham a ter respostas semelhantes de produtividade de uma dada cultura em situações de campo. De qualquer forma, com a utilização dos modelos computacionais direcionados para a finalidade de drenagem, a ótima drenagem do terreno é aquela que resulte na produtividade máxima para a cultura. Entretanto, para sistemas com precipitação elevada e baixa capacidade de drenagem, o projeto de drenagem ótimo seria com espaçamentos muito próximos. A quantidade de materiais e mão-de-obra utilizados em um projeto com essa intensidade acarretaria uma relação antieconômica. Dessa forma, o sistema adequado proposto é o que resulte em alternativa de menor custo das obras de drenagem e que proporcione maior relação benefício/custo (FERREIRA, 1987).

Para a realização do estudo de viabilidade econômica de um projeto de drenagem, um dos aspectos que devem ser considerados é a vida útil do projeto para ser realizado a depreciação e trazer o valor do investimento para valor presente. Segundo recomendações da FAO (1986), a vida

útil de projetos de drenagem que deve ser considerada é de cerca de 30 anos. Entretanto, a vida útil do projeto pode ser maior ou menor que a prevista pela FAO, variando significativamente de acordo com a manutenção por parte do agricultor.

Dentre os custos da implantação de um projeto de drenagem, os custos são divididos basicamente em despesas com instalação e manutenção. Quanto às despesas com instalação, os fatores de maior impacto envolvem a regularização dos cursos d'água e do terreno, tubos PVC para drenos principais e coletores e escavação dos emissores. Quanto à manutenção, destaca-se as custas para manter os drenos em boas condições de funcionamento (PIZARRO, 1978).

O custo de um projeto de drenagem pode variar significativamente de uma situação para outra. Mesmo que os projetos sejam bastante similares, as peculiaridades de cada região influenciam diretamente nas custas do projeto. O espaçamento entre drenos e a profundidade de instalação dos drenos influenciam fortemente na variação do custo do projeto (MIRANDA, 1997). Dessa forma, a variabilidade da necessidade de drenagem exigida de um terreno para outro é um fator que impacta no espaçamento e profundidade dos drenos. Além disso, a disponibilidade de maquinários e materiais necessários para o projeto, escala do projeto, existência ou não de empreiteiras de serviços e o custo da mão-de-obra da região são fatores que impactam diretamente no custo do projeto (BOUMANS et al, 1986).

De acordo com os estudos de Leitch (1983), os cálculos os custos de instalação de projetos para a região centro-oeste de Minnesota variam de US\$ 803 ha⁻¹ a US\$ 1.551 ha⁻¹ para drenos tubulares. Para drenos abertos, os custos calculados de instalação variam de US\$ 254 ha⁻¹ a US\$ 452 ha⁻¹. Estudos realizados por Kanwar et al. (1983) para o Estado de Iowa encontraram uma variabilidade de custo de implantação de drenos fechados entre US\$ 970 ha⁻¹ a US\$ 2.046 ha⁻¹.

Para projetos implantados no Brasil, Costa (1994) realizou estudos de variabilidade de custo de implantação de projetos de drenagem subterrânea com espaçamentos variando entre 10 e 30 metros, encontrando resultados de US\$ 5.672,91 e US\$ 1.895,24, respectivamente.

3.5.1. Indicadores econômicos

Sousa Neto (2012) destaca alguns indicadores que são utilizados para a análise de viabilidade de um projeto de drenagem que devem ser estimados para a totalidade dos fluxos de custos e de benefícios avaliados, sendo eles:

Valor Presente Líquido (VPL): o projeto será rentável se seu VPL (descontado à taxa estabelecida pré-determinada) for maior que zero, ou seja, no caso de os recursos obtidos do projeto superarem

os recursos utilizados. No caso de vários projetos excludentes para alcançar o mesmo resultado, a escolha correta deve levar em consideração o projeto que tiver maior VPL.

Relação Benefício/Custo (RBC): no caso de RBC igual a 1, isso significa $VPL=0$, ou seja, o valor presente dos fluxos de benefícios e custos, descontados à mesma taxa considerada são iguais. Para RBC maior que 1, isso indica que os benefícios do projeto superam os custos de implantação. E por fim, para projetos com RBS inferiores a 1, os benefícios do projeto são inferiores aos custos.

Taxa Interna de Retorno (TIR): a TIR deve ser levada em consideração na escolha do projeto a ser executado e deve-se aceitar aqueles projetos cuja TIR seja maior que a taxa mínima exigida.

O valor presente líquido (VPL) de um projeto de drenagem varia de acordo com o tipo de solo, estado de drenagem da área antes do projeto, profundidade de drenagem e grau de intensidade exigida pelo projeto (espessura de drenos), tipo de cultura a ser implantada na área, clima da região, dentro outros fatores. Dessa forma, é esperado que no cálculo do valor presente do projeto encontra-se valores positivos, uma vez que valores de VPL negativos implicam em perdas ao longo do tempo. Em caso de VPL negativo, isso significa que os custos foram maiores que os benefícios no momento em que ambos foram atualizados (KANWAR et al., 1983).

O VPL de um investimento depende de alguns fatores e pode ser calculado por meio da fórmula a seguir (SMEDEMA E RYCROFT, 1983).

$$VPL = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{Ri - Ci}{(1 + r)^i} - CI \quad (3)$$

Em que:

VPL – Valor presente líquido, R\$ ha⁻¹;

Ri – Receita anual, R\$ ha⁻¹;

Ci – Custo anual de manutenção do projeto de drenagem, R\$ ha⁻¹;

CI – Custo de implantação do projeto de drenagem, R\$ ha⁻¹;

n – Vida útil econômica do projeto, anos;

r – Taxa de juros anual, decimal.

Para projetos realizados nos Estados Unidos no Estado de Iowa, Smedema e Rycroft (1983) encontraram VPL entre US\$ -170 ha⁻¹ e US\$ 4.602 ha⁻¹. Dessa forma, é evidente que o retorno estimado pela cultura implementada é fator significativa para a tomada de decisão da implementação do sistema de drenagem. Além disso, é importante avaliar a região e os impactos

de drenagem para verificar a viabilidade do investimento do projeto. Caso contrário, em alguns casos, os benefícios oriundos do projeto podem ser menores que os custos de implantação.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Modelo SISDRENA

Segundo Miranda (1997), o SISDRENA é 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, fluxo ascendente do LF para a zona radicular, evapotranspiração, drenagem e “seepage” vertical (Figura 1).

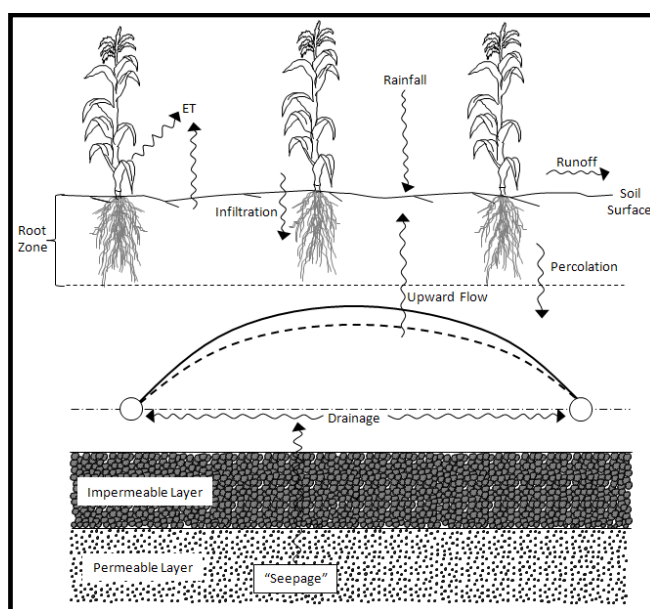


Figura 1. Esquema dos principais componentes de fluxo considerados pelo modelo SISDRENA (Miranda, 1997).

Miranda (1997) destaca que os dados de entrada necessários para a simulação do modelo 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 (dado 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;
- Umidade volumétrica do solo no dia inicial, adimensional.

O autor do modelo, Miranda (1997), destaca que como dados de saída, o modelo SISDRENA gera os seguintes parâmetros:

- Fração de precipitação diária que escoar sobre o solo, mm dia⁻¹;
- Fração da precipitação diária que infiltra no solo, mm dia⁻¹;
- Altura diária do lençol freático, m;
- Lâmina escoada através dos drenos subterrâneos, mm dia⁻¹;
- Armazenamento diário de água na zona radicular, mm;
- Evapotranspiração real diária, mm dia⁻¹;
- Parâmetros que avaliam o desempenho do sistema de drenagem;
- Espaçamento entre drenos mais econômico.

De acordo com Miranda (1997), o processamento do SISDRENA pode ser resumido em 10 etapas, sendo elas:

1. Cálculo da lâmina escoada superficialmente e da infiltrada. Nessa etapa inicial, o modelo separa o volume de água proveniente da precipitação que atinge o solo na lâmina infiltrada daquela que escoar superficialmente. A lâmina que escoar superficialmente é estimada pela modificação do método do Número da Curva (SCS, 1972), enquanto a lâmina infiltrada no solo é a diferença entre a lâmina total e a lâmina escoada superficialmente;

(4)

$$E = \frac{(ppt - 0,2S)^2}{ppt + 0,8S}$$

Em que:

E – Escoamento superficial, mm;

ppt – Precipitação total, mm;

S – Retenção potencial, mm.

