**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Modelo computacional para o dimensionamento da subunidade em
irrigação localizada**

Christian José Mendoza Castiblanco

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba
2013

Christian José Mendoza Castiblanco
Engenheiro Agrícola

Modelo computacional para o dimensionamento da subunidade em irrigação localizada

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba
2013

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Mendoza Castiblanco, Christian José

Modelo computacional para o dimensionamento da subunidade em irrigação localizada / Christian José Mendoza Castiblanco. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
120 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Irrigação por gotejamento 2. Modelo computacional 3. Perda localizada de carga
4. Subunidade I. Título

CDD 631.7
M539m

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

*A minha querida esposa
Patrícia pela ajuda, carinho e
sobre todo paciência nesta
jornada e ao meu querido filho
Marco Alexandrino pelos
momentos que lhe faltei.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP e ao Departamento de Engenharia de Biossistemas, pela formação e amizade dos professores, funcionários e companheiros de estudo.

Ao professor orientador Dr. José Antônio Frizzzone, pela oportunidade, dedicação, orientação e esforço na realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Sérgio Nascimento Duarte, Dr. Rubens Duarte Coelho, Dr. Tarlei Arriel Botrel, Dr. Marcos Vinicius Folegatti pelas aulas ministradas que contribuíram na minha formação de pós-graduação.

Aos colegas de pós-graduação pela amizade, em especial aos colegas Lucas Vellame, Jorge Luis Copquer dos Santos Jr., Carlão e Alexsandro Almeida que me auxiliaram em todo o período do curso.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa concedida e viabilização do presente projeto.

Ao Instituto de Ciência e Tecnologia na Irrigação, INCT, pelo auxílio na realização deste projeto.

Aos meus queridos amigos, Julieth Parra, Manoel Divino Matta Jr e Denis Santiago da Costa, que fizeram me sentir sempre na minha casa.

Ao Emílio César Webá Filho pela valiosa colaboração na realização deste projeto e pela continua disposição.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho pudesse ser realizado, meu grande agradecimento.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Irrigação localizada	21
2.2 Disposição do sistema de irrigação localizada	22
2.3 Necessidades de Irrigação	23
2.3.1 Irrigação Real Necessária – IRN	24
2.3.2 Evapotranspiração.....	25
2.3.3 Coeficiente da cultura – K_C	27
2.3.4 Irrigação Total Necessária – ITN	28
2.4 Indicadores de Eficiência	29
2.4.1 Eficiência de Irrigação – EI	29
2.4.2 Eficiência de Aplicação – EA	30
2.4.3 Eficiência de Distribuição – ED	30
2.4.4 Eficiência de Aplicação em Potencial – EAP	30
2.5 Dimensionamento hidráulico do sistema	31
2.5.1 Perda de carga distribuída em linhas laterais	31
2.5.2 Perda localizada de carga em linhas laterais	35
2.5.3 Perda de carga em linhas de derivação	36
2.5.4 Perda localizada de carga em conexões nas linhas de derivação	37
3 MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 Rotina Informações gerais do projeto	41
3.2 Rotina dados da cultura – determinação do K_C	42
3.3 Rotina de cálculo da Evapotranspiração de referencia – ET_O	46
3.4 Rotina de cálculo da porcentagem de área umedecida – P_W	53
3.5 Rotina de cálculo da porcentagem de área sombreada – P_S	55
3.6 Rotina para o cálculo da evapotranspiração da cultura – ET_C	56

3.7	Rotina de cálculo da irrigação real necessária – IRN	57
3.8	Rotina do cálculo da Irrigação Total Necessária – ITN	60
3.9	Rotina do dimensionamento da linha lateral	63
3.9.1	Cálculo do comprimento máximo da lateral pelo método trecho a trecho	65
3.9.2	Cálculo do comprimento máximo da lateral pelo método da aproximação hidráulica	67
3.9.3	Perda localizada de carga nas conexões emissor-lateral	72
3.10	Rotina do dimensionamento da linha de derivação	74
3.10.1	Perda localizada de carga nas conexões linha lateral – linha de derivação	76
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1	Apresentação do modelo.....	77
4.2	Dimensionamento da subunidade de irrigação localizada utilizando o modelo	88
4.2.1	Necessidades de irrigação calculadas utilizando o modelo	89
4.2.2	Dimensionamento do comprimento máximo da linha lateral utilizando os diferentes tipos de emissores disponíveis na base de dados do modelo	90
4.2.3	Dimensionamento da linha de derivação utilizando os diferentes tipos de conectores disponíveis na base de dados do modelo	104
5	CONCLUSÕES	107
	REFERÊNCIAS	109
	ANEXOS	115

RESUMO

Modelo computacional para o dimensionamento da subunidade em irrigação localizada

Com o objetivo de fornecer ferramenta para auxiliar no dimensionamento da subunidade em irrigação localizada, especificamente para o método de irrigação por gotejamento, foi desenvolvido um Modelo Computacional, para o ambiente Windows em linguagem Visual Basic. Este modelo permitirá que esses sistemas de irrigação possam ser dimensionados sem negligenciar a perda localizada de carga ocasionada pela inserção dos emissores nas linhas laterais e pela inserção das linhas laterais nas linhas de derivação, o que muitas vezes causa desbalanço hidráulico destes sistemas. O modelo considera todas as etapas do desenvolvimento do projeto de irrigação para dimensionamento da subunidade, as características agrônômicas do solo, do clima e da cultura, determinando-se condições de armazenamento da água no solo, a evapotranspiração e o ciclo de desenvolvimento da cultura. Para o dimensionamento da subunidade o modelo utiliza parâmetros como, declividade do terreno, pressão de entrada na linha, espaçamento entre emissores e linhas laterais, diâmetro da linha lateral, comprimento da linha de derivação, variação máxima de carga de pressão na lateral e variação máxima de vazão dos emissores. Estes dois últimos parâmetros considerados como critério de projeto. Por último, as características do emissor, sua vazão e área de protrusão, assim como o conector utilizado na conexão da linha lateral com a linha de derivação, que determinarão as perdas localizadas de carga. Com esses parâmetros o modelo determina e fornece como resultado, de forma ágil e precisa, o comprimento máximo da linha lateral pelo método da aproximação hidráulica, a perda localizada de carga, ocasionada pela inserção dos emissores na linha, expresso em termos de comprimento equivalente, os diâmetros para a linha de derivação, a perda localizada de carga, ocasionada pela inserção dos conectores na linha de derivação e o número de linhas laterais conectadas na linha de derivação. Apresentando a tabela do dimensionamento da linha e o gráfico do perfil de pressão. Nos dimensionamentos realizados, utilizando os tipos de emissores existentes na base de dados do modelo, o emissor que proporcionou maior perda localizada de carga, em termos de comprimento equivalente, foi o emissor in-line (Uniram) com 0,758 m, resultando acréscimo do comprimento da linha lateral em 197,25 m, se desconsideradas as perdas localizadas de carga. O emissor que resultou menor acréscimo nas perdas localizadas de carga foi o do tipo online (Katif), com 0,11 m de comprimento equivalente, correspondendo 29 m de acréscimo no comprimento da linha lateral se desconsideradas as perdas localizadas de carga. Portanto, o modelo permite realizar as comparações do dimensionamento da subunidade considerando e desconsiderando as perdas localizadas de carga, possibilitando observar as diferenças resultantes no dimensionamento da subunidade quando negligenciadas estas perdas.

Palavras-chave: Modelo computacional; Subunidade; Irrigação por gotejamento; Perda localizada de carga

ABSTRACT

Computational model for design of sub-unit trickle irrigation systems

This research had the objective to develop a tool to design drip irrigation systems sub-unit. The computational model was developed to Windows in Visual Basic language. The model takes into account in the design both the local head loss due to the insertion of emitters in the lateral line and the insertion the lateral line in the main line. These local head losses are responsible for hydraulic unbalance of this type of irrigation system. The model considers all irrigation project steps for design of a sub-unit: soil properties, climate and crop characteristics. The model determines soil water content, evapotranspiration and crop cycle stage. In the sub-unit design, the model utilizes some parameters, such as, slope, pressure head in the main line, space between emitters and lateral lines, lateral line diameter, length of derivation line, maximum variation of pressure head in the lateral line, and maximum variation of emitters discharge. Emitter characteristics, its discharge and protrusion area, connector used to connect the lateral line into the derivation line, are also taken into account in the model. The model with previous parameters determines and provides precisely results of: maximum length of lateral line by hydraulic approximation method; local head losses, due to emitter insertion into lateral line, expressed as equivalent length losses; derivation line diameter; local head loss, due to connector insertion in the derivation line; and number of lateral line connected in the derivation line. It shows a design table and pressure profile. It was utilized some emitter types in the model database. The in-line emitter (Uniram) showed the biggest local head losses, 0,758 m in terms of equivalent length, it resulted in a increment in the lateral line length of the 197,25 m compared to lateral line without consider the local losses. Emitter online type (Katif) showed the lowest local head losses, 0,11 m of equivalent length which correspond 29 m in the lateral line length. Therefore, the model allows to compare the differences in the sub-unit design when it is considered the local head losses with the sub-units design neglecting theses losses.