2. Em seguida, o modelo SISDRENA estima o fluxo de água máximo ascendente da zona saturada para a zona radicular por meio da equação de Darcy, utilizando o modelo de van Genuchten (1980) para representar o local dos pontos da curva de retenção da água no solo;

$$v = -K(\psi) \left(\frac{D\psi}{dz} \right) + K(\psi) \quad (5)$$

Em que:

v – Fluxo ascendente de água no solo, cm h^{-1} ;

$K(\psi)$ – Condutividade hidráulica do meio não saturado, cm h^{-1} ;

Ψ – Potencial matricial, cm de coluna de água;

z – Coordenada vertical, positiva para baixo, cm.

Para obter a função $\theta(\Psi)$ para o solo de interesse, o modelo de van Genuchten (1980) é utilizado. Os pontos da curva de retenção de água são calculados pela equação a seguir.

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / (1 + (\beta * \psi)^{\eta m}) \quad (6)$$

Em que:

$\Theta(\psi)$ – Umidade volumétrica, em equilíbrio com o potencial matricial ψ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

Θ_s – Umidade volumétrica, do solo saturado, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

Θ_r – Umidade volumétrica residual, do solo saturado, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

m, η – Parâmetros de regressão da equação, adimensional;

β – Índice com dimensão igual ao inverso da tensão, cm^{-1} ;

ψ – Potencial matricial, cm.

3. Balanço hídrico na zona radicular. Nessa etapa, o modelo estima a proporção da evapotranspiração potencial que é proveniente do lençol freático e a proveniente da zona radicular da cultura;
4. O modelo estima a posição do lençol freático. Nessa etapa, o SISDRENA realiza o balanço hídrico diário na zona radicular e obtém a umidade do solo, a evapotranspiração real e corrige automaticamente a parte da precipitação que atinge o lençol freático;
5. Em seguida, o SISDRENA realiza a correção da posição do lençol freático e do armazenamento de água a partir do cálculo da posição do lençol freático, em dias consecutivos, utilizando a fórmula de De Zeeuw e Hellinga;

$$h = h(i - 1) \exp\left(-\frac{1}{J}\right) + \left(\frac{rec}{0,8}\right) * \frac{J \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{J}\right)\right)}{\mu} \quad (7)$$

Em que:

h – Altura do lençol freático calculada diariamente, m;

h_{i-1} – Altura do lençol freático do dia anterior, m;

rec – Recarga efetiva do lençol freático, $m\ dia^{-1}$.

6. O modelo então corrige a posição do lençol freático em função da evapotranspiração proveniente do lençol freático;
7. Realiza o cálculo da vazão que escoar para os drenos subterrâneos;

$$q_0 = \frac{8Ko \left(deq + \left(\frac{h}{2} \right) \right)}{L^2} * h \quad (8)$$

Em que:

q_0 – Vazão diária, $m\ dia^{-1}$.

8. Determina os parâmetros de desempenho do sistema de drenagem para o espaçamento e para o ano determinados;
9. O modelo replica as etapas de 1 a 8 para toda a série histórica de anos, espaçamentos e profundidades de drenos;
10. Finalmente, o SISDRENA realiza a análise econômica e determina o espaçamento entre drenos e a profundidade de drenos mais viável economicamente.

Como dados de entrada do modelo, alguns parâmetros de entrada foram considerados para a simulação de flutuação do lençol freático. Dentre eles:

- Profundidade da camada de impedimento foi considerada a 4 metros, ou seja, a camada rochosa de impedimento físico.
- Foi desconsiderado o “seepage” vertical ascendente diário.
- O espaçamento entre drenos foi uma das variáveis em estudo, sendo realizado simulações variando de 10 em 10 metros desde 10 metros de espaçamento entre drenos até 100 metros.
- Profundidade de drenos foi também uma das variáveis em estudo. Foi realizado simulações considerando profundidade de drenos de 0,9 metros, 1,1 metros e 1,3 metros.
- Raio efetivo dos drenos foi considerada de 50 mm ou 0,05 metros.
- Data de plantio da cultura do milho foi considerada sendo 1º de outubro e a data de colheita sendo 28 de janeiro do ano seguinte, ou seja, foi considerado um cultivar de milho com ciclo de 120 dias para a região de Piracicaba, SP.

- Umidade volumétrica do solo no dia inicial foi considerado igual a capacidade de campo.

4.2. Curva de retenção de água

Para a utilização do modelo SISDRENA, foram utilizados três tipos de solos diferentes, dentre eles um de textura de característica mais “arenosa”, um com textura “argilosa” e um de textura “média”. Os solos escolhidos vieram de valores tabelados pelo modelo de Schaap (2002), em que constam parâmetros de 12 solos americanos classificados pelo USDA. Portanto, embora a simulação utilizando o SISDRENA tenha sido para a região de Piracicaba – SP, os parâmetros de solo utilizados foram para solos americanos, uma vez que os parâmetros para a obtenção das curvas de retenção de água no solo para solos brasileiros ainda não são disponibilizados.

Schaap (2002), criou o modelo Rosetta V1.2, que estima propriedades hidráulicas para solos insaturados de acordo com a textura do solo e a densidade aparente. O modelo criado foi baseado em dados tabelados, com classes de parâmetros hidráulicos para 12 diferentes classes texturais de solos USDA. Dessa forma, o modelo Rosetta pode ser usado para estimar as seguintes propriedades:

- Parâmetros de retenção de água de acordo com van Genuchten (1980);
- Condutividade hidráulica saturada;
- Parâmetros de condutividade hidráulica insaturada de acordo com van Genuchten (1980) e Mualem (1976).

O modelo Rosetta é então capaz de prever a curva de retenção de água de acordo com van Genuchten (1980) e parâmetros de condutividade hidráulica insaturada, além de estimar a condutividade hidráulica saturada, K_s . Os parâmetros calculados por Schaap (2002) foram disponibilizados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Parâmetros de condutividade hidráulica para classes de solos USDA de acordo com o modelo Rosetta.

Texture Class	N	-- θ_r --		-- θ_s --		-- $\log(\alpha)$ --		-- $\log(n)$ --		-- K_s --		-- K_o --		-- L --	
		cm^3/cm^3		cm^3/cm^3		$\log_{10}(1/\text{cm})$		\log_{10}		$\log(\text{cm}/\text{day})$		$\log(\text{cm}/\text{day})$			
Clay	84	cm^3/cm^3	(0.107)	0.459	(0.079)	-1.825	(0.68)	0.098	(0.07)	1.169	(0.92)	0.472	(0.26)	-1.561	(1.39)
C loam	140	0.079	(0.076)	0.442	(0.079)	-1.801	(0.69)	0.151	(0.12)	0.913	(1.09)	0.699	(0.23)	-0.763	(0.90)
Loam	242	0.061	(0.073)	0.399	(0.098)	-1.954	(0.73)	0.168	(0.13)	1.081	(0.92)	0.568	(0.21)	-0.371	(0.84)
L Sand	201	0.049	(0.042)	0.390	(0.070)	-1.459	(0.47)	0.242	(0.16)	2.022	(0.64)	1.386	(0.24)	-0.874	(0.59)
Sand	308	0.053	(0.029)	0.375	(0.055)	-1.453	(0.25)	0.502	(0.18)	2.808	(0.59)	1.389	(0.24)	-0.930	(0.49)
S Clay	11	0.117	(0.114)	0.385	(0.046)	-1.476	(0.57)	0.082	(0.06)	1.055	(0.89)	0.637	(0.34)	-3.665	(1.80)
S C L	87	0.063	(0.078)	0.384	(0.061)	-1.676	(0.71)	0.124	(0.12)	1.120	(0.85)	0.841	(0.24)	-1.280	(0.99)
S loam	476	0.039	(0.054)	0.387	(0.085)	-1.574	(0.56)	0.161	(0.11)	1.583	(0.66)	1.190	(0.21)	-0.861	(0.73)
Silt	6	0.050	(0.041)	0.489	(0.078)	-2.182	(0.30)	0.225	(0.13)	1.641	(0.27)	0.524	(0.32)	0.624	(1.57)
Si Clay	28	0.111	(0.119)	0.481	(0.080)	-1.790	(0.64)	0.121	(0.10)	0.983	(0.57)	0.501	(0.27)	-1.287	(1.23)
Si C L	172	0.090	(0.082)	0.482	(0.086)	-2.076	(0.59)	0.182	(0.13)	1.046	(0.76)	0.349	(0.26)	-0.156	(1.23)
Si Loam	330	0.065	(0.073)	0.439	(0.093)	-2.296	(0.57)	0.221	(0.14)	1.261	(0.74)	0.243	(0.26)	0.365	(1.42)

Para a realização das simulações, foram utilizados três dos doze solos classificados no modelo Rosetta, com texturas diferentes e parâmetros da curva de retenção (Tabela 2). Dos solos que constam na Tabela 1, os que foram utilizados na presente pesquisa para a simulação da posição do lençol freático pelo modelo SISDRENA foram o Clay (Solo 1), S C L (solo 2) e o Si. Loam (Solo 3).