Keywords: Computational model; Sub-unit; Drip irrigation; Local head loss

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma geral do modelo computacional para o dimensionamento da subunidade em irrigação localizada.....	40
Figura 2 – Sequência de rotinas do modelo computacional.....	41
Figura 3 – Fluxograma da rotina de informações gerais do projeto.....	42
Figura 4 – Fluxograma da rotina dados da cultura determinação do K_C	43
Figura 5–Fluxograma da rotina de cálculo da Evapotranspiração de referencia – ET_O	46
Figura 6 –Fluxograma da rotina de cálculo da área umedecida – P_W	54
Figura 7–Fluxograma da rotina de cálculo da porcentagem de área sombreada – P_S ...	55
Figura 8 –Fluxograma da rotina do cálculo da evapotranspiração da cultura – ET_C	57
Figura 9 – Fluxograma da rotina de cálculo da irrigação real necessária – IRN	57
Figura 10– Fluxograma da rotina do cálculo da Irrigação Total Necessária – ITN	60
Figura 11 –Fluxograma da rotina de dimensionamento da linha lateral	64
Figura 12 –Perfis de pressão em linhas laterais	68
Figura 13 –Fluxograma da rotina de dimensionamento da linha de derivação	74
Figura 14 –Tela inicial do modelo computacional para dimensionamento da subunidade em irrigação localizada	77
Figura 15 –Tela de Projetos existentes na base de dados do modelo	78
Figura 16 –Tela de Informações Gerais do projeto	78
Figura 17 –Tela de Culturas existentes na base de dados.....	79
Figura 18 –Tela do cálculo da evapotranspiração de referencia – ET_O	80
Figura 19 –Tela do Módulo Agrônômico do projeto	81
Figura 20 –Tela do fator de depleção ou de consumo de água no solo – f	81
Figura 21 –Tela da condutividade elétrica do estrato de saturação do solo– CE_e	81
Figura 22 –Tela do Módulo Agrônômico – Disposição do Sistema	82
Figura 23 –Tela do cálculo da porcentagem de área molhada – P_W	82
Figura 24 –Tela do cálculo da área sombreada – P_S	83
Figura 25 – Tela do Módulo Agrônômico do projeto – Seleção do emissor	84
Figura 26 –Tela dos conectores utilizados nas conexões microtubo –linha lateral	84
Figura 27– Tela do cálculo do comprimento equivalente – L_e	85
Figura 28 – Tela da área da protrusão do emissor inserido na linha	85
Figura 29 –Tela do dimensionamento da linha lateral da subunidade	86