Tabela 2. Relação dos parâmetros de entrada no modelo de van Genuchten (1980) dos três tipos de solos utilizados na simulação.

Solos	Classe	n	m	α	Θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	K_s (m dia^{-1})
Solo 1	Clay	1,2531	0,2020	0,0149	0,098	0,148
Solo 2	S C L	1,3304	0,2484	0,0210	0,063	0,132
Solo 3	Si. Loam	1,6634	0,3988	0,0050	0,065	0,182

A partir dos dados obtidos pelo modelo Rosetta (Tabela 1), foi possível estruturar a curva do fluxo de água no solo para os diferentes solos analisados no presente trabalho. Para a escolha dos três solos em questão a partir dos 12 disponíveis no modelo Rosetta, um dos principais critérios foi quanto à curva do fluxo de água no solo para cada um deles. Dessa forma, pode-se observar na Figura 2 abaixo, o comportamento do fluxo da água para cada um dos solos escolhidos.

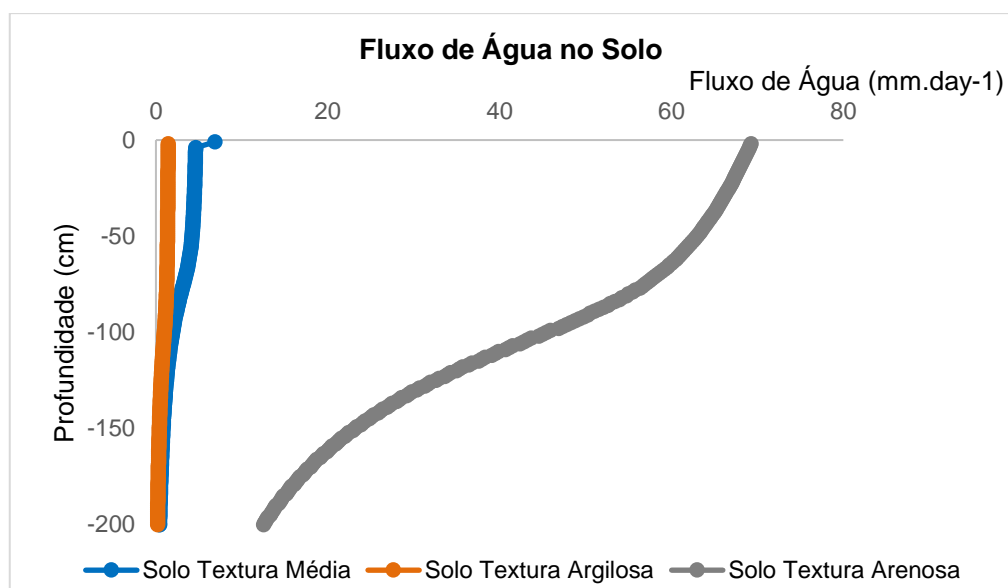


Figura 2. Fluxo de água no solo em mm dia^{-1} para os solos de textura “argilosa”, “média” e “arenosa”, variando do nível 0 do solo até a profundidade de 200 centímetros.

Para a realização das simulações, considerou-se no modelo que nem toda a precipitação foi infiltrada no terreno, ou seja, a parcela da chuva que não foi possível de ser infiltrada graças a velocidade de infiltração de cada tipo de solo sofreu escoamento superficial. De acordo com Miranda (1997), os valores do parâmetro do Número da Curva (CN) obtidos para os três tipos de solos para o modelo SISDRENA, foram de 64 para o solo de “textura arenosa”, 85 para o de “textura média” e 90 para o de “textura argilosa”.

4.3. Dados climáticos

Dentre os parâmetros de entrada do modelo SISDRENA, estão os dados meteorológicos. Os dados utilizados no presente trabalho foram para o município de Piracicaba – SP e foram obtidos a partir da base de dados meteorológica aberta disponibilizada pelo Departamento de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP).

Os dados utilizados foram os coletados a partir da estação meteorológica convencional e que tem disponibilidade de dados climáticos diários de 1917 a 2017. Dessa forma, foram utilizados 100 anos completos de base de dados para a simulação, sendo tomados os anos de 1917 a 2016.

As informações meteorológicas utilizadas foram precipitação diária e evapotranspiração potencial, que segundo Penman (1996), é o total de água perdido para a atmosfera para uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e sem déficit hídrico. A evapotranspiração potencial foi calculada a partir da equação de Thornthwaite representada a seguir.

$$ETP = f \cdot 1,6 \left(10 \cdot \frac{t}{I} \right)^a \quad (9)$$

Em que:

ETP – Evapotranspiração potencial;

f – Fator de ajuste em função da latitude e mês do ano;

t – Temperatura média mensal, em °C;

I – Índice de calor anual.

O índice de calor anual é calculado a partir da equação a seguir.

$$I = \sum_1^{12} \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514} \quad (10)$$

O valor a é dado pela função cúbica do índice anual a seguir.

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,7292 * 10^{-2} * I + 0,49239 \quad (11)$$

Para a realização das simulações, foi tomado o resultado produtivo para as condições médias de precipitação (1.271,23 mm), foi considerado também o ano com precipitação máxima da série histórica (1983 com 2.017,7 mm de precipitação), o ano com precipitação mínima (1921 com 821 mm de precipitação) e o ano considerado como representativo da média da série histórica (1973 com 1.278,6 mm de precipitação).

4.4. Viabilidade econômica

Para realizar a análise de viabilidade econômica dos projetos de drenagem, foram considerados os valores a seguir com relação a custos e benefícios da drenagem e da cultura considerada, que no presente estudo foi utilizado a cultura do milho (Duarte, 1997).

- Produção potencial máxima da cultura do milho de 233 sacos ha⁻¹ (14.000 kg ha⁻¹);
- Preço de venda do saco de milho (60 kg saco⁻¹) de acordo com a cotação ESALQ/BM&FBOVESPA para o dia 03/11/2017 de R\$ 32,87;
- O custo de produção da cultura foi estimado em R\$ 2.800,00 ha⁻¹;
- Os custos de saneamento e abertura dos coletores foram considerados de R\$ 500,00 ha⁻¹;
- O custo do metro do dreno subterrâneo instalado foi de R\$ 6,00 m⁻¹;
- Vida útil do projeto foi estimada em 25 anos;

- Taxa de juros anual adotada foi considerada igual a taxa SELIC atual, de 7,5% a.a.
- Foi considerado custo de implantação do projeto de drenagem igual para as diferentes profundidades de dreno (0,9, 1,1 e 1,3 metros).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Simulações da produtividade relativa do milho (espaçamento entre drenos, profundidade do dreno e diferentes tipos de solo)

A partir das simulações realizadas utilizando o modelo SISDRENA, foi possível obter resultados comparativos em relação às três variáveis em avaliação: espaçamento entre drenos, textura de solo e profundidade de drenos. Dessa forma, os gráficos apresentados a seguir destacam as diferenças encontradas quanto a produtividade relativa da cultura de milho para cada situação proposta.

Avaliando os resultados obtidos pela simulação utilizando o modelo SISDRENA para o solo 1 de “textura média” e profundidade de dreno em 0,9 metros, pode-se observar que para o volume de chuva de Piracicaba, SP, o ano que apresentou melhores produtividades relativas foi o ano mais seco, com precipitação de 821 mm. Para o ano mais chuvoso e para o ano intermediário, que tem maior representatividade da média de precipitação dentre os anos, pode-se observar uma queda da produtividade com o aumento do espaçamento entre drenos. A razão pela qual a produtividade cai conforme aumenta o espaçamento é consequência da baixa velocidade de infiltração, o que encarreta em lâmina de água em excesso e escoamento superficial. Dessa forma, pode-se observar que as condições climáticas médias apresentam redução gradual de produtividade com o aumento de espaçamento entre drenos, o que comprova a razão pela queda de produção ser pelo lençol freático em alto nível e consequente excesso hídrico na zona radicular (Figura 3).

Observando os resultados obtidos para profundidade de dreno de 1,1 metros para a mesma classe textural de solo, as respostas obtidas a partir das simulações foram semelhantes às realizadas para a profundidade de 0,9 metros. Entretanto, por razão das perdas de produtividade relativa de milho serem por conta do excesso hídrico, as respostas foram ligeiramente melhores para a profundidade de dreno de 1,1 metros quando comparado com a profundidade de 0,9 metros, como esperado. Essa melhoria relativa de produtividade pode ser explicada pelo fato de quanto mais profundo for colocado os drenos, maior o poder de retirada de água pelo projeto de drenagem e consequentemente mais profundo fica o lençol freático. Os ganhos de produtividade para essa situação podem ser observados para o ano mais chuvoso, que apresentou produtividade relativa de milho de cerca de 92% para espaçamento de 30 metros entre drenos. Para as mesmas condições, modificando apenas a profundidade de drenos, a produtividade relativa obtida foi de cerca de 26% para a profundidade de drenos de 0,9 metros. Esse ganho de produtividade relativa justifica o

projeto de drenagem para espaçamentos maiores utilizando profundidade de dreno maior, o que acarreta em menores custos de implantação do projeto e melhor viabilidade econômica.