Figura 30 – Tela do dimensionamento da linha de derivação da subunidade	87
Figura 31 – Tela dos conectores utilizados nas conexões linha lateral – linha de derivação	87
Figura 32 – Tela do relatório de dimensionamento da subunidade	88
Figura 33 – Tela de informações gerais do projeto TESE	89
Figura 34 – Tela do cálculo da ET_O do projeto TESE	89
Figura 35 – Tela da Etapa 2 [Modulo Agrônômico] do projeto TESE	90
Figura 36 – Variação do Le e do comprimento máximo em função do diâmetro da linha lateral para emissores on-line tipo bóbi	93
Figura 37 – Variação do Le e do comprimento máximo em função do diâmetro da linha lateral para emissores in-line tipo pastilha	97
Figura 38 – Variação do Le e do comprimento máximo em função do diâmetro da linha lateral para emissores conexão on-line	100
Figura 39 – Variação do Le e do comprimento máximo em função do diâmetro da linha lateral para emissores tipo microtubo	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de cultura simples (K_C) para climas subúmidos para uso com a evapotranspiração de referência de Penman-Monteith (FAO, 1998)	43
Tabela 2 – Valores de Radiação Solar no topo da atmosfera (R_a), em ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para diferentes latitudes sul (BERNARDO et al., 2009)	47
Tabela 3 – Porcentagem diária de horas anuais de luz solar para diferentes latitudes (BROUWER; HEIBLOEM, 1986)	48
Tabela 4 – Média diária de horas de luz solar (N) o 15º dia do mês (BERNARDO et al., 2009).....	50
Tabela 5 – Valores de $\sigma \cdot T_K^4$ (Lei de Stefan-Boltzmann) para diferentes temperaturas (T) (BERNARDO et al., 2009)	51
Tabela 6 – Fator de depleção de água no solo (f) para fins de irrigação sem estresse hídrico e evapotranspiração de 5 mm d^{-1} (Allen et al., 1998)	59
Tabela 7 – Valores máximos e mínimos da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CE_e) para várias culturas (Scaloppi e Brito, 1986; Keller e Bliesner, 1990)	62
Tabela 8 – Resultados dos cálculos do comprimento máximo da lateral para emissores tipo bóbi	92
Tabela 09 – Resultados dos cálculos do comprimento máximo da lateral para emissores tipo pastilha	95
Tabela 10 – Resultados dos cálculos do comprimento máximo da lateral para emissores tipo conexão online	98
Tabela 11 – Resultados dos cálculos do comprimento máximo da lateral para emissores tipo microtubo	102
Tabela 12 – Resultados dos cálculos do dimensionamento da linha de derivação utilizando os diferentes tipos de conectores	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_p	Área de protrusão do emissor, mm ²
A_r	Área de passagem do fluido no tubo com o emissor inserido, mm ²
CAD	Capacidade total de água disponibilidade, mm
D_i	Diâmetro interno da linha lateral, mm
D_{ie}	Diâmetro interno de entrada do conector, mm
D_{is}	Diâmetro interno de saída no conector, mm
EA	Eficiência de Aplicação, %
ED	Eficiência de Distribuição, %
EAP	Eficiência de Aplicação em Potencial, %
ET_O	Evapotranspiração de referência, mm/dia
ET_C	Evapotranspiração da cultura, mm/dia
f	Fator de atrito
F_w	Fração da área umedecida, adimensional
F_c	Fração da área coberta, adimensional
H	Pressão de entrada na linha, m.c.a.
hf_L	Perda localizada de carga, m.c.a.
H_{fl-c}	Perda localizada de carga devido à conexão do conector na linha de derivação, m.c.a.
H_{fl-R}	Perda de carga devido à redução do diâmetro da linha de derivação, m.c.a.
$H_{fl-TRECHO}$	Perda de carga de pressão no trecho calculado, m.c.a.
H_{var}	Variação máxima da carga de pressão, %
$H_{var_{LATERAL}}$	Variação máxima da carga de pressão na linha lateral, %
$H_{var_{DER}}$	Variação máxima da carga de pressão na linha de derivação, %
IO	Índice de obstrução, adimensional.
IRN	Irrigação Real Necessária, mm/dia
$IRN_{máx}$	Máxima Irrigação Real Necessária, mm/dia
ITN	Irrigação Total Necessária, mm/dia
K_C	Coeficiente de cultura, adimensional.
K_L	Coeficiente de localização, adimensional.
L_c	Comprimento do conector, mm
L_e	Comprimento equivalente, m

$Le_{LATERAL}$	Perda localizada de carga, em comprimento equivalente, provocada pela passagem lateral no conector, m
Le_{DIRETA}	Perda localizada de carga, em comprimento equivalente, provocada pela passagem direta do fluxo através do conector, m
$Lvar$	Porcentagem de acréscimo no comprimento máximo da linha lateral, %
$Lmáx - PLC$	Comprimento máximo da linha lateral considerando as perdas localizadas de carga, m
$Lmáx$	Comprimento máximo da linha lateral desconsiderando as perdas localizadas de carga, m
LLS	Linha Lateral Simples
LLD	Linha Lateral Dupla
PLC	Perda Localizada de Carga
P_w	Porcentagem de área umedecida, %
P_s	Porcentagem de área sombreada, %
PP	Percolação Profunda, %
$qvar$	Variação máxima de vazão dos emissores, %
r	Razão de obstrução, adimensional
R	Numero de Reynolds, adimensional
Ra	Radiação solar no topo da atmosfera, $MJm^{-2} d^{-1}$
Rn	Saldo de radiação disponível à superfície, $MJm^{-2} d^{-1}$
Se	Separação entre emissores, m
$Se1$	Distancia do inicio da linha ate o primeiro emissor, m
SL	Separação entre linhas laterais, m
SL1	Distancia do inicio da linha ate a primeira linha lateral
So	Declividade, %
S_w	Faixa Umedecida, m^2
$TRmáx$	Turno de rega máximo, dias
$Tmáx$	Temperatura máxima, °C
$Tmed$	Temperatura média, °C
$Tmin$	Temperatura mínima, °C
λ	Fator utilizado para contabilizar a perda localizada de carga no tubo, adimensional .
$\Delta H(S)$	Proporção do critério de projeto do sistema, %

1 INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada no Brasil cresce a cada dia, segundo a Agência Nacional de Águas – ANA (2009), do ano 2000 à 2006 o incremento médio na área irrigada no país por sistemas pressurizados, foi em torno de 120.000 ha/ano, o que permitiu estimar a área irrigada em 4,3 milhões de ha, para 2006, além de uma disponibilidade (em termos mundiais) de 12% dos recursos hídricos, com potencial de expansão para agricultura irrigada em cerca de 30 milhões de hectares, ou seja, um adicional de 25,5 milhões, (BRASIL, 2008), demonstrando a potencialidade de crescimento e de incremento de produção, ainda a ser explorada, corroborando estudos como o de Mukherji et al. (2009), onde enfocam que 80% dos produtos necessários para satisfazer as necessidades da população mundial, nos próximos 25 anos, serão providos por cultivos irrigados.

Em suma, tanto a disponibilidade de área e recursos hídricos, como os equipamentos de irrigação existentes no Brasil, que apresentam praticamente o mesmo nível de tecnologia dos países mais desenvolvidos nesta área, não representam eficiência no setor agrícola, pois, existem projetos que trabalham com uma sub aplicação do uso da água devido à falta de manejo e gerenciamento adequado. Logo, o desafio está em desenvolver sistemas que facilitem o manejo e a gestão para irrigação com precisão, de baixo custo e de fácil acesso para o produtor irrigante.

Em um sistema de irrigação por gotejamento a água é aplicada através de pequenos dispositivos de dissipação de energia chamados emissores, instalados ao longo de uma tubulação de polietileno, chamada de lateral. A avaliação rigorosa da distribuição da pressão ao longo do lateral, que pode ser operada em baixas pressões, exige determinar com precisão as perdas de energia total, que incorporando as perdas por atrito na tubulação, as perdas localizadas devido aos emissores e adicionalmente as perdas localizadas de energia devidas a outras conexões e a mudanças de direção do fluxo (YILDIRIM, 2009), ocasionadas quando o fluido sofre alguma perturbação brusca em seu escoamento, induzindo turbulência local.

Em emissores *in-line*, emissores integrados nas paredes internas dos tubos, esta perda de energia local é causada pela contração e posteriormente alargamento das linhas de corrente no fluxo de escoamento, devido inserção do emissor no lateral. Nos emissores *on-line*, esta perda é determinada pela contração do fluxo a montante do emissor e a posterior alargamento jusante do emissor (PROVENZANO; PUMO, 2004).

No cálculo da perda localizada de carga (PLC) tem-se em conta, entre outros fatores importantes, o fator de atrito f , o diâmetro do lateral D , o coeficiente de carga cinética ou de

resistência de perfil K_L , cada um deles determinado e avaliado para um tipo de emissor e em condições específicas de fluxo. No caso do fator de atrito f , este pode ser determinado para escoamento laminar pela equação de Hagen-Poiseuille, sendo apenas uma função do número de Reynolds (R), e para escoamento turbulento pela equação de Colebrook-White que é a mais utilizada para calcular f , relacionando o fator de atrito com a rugosidade relativa e com o número de Reynolds, sendo válida também para o caso limite de tubos lisos (RETORE NETTO et al., 2009). No caso do coeficiente K_L , este sintetiza os efeitos da contração e do alargamento brusco da seção de escoamento sobre a perda de carga, podendo ser expresso em função de um índice de obstrução, desde que K_L possa ser considerado independente de R (BAGARELLO et al., 1997).

Considerando-se o desenvolvimento da informática nos projetos de irrigação e a necessidade do cálculo rigoroso e ágil das perdas localizadas na fase de projeto, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta na forma de modelo computacional, para o ambiente Windows, em linguagem *Visual Basic*, para o dimensionamento da subunidade em irrigação por gotejamento, considerando as perdas de carga totais na rede de tubulações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Irrigação localizada

A grande quantidade de água requerida para a prática da irrigação, o decréscimo de sua disponibilidade e o alto custo da energia necessária à sua aplicação têm aumentado o interesse pela racionalização desse recurso, de forma a minimizar as suas perdas (AZEVEDO et al., 1999). Vários métodos de irrigação podem ser utilizados para o fornecimento de água às plantas, com a finalidade de proporcionar umidade adequada ao desenvolvimento das espécies vegetais. Mas, é necessário minimizar a quantidade de água aplicada via irrigação sem, contudo, comprometer a produção final. É por isto que nos dias atuais, o emprego da irrigação localizada vem crescendo com esse objetivo.

A irrigação localizada caracteriza-se, basicamente, pela aplicação da água numa fração do volume do solo explorado pelas raízes da planta, de forma pontual ou em faixa contínua, geralmente em pequenas intensidades (1 a 160 litros por hora), porém, com alta frequência (turno de rega de um a quatro dias), mantendo níveis de umidade ideais para a cultura, ou seja, mantendo a umidade do solo na zona radicular próxima a capacidade de campo (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2009).