Os resultados obtidos para profundidade de dreno igual a 1,3 metros confirmam o incremento de produtividade relativa com o aumento do potencial de drenagem do projeto. Pode-se observar para o ano mais chuvoso, que a produtividade relativa de milho para o espaçamento entre drenos de 40 metros foi de cerca de 73%, enquanto para as mesmas condições de textura e espaçamento, modificando apenas a profundidade de dreno para 1,1 metros, as respostas foram de 0%. Além disso, foi possível observar ligeiros incrementos de produtividade mesmo para as condições climáticas médias, sendo observado produtividades de 65,2% de produtividade relativa para a profundidade de drenos em 1,3 metros, enquanto para as profundidades de 1,1 e 0,9 metros foram observadas produtividades iguais a 57,6% e 51,5%, respectivamente (Figura 3).

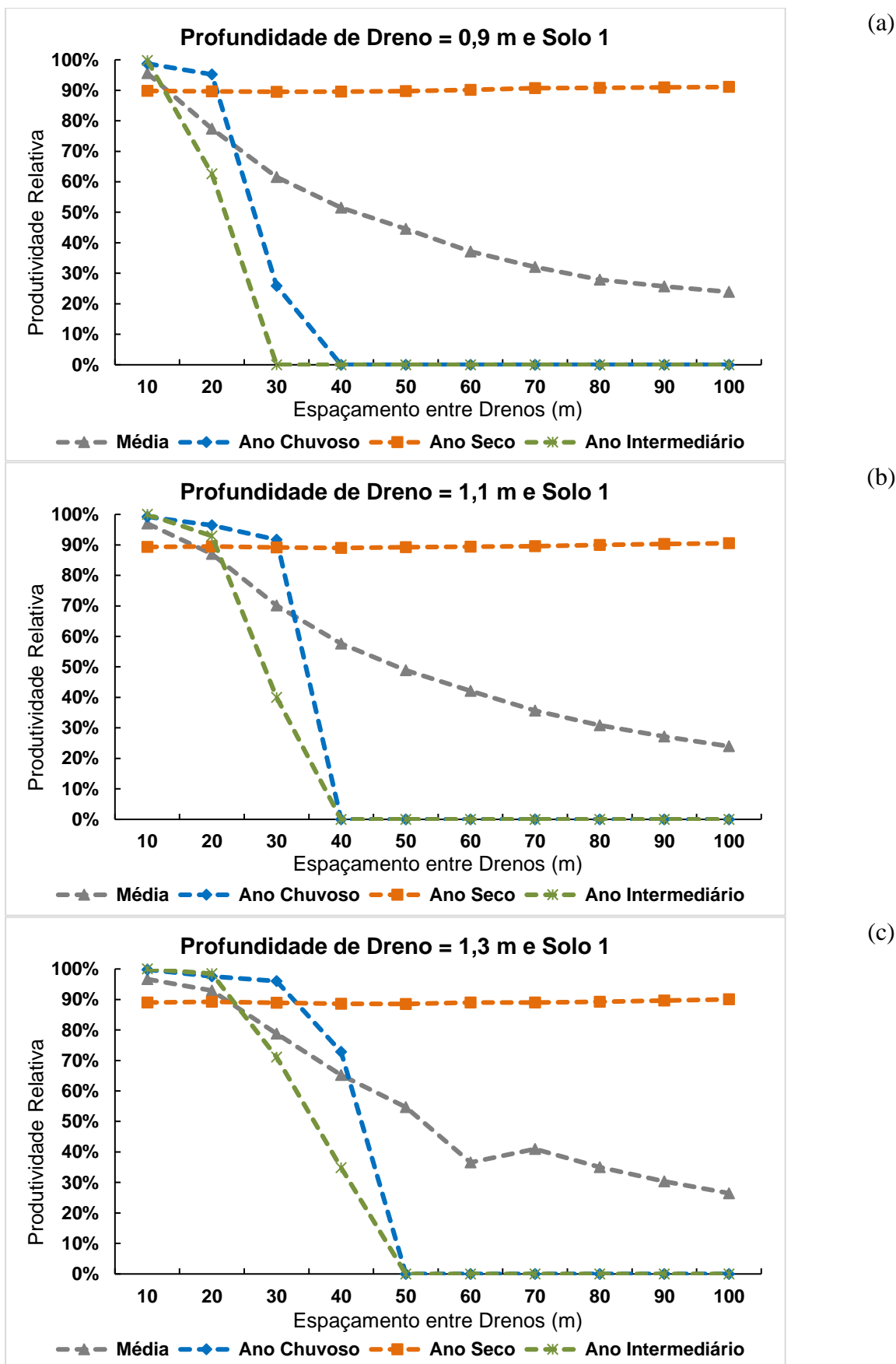


Figura 3. Variação da produtividade relativa da cultura do milho em relação ao espaçamento entre drenos variando de 10 a 100 metros para solo 1 de “textura média” e profundidade dos drenos igual a 0,9 metros (a), 1,1 metros (b) e 1,3 metros (c).

Com a observação de produtividades relativas menores para o solo de “textura média” na medida que se aumentou o espaçamento entre drenos, a expectativa foi de produtividades relativas inferiores para o solo 2 de “textura argilosa” pelo fato da menor velocidade de infiltração da água e consequente maior lâmina de escoamento superficial. Conforme expectativa, foi possível confirmar que para o ano mais chuvoso e para o ano intermediário, a produtividade relativa sofreu redução quando comparado com o solo de “textura intermediária”. Para o espaçamento de 20 metros, a produtividade relativa observada foi de 96,2%. Para as mesmas condições de espaçamento e profundidade de drenos para o solo de textura intermediária, foi observado produtividade relativa de 95,2%. Entretanto, embora a produtividade relativa tenha sido superior ao solo 2 de “textura argilosa” nessa condição, para o espaçamento entre drenos de 30 metros, foi observado 0% de produtividade relativa no solo 2 “argiloso”, enquanto o solo de “textura média” apresentou 25,9%.

Comparando os resultados obtidos para as diferentes profundidades e espaçamento de drenos, foi possível verificar a baixa efetividade do projeto de drenagem para os anos de baixa precipitação, uma vez que a produtividade relativa teve baixa influência pela profundidade de dreno ou a distância de um dreno ao outro. A baixa resposta do projeto pôde ser observada para todos os solos estudados.

Por outro lado, foi possível verificar a efetividade do projeto de drenagem para os anos de maior precipitação. Para o solo 2 de “textura argilosa”, verificou-se incremento de produtividade relativa para a cultura de milho tanto para a variação de profundidade quanto para variação de espaçamento entre drenos.

Para espaçamento de 20 metros entre drenos, a profundidade teve pouca influência na produtividade, sendo observado 96,2% de produtividade relativa para profundidade de drenos igual a 0,9 metros, 97,2% para 1,1 metros e 97% para 1,3 metros. Já para espaçamentos entre drenos de 30 e 40 metros, foi observado variações significativas de produtividade para diferentes profundidades de dreno. Para espaçamento de 30 metros, o modelo apresentou produtividade relativa igual a 0% para profundidade de dreno igual a 0,9 metros. Para as profundidades de 1,1 e 1,3 metros, o resultado observado foi de 93,2% e 96,3%, respectivamente. Por fim, para espaçamento entre drenos de 40 metros e profundidades de drenos igual a 0,9 metros e 1,1 metros, o SISDRENA apresentou resultados de produtividade relativa igual a 0%, enquanto para a profundidade de drenos igual a 1,3 metros, a produtividade relativa foi de cerca de 31%.

Por meio da análise dos dados, foi possível verificar a influência negativa do excesso hídrico para a cultura de milho e eventual déficit de oxigênio na zona radicular. Os resultados observados para o ano intermediário e para a média de precipitação da série histórica dos 100 anos avaliados foram semelhantes, porém em menor intensidade, aos resultados observados para o ano de maior precipitação. Foi possível observar queda da produtividade relativa para as condições de menor profundidade e maior espaçamento de drenos (Figura 4).