O sistema de irrigação por gotejamento se desenvolveu em função da escassez de água, sendo difundido no Brasil desde o ano de 1972. Este sistema aplica água em apenas parte da área, geralmente na forma de ponto fonte, ficando a área molhada com forma circular, reduzindo assim a superfície do solo que fica molhada e exposta às perdas por evaporação. Com isto, a eficiência de aplicação é maior e o consumo de água menor. Os emissores utilizados podem ser gotejadores ou microaspersores.

Segundo Provenzano e Pumo (2004), nos projetos de irrigação por gotejamento é preciso considerar muitos fatores que afetam a uniformidade de emissão para se atingir uma alta eficiência, como: a variação da vazão dos emissores ao longo da linha lateral, decorrente da variação da carga hidráulica devido ao desnível geométrico e das perdas de carga, assim como a variação de vazão por variabilidade de fabricação dos emissores, a obstrução dos emissores e as variações de temperatura da água ao longo do lateral. Entretanto, estudos realizados em laboratórios concluíram que temperaturas entre 25 °C a 32 °C não alteram a vazão do gotejador de forma significativa (OLIVEIRA et al., 2000).

Os sistemas de irrigação localizada, quando corretamente projetados e bem manejados, apresentam vantagens sobre outros sistemas de irrigação.

Vantagens:

Permitem um melhor aproveitamento hídrico, pois a irrigação é feita unicamente na área ao redor da planta, diminuindo assim, a evaporação da água. Também reduz as perdas por percolação profunda, escoamento superficial e derivas por vento.

Não interferem com as praticas culturais, pois permitem o tráfego de maquinas e implementos na execução dos tratos culturais, inclusive quando se tem irrigação subsuperficial, embora seja possível causar danos, por algumas práticas ou por falta de cuidado do pessoal de campo, nas linhas de polietileno.

Reduz o perigo de salinidade para as plantas, já que o teor de umidade dentro do bulbo ou na faixa molhada é sempre bastante elevado, mantendo menor concentração de sal dentro do volume de solo molhado e maior concentração na sua periferia, conseguindo assim maior concentração das raízes na região de menor concentração de sal.

Quando comparado com outros sistemas de irrigação convencionais, por aspersão ou por superfície, há grande economia de mão de obra, por se tratar de sistemas fixos, maior eficiência no controle fitossanitário, sendo que nestes sistemas de irrigação não se molha a parte aérea dos vegetais, controlando assim os insetos e fungos, o que também gera maior eficiência na aplicação de defensivos.

Limitações:

Alto custo inicial quando comparado com outros sistemas de irrigação.

Pode apresentar problemas de entupimento, devido ao pequeno diâmetro dos emissores, principalmente por partículas de areia, fertilizantes, algas, bactérias, óxido de ferro e precipitados químicos, sendo necessária manutenção periódica do sistema.

Em virtude da formação e manutenção da região úmida, chamada de bulbo molhado, ocorre concentração das raízes nesta região, o que origina um enraizamento mais superficial e diminui a estabilidade das árvores frutíferas, podendo ocorrer tombamento destas em regiões onde os ventos são de maior intensidade.

2.2 Disposição do sistema de irrigação localizada

A disposição do sistema no campo segue o critério de distribuição e ordem das tubulações no terreno de forma a se obter a melhor configuração que resulta numa adequada

operação, eficiente manejo e, principalmente, na melhor alternativa econômica de dimensionamento.

A norma ASAE EP405.1 (2003), apresenta os seguintes termos, muito usados também em projetos de irrigação localizada. São eles:

Subunidade de irrigação - É a superfície que se irriga simultaneamente desde um ponto onde se regula a pressão de entrada da água. Constitui a base de dimensionamento da linha de derivação.

Unidade de irrigação - É a superfície formada pelo conjunto de subunidades de irrigação operando simultaneamente, abastecida pela mesma linha secundária. Corresponde à área de domínio de uma válvula volumétrica, pela qual se controla a quantidade de água a aplicar em cada irrigação.

Unidade operacional de irrigação - É o conjunto de unidades de irrigação operando simultaneamente, a partir de um mesmo cabeçal de controle. Constitui a base de dimensionamento da linha principal, do cabeçal de controle e da motobomba.

Cabeçal de controle – formado por todos os dispositivos que dominam toda área da instalação e podem servir para filtrar e tratar água, incorporar fertilizantes, controlar a pressão e medir o volume de água aplicado por irrigação.

2.3 Necessidades de Irrigação

A necessidade de irrigação de uma determinada cultura é a diferença entre a necessidade de água das culturas e a parte da precipitação que pode ser utilizada pela cultura (precipitação efetiva), que representa a precipitação que é útil ou utilizável em qualquer fase de produção das culturas. Esta necessidade de água, para uma cultura crescer de forma ótima, dependerá principalmente de fatores climáticos, do tipo de cultura e da fase de desenvolvimento da cultura.