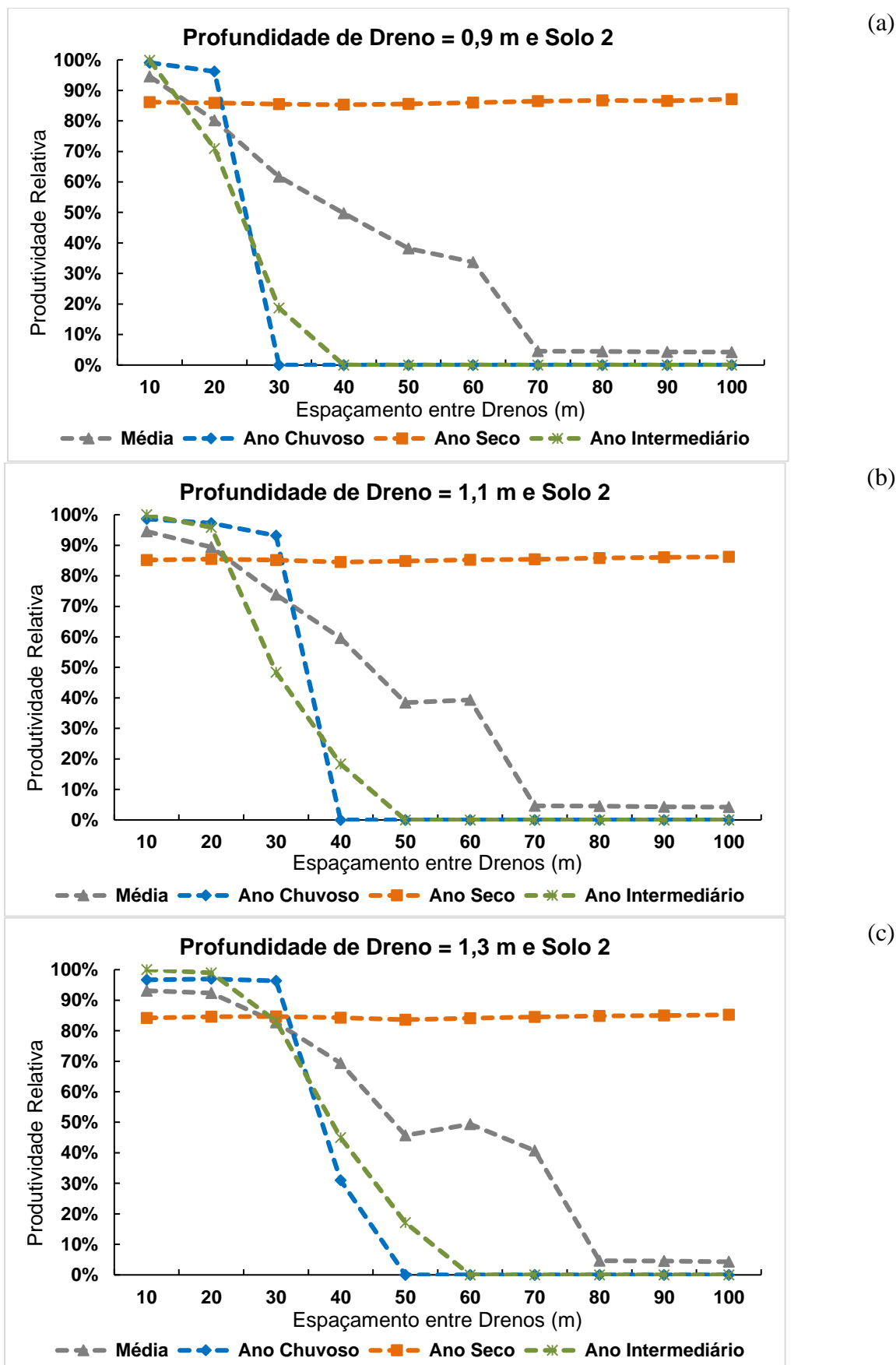


Figura 4. Variação da produtividade relativa da cultura do milho em relação ao espaçamento entre drenos variando de 10 a 100 metros para solo 2 de “textura argilosa” e profundidade dos drenos igual a 0,9 metros (a), 1,1 metros (b) e 1,3 metros (c).

Os melhores resultados de produtividade relativa da cultura do milho para a região de Piracicaba, SP foram apresentados para o solo 3 de “textura arenosa”. Esse fato pode ser explicado pela velocidade de infiltração da água no solo para essa classe textural, o que diminui as perdas por excesso hídrico na zona radicular da cultura do milho.

Para o ano de menor precipitação da série histórica considerada, foi observado zero resposta do projeto de drenagem quanto a incrementos produtivos. Embora o mesmo pôde ser observado para os solos 1 de “textura média” e 2 de “textura argilosa”, para esses solos existiu uma pequena influência da profundidade e do espaçamento entre drenos na produtividade relativa da cultura. Entretanto, para o solo 3 de “textura arenosa”, o modelo simulou nenhuma efetividade do sistema de drenagem para as diferentes condições de profundidade e espaçamento entre drenos para o ano de menor precipitação, apresentando produtividade relativa igual a 100% para todos os cenários. Portanto, pode-se concluir que as condições climáticas e também as características texturais do solo foram propícias para a produção de milho nessa época do ano no município de Piracicaba, SP (Figura 5).

Por outro lado, para o ano de maior precipitação avaliado, foi possível observar a influência da profundidade dos drenos e também do espaçamento entre um dreno e outro. O espaçamento entre drenos que foi possível observar a maior sensibilidade foi a de 40 metros. Para esse espaçamento e profundidade de dreno igual a 0,9 metros, a produtividade relativa de milho foi simulada sendo 10,2%, enquanto para a profundidade de 1,1 metros esse valor foi de 76,3% e para a profundidade de 1,3 metros foi 96,1%. Portanto, foi possível observar a efetividade do sistema de drenagem para os anos de maior precipitação mesmo para o solo arenosa, que é o solo com maior capacidade de drenagem dentre os solos avaliados, como pode ser observado pela curva do fluxo de água no solo.

Avaliando as curvas de produtividade relativa para as condições médias climatológicas, foi observado baixa correlação de influência da variável profundidade para incrementos produtivos. Por outro lado, para a variação do espaçamento entre drenos foi observado um decréscimo do potencial produtivo conforme aumentou o espaçamento. Dessa forma, foi possível observar a influência do excesso hídrico na redução do potencial produtivo do milho para as condições de maior espaçamento mesmo para o solo 3 de “textura arenosa” (Figura 5).

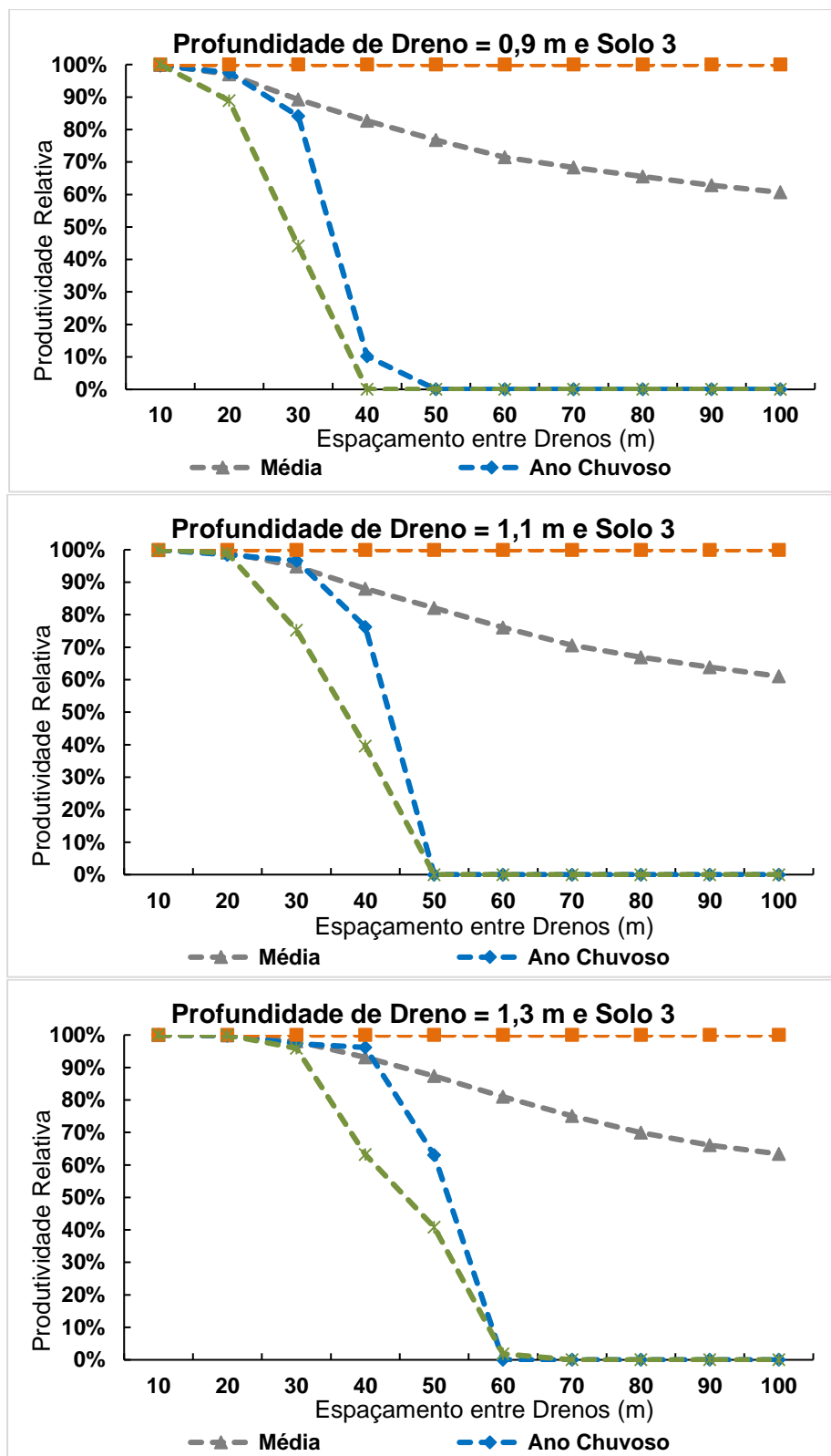


Figura 5. Variação da produtividade relativa da cultura do milho em relação ao espaçamento entre drenos variando de 10 a 100 metros para solo 3 de “textura arenosa” e profundidade dos drenos igual a 0,9 metros (a), 1,1 metros (b) e 1,3 metros (c).

De maneira geral, os resultados obtidos pelo modelo SISDRENA para as condições climáticas médias de Piracicaba, SP destacam maior efetividade do sistema de drenagem para solos de textura mais argilosa. Além disso, é possível destacar a influência da profundidade e do espaçamento entre drenos para a maior ou menor efetividade do projeto.

Para o solo 2 de “textura argilosa”, é possível observar maior necessidade de sistema de drenagem. As melhores respostas apresentadas são para o menor espaçamento e maior profundidade de dreno, situação que proporciona maior capacidade de drenagem do ambiente produtivo, porém com maior custo de implantação do projeto.

Por outro lado, embora o solo 3 de “textura arenosa” tenha obtido melhor produtividade relativa para a situação de maior profundidade e menor espaçamento entre drenos, foi possível observar menor efetividade do sistema de drenagem pelo fato de a produtividade relativa ter sido de 60,6% para as piores condições de drenagem, que é menor profundidade e maior espaçamento entre drenos. O solo 2 de “textura argilosa” apresentou produtividade relativa igual a 4,25% e o solo de textura média 23,9%, para a mesma profundidade e espaçamento entre drenos. Portanto, o projeto de drenagem tem maior impacto em produtividade relativa para o solo 2 “argiloso”, embora as melhores produtividades relativas tenham sido observadas para o solo 3 “arenoso”, que apresentou os menores ganhos marginais em produtividade relativa dentre os solos avaliados para o aumento do potencial de drenagem do projeto (Figura 6) (Tabela 3).

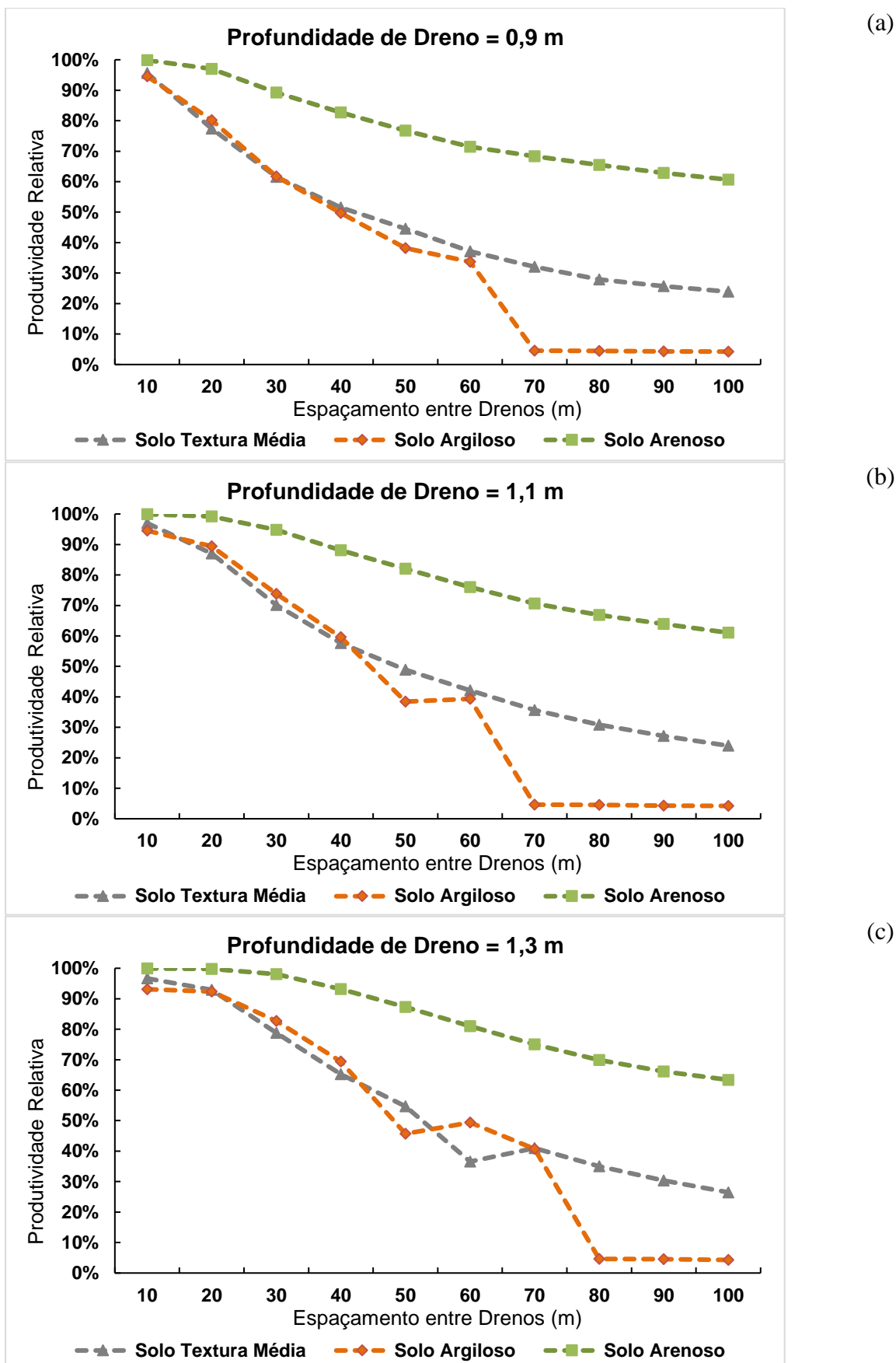


Figura 6. Variação da produtividade relativa da cultura do milho em relação ao espaçamento entre drenos variando de 10 a 100 metros para os diferentes tipos de solo e profundidade dos drenos igual a 0,9 metros (a), 1,1 metros (b) e 1,3 metros (c).

Tabela 3. Condições de máxima produtividade relativa (YR) para os três tipos de solo.

Tipo de Solo	Profundidade dos Drenos (m)	Espaçamento entre Drenos (m)	YR (%)
Solo 1	0,9	10	94,55
“Intermediário”	1,1	10	94,55
	1,3	10	93,11
	<hr/>		
Solo 2	0,9	10	95,58
“Argiloso”	1,1	10	97,02
	1,3	10	96,67
	<hr/>		
Solo 3	0,9	10	99,87
“Arenoso”	1,1	10	99,93
	1,3	10	99,93

5.2. Análise econômica

A análise de viabilidade econômica dos projetos foi realizada considerando dados atuais de custo de produção de milho e de implantação do projeto, além de dados atualizados de preço de venda do saco de milho de acordo com a BM&F. Os resultados de valor presente obtidos superaram os valores obtidos na última atualização do modelo em 1997, circunstância em o custo de produção de milho e de implantação do projeto de drenagem eram bem inferiores aos atuais. Entretanto, o preço de venda teve alta considerável no período e o potencial produtivo da cultura teve incremento graças aos avanços em tecnologia.

As curvas de valor presente, tendo como variáveis a profundidade e o espaçamento entre drenos, foram muito similares para todos os solos estudados. A condição climática simulada para viabilidade econômica foi considerada a média da série histórica de 100 anos para o município de Piracicaba, SP. Para todos os solos avaliados, o maior valor presente líquido do investimento foi de 20 metros de espaçamento entre drenos e 1,3 metros de profundidade de dreno.

Para o solo 1 de “textura média”, o valor presente líquido do investimento foi o mais baixo comparado com os outros solos, sendo de R\$ 52.335,27. Os valores obtidos pelo solo 2 de “textura argilosa” e 3 “arenosa” foram R\$ 54.400,54 e R\$ 54.896,63, respectivamente. Portanto, o solo 3 de “textura arenosa” obteve a melhor viabilidade econômica para essas as circunstâncias de espaçamento e profundidade de drenos.

Embora tenha sido observado ineficiência do sistema de drenagem para o solo 3 de “textura arenosa” nas condições climáticas de menor precipitação, o projeto teve maior viabilidade econômica para esse solo nas condições climáticas médias pelo fato da alta capacidade produtiva desse solo mesmo sem drenagem, ou seja, o ganho marginal de produtividade relativa com a adição

da drenagem foi menor para essa classe textural. Por outro lado, embora o ganho marginal tenha sido menor comparado com os solos 1 de “textura média” e 2 “argilosa”, a produtividade relativa desse solo foi muito superior aos demais, o que garantiu maior retorno econômico.

A produtividade relativa observada para o solo 3 “arenoso” para as condições de maior viabilidade econômica foi igual a 99,8%, enquanto para o solo 2 “argiloso” e 1 “textura média” foi de 92,3% e 92,9%, respectivamente. Em termos absolutos de produtividade, o solo 3 “arenoso” produz 232,53 sc ha⁻¹ (13.952 kg ha⁻¹), já o solo 2 “argiloso” e o 1 de “textura média” produzem 215 sc ha⁻¹ (12.903 kg ha⁻¹) e 216,46 sc ha⁻¹ (12.987,4 kg ha⁻¹), respectivamente. Portanto, o faturamento para o solo 3 “arenoso” é de R\$576,21 superior ao do solo 2 “argiloso” e de R\$ 528,22 superior ao do solo 1 de “textura média” para cada uma das safras, considerando valor de venda do saco de milho igual a R\$ 32,87, obtido de cotação da BM&F (Tabela 4) (Figura 7).