Estimar, com alto grau de precisão, as necessidades hídricas das culturas é imprescindível no desenvolvimento do projeto e dimensionamento do sistema de irrigação localizada. Entretanto, é especialmente importante prever, a nível sazonal, a demanda hídrica no período crítico ou de maior necessidade hídrica da cultura, pois o sistema deverá ser projetado para satisfazer essa demanda.

Segundo Frizzone et al. (2012), a estimativa se faz por procedimentos convencionais, porém, com alguns coeficientes de correção. Dentre esses procedimentos o usual na irrigação

localizada, onde a água é aplicada em apenas uma fração da área cultivada, é determinar a Irrigação Real Necessária – IRN e posteriormente a Irrigação Total Necessária – ITN.

2.3.1 Irrigação Real Necessária – IRN

A irrigação real necessária expressa a quantidade de água requerida pelo sistema solo-planta-atmosfera para que a cultura se desenvolva sem déficit naquele determinado solo, ou seja, para satisfazer totalmente o déficit de evapotranspiração da cultura.

Considerando que, na irrigação localizada o papel do solo como reservatório é limitado e que a água é aplicada em apenas uma fração da área cultivada, é de grande importância estimar rigorosamente as necessidades hídricas da cultura; contudo o cálculo da irrigação real necessária deve ser corrigido pela fração de área total cultivada que é molhada pelo sistema de irrigação, sendo isto possível pela multiplicação da capacidade total de água disponível no solo (CAD) por um fator de depleção ou de consumo da água do solo (f) e pela fração de área molhada, representada em irrigação localizada pela porcentagem de área umedecida (P_w).

A porcentagem de área umedecida, parâmetro que expressa a porcentagem de área molhada em relação à área ocupada pela planta, derivada do bulbo molhado gerado pelo emissor utilizado e determinado pelas características do mesmo e do solo, deverá ser tal que permita manutenção de alto potencial de transpiração da planta facilitando o desenvolvimento adequando do sistema radicular da cultura implantada.

Na determinação de P_w existem duas considerações, a primeira quando se irriga uma faixa contínua do solo, utilizada em irrigação por gotejamento e, a segunda quando se irriga por árvore. Neste segundo caso não se formará faixa contínua molhada e sim bulbos molhados, comumente utilizada na microaspersão.

Quando se deseja formar uma faixa molhada contínua na superfície do solo, o espaçamento dos emissores sobre a lateral (S_e) deve ser, no máximo, duas vezes o raio máximo do volume de solo molhado ($2 \cdot R_w$), proporcionando uma área molhada total superior a 30% da área ocupada pelo cultivo e inferior a 60% (FRIZZONE et al., 2012). A faixa molhada pode ser formada por uma linha fonte como tubos porosos, fitas gotejadoras e tubos gotejadores com emissores muito próximos, resultando sobreposição dos raios molhados em condições de saturação.

Vários pesquisadores desenvolveram modelos matemáticos que permitem calcular o R_w e a largura da faixa molhada em função da profundidade do volume molhado sob uma

linha fonte, da vazão por unidade de comprimento e da condutividade hidráulica do solo saturado (DASBERG, S.; OR, D., 1999; SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B., 1986).

Considerando que na irrigação localizada não se molha toda a área irrigada, como exposto na definição de P_w , e como a evapotranspiração é expressa em termos de lâmina de água evapotranspirada por dia em toda a área irrigada, é necessário, ao se calcular a evapotranspiração para projeto, considerar um fator de ajuste que leva em conta P_w ou a área sombreada pela planta. A quantificação da água necessária a ser aplicada às plantas, ou seja, àquela referente à evapotranspirada pelo sistema solo-planta, é fator primordial para o planejamento, dimensionamento e manejo adequado de uma área agrícola irrigada.

2.3.2 Evapotranspiração

A estimativa das perdas por evaporação e transpiração é de grande importância para atividades como projetos de irrigação. Evapotranspiração (ET) é a perda de água de uma superfície com qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de umidade para a atmosfera. Evapotranspiração foi o termo usado por Thornthwaite e Wilm (1944) para expressar a ocorrência simultânea dos processos de evaporação no solo e de transpiração das plantas.