Tabela 4. Condições de espaçamento entre drenos e profundidade do dreno de melhor viabilidade econômica medido em Valor Presente Líquido (VPL) para os três tipos de solos.

Tipo de Solo	Espaçamento entre Drenos	Profundidade do Dreno	VPL (R\$)
Solo 1 “Intermediário”	20	1,3	54.400,54
Solo 2 “Argiloso”	20	1,3	52.335,27
Solo 3 “Arenoso”	20	1,3	54.986,63

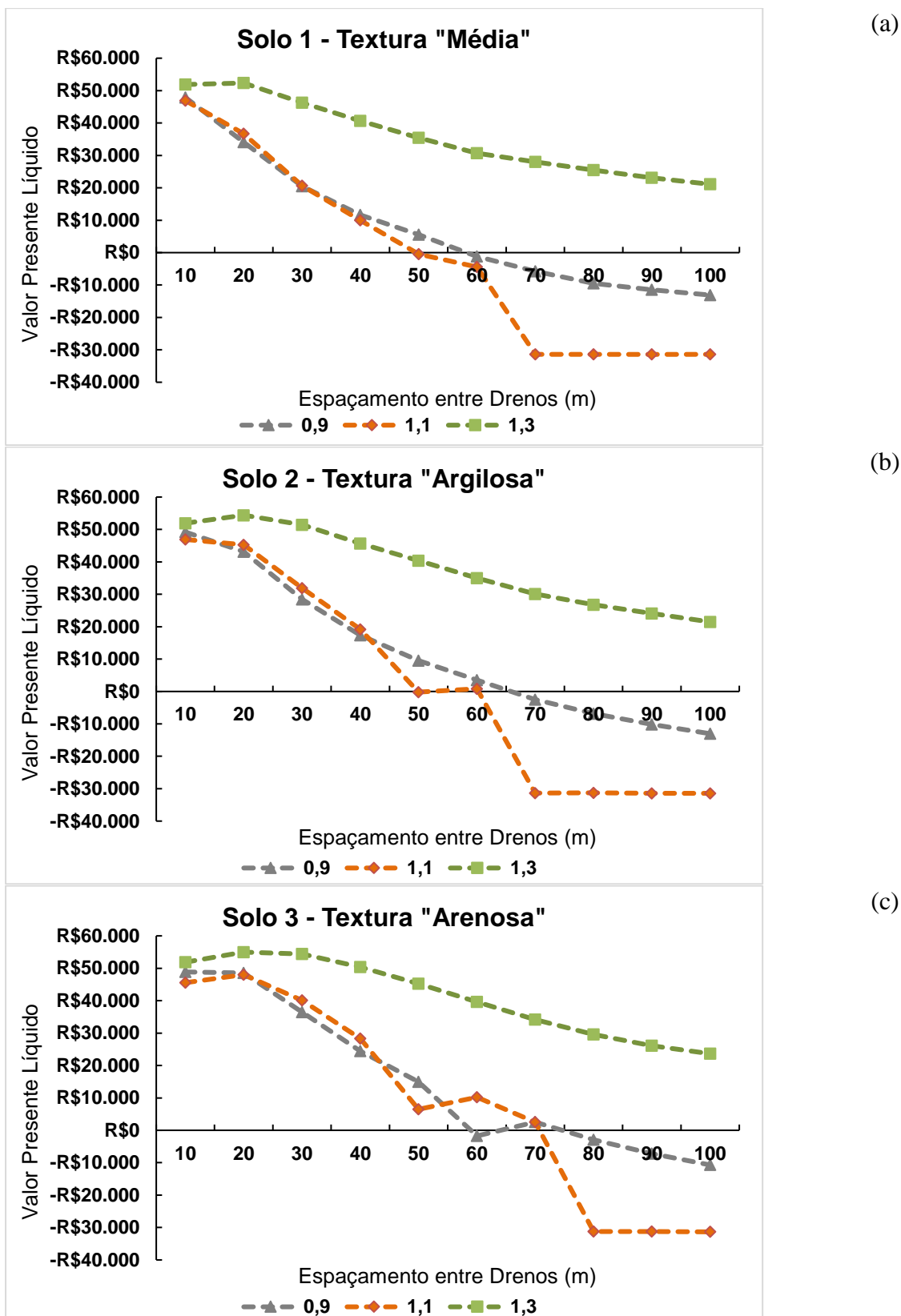


Figura 7. Análise de Valor Presente Líquido (VPL) para os solos de textura “média” (a), “argilosa” (b) e “arenosa” (c) para três profundidades de drenos, 0,9 metros, 1,1 metros e 1,3 metros para diferentes espaçamentos entre drenos de 10 a 100 metros.

6. DIFICULDADES SURGIDAS

Destaca-se a atualização do modelo SISDRENA para a linguagem computacional de VBA no Excel. Por razão da complexa linguagem computacional envolvida na atividade, essa etapa do projeto acabou sendo adiada. Entretanto, como substituição dessa atividade, foi proposto o estudo de viabilidade econômica para as diferentes condições de drenagens propostas para os três tipos de solos estudados.

No início do projeto, foi conduzido um estudo utilizando panela de sucção para obter a curva do fluxo de água em diferentes tipos de solo. A proposta é que esses resultados seriam utilizados no presente trabalho, porém não foi possível utilizá-los em função das informações terem sido inseridas em outro trabalho realizado paralelamente. Dessa forma, foram utilizados três diferentes tipos de solo a partir de valores tabelados do USDA, disponibilizada pelo modelo Rosetta. Poderia ter utilizado o mesmo valor do Número da Curva (CN) para um solo de textura argilosa, porém, foi decidido assumir as “diferentes” texturas e variar o valor do (CN).

7. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a) Diante das simulações realizadas pelo modelo SISDRENA, foi possível identificar a influência do espaçamento entre drenos e da profundidade que os drenos foram colocados impactando diretamente na produtividade relativa da cultura de milho para os solos 1 de textura “média”, 2 “argilosa” e 3 “arenosa”;
- b) foi observado que com exceção do solo “arenoso” para as condições climáticas de menor precipitação, a queda de produtividade relativa de milho foi causada pelo fato de excesso de água na zona radicular. O excesso de água foi provocado pela elevada posição do lençol freático que foi simulado pelo modelo para as diferentes condições em avaliação. Portanto, foi possível concluir que o aumento da produtividade relativa está correlacionado com o potencial de drenagem do projeto, ou seja, quanto menor o espaçamento entre drenos e maior a profundidade de drenos, maior a produtividade relativa;
- c) foi possível observar também maior eficiência do projeto de drenagem para o solo “argiloso” para as condições climáticas de maior precipitação. Isso pode ser explicado pelo fato desse solo apresentar a curva de fluxo de água com menores fluxos diários em função da baixa quantidade de macroporos que auxiliam na infiltração da água. Por outro lado, esse tipo de solo contém grande concentração de microporos, que auxiliam no fluxo

ascendente de água por capilaridade. Entretanto, mesmo para as condições climáticas de menor precipitação, não foram observadas perdas em produtividade relativa em função de déficit hídrico, que poderia ser suprido pelo fluxo ascendente de água para essa classe textural de solo;

- d) enquanto o solo de textura “argilosa” teve os maiores ganhos marginais em produtividade relativa ao aumentar o potencial de drenagem do projeto, foi possível concluir que a menor eficiência do projeto de drenagem ocorreu para o solo de textura “arenosa” para o ano de menor precipitação. Embora o solo de textura “arenosa” tenha tido os menores incrementos marginais de produtividade com o aumento de drenagem, essa classe textural apresentou a maior produtividade absoluta de milho, sendo, portanto, o tipo de solo mais adequado para a produção de milho para as condições climáticas de Piracicaba, SP; e
- e) para a avaliação de viabilidade econômica dos projetos, foi identificado que os três tipos de solo em estudo tiveram maior retorno do investimento para as condições de espaçamento entre drenos de 20 metros e profundidade em que os drenos estão inseridos de 1,3 metros. Além disso, os valores obtidos de VPL foram semelhantes para todos os solos avaliados, tendo uma variação menor que 5% entre os solos. Por fim, foi possível concluir que os três tipos de solo USDA utilizados no estudo, se expostos às condições climáticas de Piracicaba, SP, apresentam retorno econômico que justifica o investimento do projeto de drenagem da área.

8. REFERÊNCIAS

ABRAMILHO. **Associação Brasileira dos Produtores de Milho**. A dimensão do milho no mundo. 2010. Acessado em: 30/10/2017. Disponível em: <http://www.abramilho.org.br/noticias.php?cod=975>.

Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS). **Águas subterrâneas, o que são?** Disponível em: <http://www.abas.org/educacao.php>. Acesso em: 25/09/2017.

BENGSTON, R.L.; GARZON, R.S.; FOUSS, J.L. **A fluctuating watertable model for the management of a controlled-drainage/subirrigation system**. Transactions of the ASAE, v.36, n.2, p.437-443, 1993.

BOWER, H., JACKSON, R.D. **Determining soil properties**. In: SCHILFGAARDE, J. van. Drainage for agriculture. Madison: American Society of Agronomy, 1974. p.611-666.

BOWER, H., JACKSON, R.D. Determining soil properties. In: SCHILFGAARDE, J. van. **Drainage for agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1974. p.611-666.

BORGHETTI, N.; BORGHETTI, J. R.; ROSA, E.F.F. **Aquífero Guarani – A verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba, 2004.

CAIXETA-FILHO, J.V. **Pesquisa operacional: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais**. São Paulo: Atlas, 2001. 171p.

CARVALHO, G.L; **Eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras de 1990/1991 e 2005/2006**; Dissertação para o título de mestre em ciências; Apresentado na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CALCAGNO, A. **Identificação de áreas para execução de programas e ações piloto e definição de termos de referência**. Atividade 9 do projeto Aquífero Guarani. Brasil: Agência Nacional de Águas, 2001. Disponível em: http://www.ana.gov.br/guarani/gestao/gest_cbasico.htm. Acesso em: 25/09/2017.

CHILDS, E.C. **The use of soil moisture characteristics in soil studies**. Soil Science, Baltimore, v.50, p.239-252. 1940.

COOPER, M. **Granulometria e Textura do Solo**. Piracicaba, 2015. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/576877/mod_resource/content/1/Aula%201%20-%20Granulometria%20e%20Textura%20do%20Solo.pdf. Acessado em: 30/10/2017.

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

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

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Economia da produção.** 2012. Acessado em: 20/10/2017. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_8ed/economia.htm.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Mercado do Milho no Brasil.** 2012. Acessado em: 28/10/2017. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho/mercado.htm>.

ESALQ/BM&FBOVESPA. **Milho.** Indicador do Milho ESALQ/BM&FBOVESPA. CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Departamento de Economia, Administração e Sociologia. ESALQ – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. USP – Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/milho.aspx>. Acessado em: 06/11/2017.

ESTADOS UNIDOS. **National engineering handbook: IV.** Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Hydrology. s.1., Washington, 1972, 1 v.

FAO. **Drainage design factors;** 28 questions and answers. Rome, 1986. 52p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 38).

FEDDES, R.A. **Effects of drainage on crops and farm management.** Agricultural and Water Management, v.14, n.1, p.3-18, 1988.

FERREIRA, P.A. **Drenagem de terras agrícolas.** In: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior: ABEAS, Brasília, 2003. 210p.

FERREIRA, P.A. **Curso de engenharia de irrigação: XI. Drenagem.** Brasília: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior. 1987. 86p.

GENUCHTEN, M.T. van. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil.** Soil Science Society of America Journal. Am. J. 44:892-989. 1980.

GRIGOLON, G.B. **Curva de retenção de água no solo determinada a partir de um número mínimos de pares de umidade e tensão na câmara de Richards.** Piracicaba, SP, 2013. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

HILLEL, D. **Environmental soil physics.** 1. ed. New York, Academic Press, 770p. 1998.

HILLEL, D. **Soil and water: Physical principles and processes.** Londres: Academic Press, p. 29-77, 1971.

JURY, W.A.; GARDNER, W.R.; GARDNER, W.H. **Soil physics.** 5. ed. New York: John Wiley, 1991. 328 p.

KANWAR, R.S.; JOHNSON, H.P.; SCHULT, D. et al. **Economics of prairie wetland drainage.** Transactions of the ASAE. v.26, n.2, p.457-464, 1983.

- LEE, J. 2011. **Limits to continuity of unsaturated, compacted soils**. University of Colorado. 158p. Colorado, USA.
- LEITCH, J.A. **Economics of prairie wetland drainage**. Transactions of the ASAE. v.26, n.5, p.1465-1475, 1983.
- LEPSCH, I.F. **Formação e conservação dos solos**. Estrutura e Consistência. 2010. 218p.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: P.L. Libardi, 2000. 509p.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, Piracicaba, 1995. 497p.
- LIMA, L. A. **DRENAGEM DE TERRAS AGRICOLAS**. Efeitos do excesso de água sobre solo e plantas – Benefícios e Limitações da Drenagem. Disponível em: <http://www.lalima.com.br/lalima/arquivos/drenagem.pdf>. Acessado em: 25/05/2017. 20p. 2012.
- LIMA, V.C.; J.M.J.C. LIMA. **Fundamentos de Pedologia**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2000.
- LIMA, V.C.; LIMA, M.R.; MELO, V.F. **O solo no meio ambiente**. Abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio. Curitiba – PR, 2007. Universidade Federal do Paraná. Departamento de solos e engenharia agrícola.
- LUO, W., G.R. Sands, M. YOUSSEF, J.S. STROCK, I. SONG, and D. CANELON. 2010. **Modeling the impact of alternative drainage practices in the northern Corn-belt with DRAINMOD-N II**. Agric. Water Manage. 97:389-398. doi: 10.1016/j.agwat.2009.10.009.
- MIRANDA, J.H. **Modelo para simulação da dinâmica da água em sistemas de drenagem subterrânea e cálculo do espaçamento econômico entre drenos**. Piracicaba, 1997. Tese (Mestrado) – Universidade de São Paulo (ESALQ).
- MONCADA, M.P.H. 2008. **Avaliação de propriedades hidráulicas de solos tropicais não saturados**. Rio de Janeiro. 324p. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- MUALEM, Y. 1976. **General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal pore-size distribution**. Soil Sci. Soc. Am. J. 63:270-277.
- NETAFIM. **Milho**. 2013. Disponível em: <http://www.netafim.com.br/crop/corn>. Acessado em: 30/10/2017.
- PENMAN, H.L. Evaporation: na introductory survey. Netherlands. Journal of Agricultural Science, Cambridge, v.4, p.9-29, 1996.
- PEREIRA, E.M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 2004. 253p. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos**. Madrid: Agrícola Española, 1978. 521p.

REBOUÇAS, A.C. **Uso inteligente da Água**. São Paulo: Escrituras Editora, 2004.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188p.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manole, 2004. 478p.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. **Propriedades física do solo**. Santa Maria, 2006. Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências Rurais.

RICHARDS, L.A.; FIREMAN, M. **Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils**. Soil Science, New Brunswick, v.56, p.395-404. 1943.

RICHARDS, L.A. **Physical conditions of water in soil**. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGE, L.E. and CLARK, F.E. ed. *Methods of soil analysis – Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling*. Madison, ASA – SSSA, 1965. p. 128-152.

SABBAGH, G.J.; FOUSS, J.L.; BENGSTON, R.L. **Comparison of EPIC-WT and DRAINMOD simulated performance of land drainage systems**. Transactions of the ASAE, v.36, n.1, p.73-79, 1993.

SCHAAP, M.G. **Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions**. 2002. Department of Soil, Water and Environmental Science. The University of Arizona, Tucson.

SILVA, P.C.A. **RESERVA HÍDRICA: Aquífero Guarani e seu Uso Sustentável**. Brasília, 2011. Tese (Pós-Graduação) – Treinamento e Aperfeiçoamento da Câmara dos Deputados/Cefor.

SKAGGS, R.W. **DRAINMOD – Reference report: methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables**. Raleigh: USDA,SCS, 1981. 329 p.

SKAGGS, R.W. 1999. **Drainage simulation models**. In: R.W.. Skaggs and J. Van Schilfgaarde, editors, *Agricultural drainage*. Agron. Monogr. 38. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. p.469-500.

SMEDEMA, L.K.; RYCROFT, D.W. **Land drainage**. Ithaca: Cornell University Press, 1983. 377p.

SOUSA NETO, J.M.; MULATO, A.B. **Análise da viabilidade econômico-financeira do programa de drenagem urbana do município de Fortaleza**. Revista Científica da Faculdade Darcy Ribeiro, n.003. 2012. Disponível em: <file:///C:/Users/Consultor/Downloads/37-154-1-PB.pdf>. Acessado em: 28/10/2017.

TAVARES, MH.F.; FELICIANO, J.J.S. & VAZ, C.M.P. **Análise comparativa de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos**. Irriga, 13:517-524, 2008.

THORP, K.R., YOUSSEF, D.B., JAYNES, R.W. MALONE, and L.M.A. **DRAINMOD-N II: Evaluated for an agricultural system in Iowa and compared to RZWQM-DSSAT.** 2010. Trans. ASABE 52:1557-1573.

THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology: a quantitative approach to problems in plant and crop physiology.** London: Academic Press., 1976. 318p.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modelling – A mathematical approach to plant and crop physiology.** 1 ed. New Jersey: The Blackburn Press, 2000. 669 p.

TOVEY, R. **Alfafa growth as influenced by static and fluctuating water tables.** Transactions of the ASAE, v.7, n.3, p.310-312, 1964.

WALLACH, D.; GOFFINET, B.; BERGES, J.E.; DEBAEKE, P.; LEENHARDT, D.; AUBERTOT, J.N. **Parameter estimation for crop models: A new approach and application to a corn model.** Agronomy Journal, Madison, v.93, n. 4, p. 757-766, 2001.

WISER, E.H.; WARD, R.C.; LINK, D.A. **Optimized design of a subsurface drainage system.** Transactions of the ASAE, v.15, n.1, p.175-182, 1974.