Define-se evapotranspiração de referência (ET_o) como o processo de perda de água para a atmosfera por meio de uma superfície padrão. A partir de 1990 foi proposto um novo conceito para a evapotranspiração de referência (SMITH et al., 1991; ALLEN et al., 1998), adotado como padrão no Boletim FAO-56. Neste caso, a definição para a ET_o diz que é a taxa de evapotranspiração que ocorre de uma superfície de referência (padrão) cujas características que a definem são: extensa superfície com vegetação em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, altura da vegetação de 0,12 m, índice de área foliar de 2,88, resistência aerodinâmica da superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23. Estas condições assemelham-se a evapotranspiração de uma extensa superfície de grama verde com altura uniforme, crescendo ativamente, sombreando completamente o solo e sem restrição hídrica (ALLEN et al., 1998). A ET de referência (ET_o) tem sido usada como um índice padronizado e reprodutível de aproximação da demanda climática da atmosfera por vapor d'água.

Diversos métodos para a estimativa da evapotranspiração são utilizados no desenvolvimento dos projetos de irrigação, constituindo-se basicamente dois grupos: métodos diretos e indiretos ou empíricos. Os métodos diretos caracterizam-se pela determinação da evapotranspiração diretamente na área, onde se destacam os diferentes tipos de lisímetros, ou

mesmo pelo método do balanço de água no solo. Os indiretos, aqueles que não dão diretamente o valor da evapotranspiração, são caracterizados pelo uso de equações empíricas ou modelos matemáticos, que para determinar o valor da evapotranspiração a qual deve ser multiplicada por um fator (K), a ser determinado para cada região e para cada método indireto. Estes, por se tratarem de uma estimativa, têm inúmeros problemas de precisão, principalmente quando aplicados em condições climáticas diferentes das quais foram elaborados, sendo que esses lisímetros são relativamente caros, demandam técnicas, não podendo, desse modo, ser construídos para cada sub-região (BERNARDO et al., 2009).

Vários são os métodos indiretos, por equações, de estimativa da ETo e a literatura sobre o assunto é bastante vasta, entre eles Thornthwaite (1948), Blaney e Criddle (1950) e Hargreaves e Samany (1982) que utilizam apenas a temperatura do ar como variável climática. Outros, como os modelos de Penman (1948) e de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) que apresentam um desenvolvimento teórico racional, porém demandam um número maior de variáveis climáticas. Entre estes modelos encontra-se um grande número de outros modelos.

A equação original de Blaney-Criddle é relativamente antiga e uma das mais empregadas para a estimativa da evapotranspiração para regiões de clima semi-árido. Com o objetivo de melhor definir os efeitos do clima sobre a evapotranspiração, o boletim nº 24 da FAO, em 1977, apresentou modificações substanciais no método original visando aprimorar a estimativa da evapotranspiração, com determinações a partir de um grande número de medições em climas distintos, como também considerar o efeito da umidade do ar, insolação e velocidade do vento. Dessa forma, na equação de Blaney-Criddle é utilizado um coeficiente de ajuste (c), que depende de outras variáveis climáticas como a velocidade do vento e a umidade relativa do ar, assim como o brilho solar; mesmo assim, este método sendo aparentemente simples, envolve uma série de variáveis que acaba limitando seu emprego.

Hargreaves e Samani (1985) desenvolveram uma equação simples que necessita apenas da temperatura do ar e coeficientes dependentes da latitude do local e época do ano. Nesta equação normalmente KT (coeficiente empírico), assume o valor de 0,17, onde muitas vezes substitui-se a parcela $0,0135KT$ por 0,0023. Adicionalmente, a equação pode ser utilizada com a radiação solar no topo da atmosfera (Ra) em $\text{MJm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, bastando para isso multiplicar a parcela direita da equação por 0,408.

Estudos anteriores têm demonstrado que o vento é uma fonte importante da variabilidade no valor da ETo, e como a equação de Hargreaves não contabiliza o vento, diverge sensivelmente de cálculos realizados com a equação de Penman-Monteith.

Penman (1948) combinou o balanço energético com o método da transferência de massa e derivou uma equação para calcular a evaporação de uma superfície aberta de água a partir de dados climáticos tais como: horas sol, temperatura, umidade atmosférica e velocidade do vento. Este método conhecido como combinado foi desenvolvido posteriormente por muitos pesquisadores e ampliado a superfícies cultivadas por meio da introdução de fatores de resistência.

O enfoque de Penman-Monteith inclui todos os parâmetros que determinam o intercâmbio de energia e o fluxo de calor (evapotranspiração) de grandes extensões uniformes de vegetação. A maioria dos parâmetros é medida e podem ser calculados facilmente através de dados meteorológicos disponíveis na região. A equação pode ser utilizada para o cálculo direto da evapotranspiração de qualquer cultura pois as resistências superficial e aerodinâmica são específicas para cada cultura.

O principal objetivo de definir a evapotranspiração de referência é universalizar seu cálculo, que pela multiplicação por um coeficiente de cultura (K_c), servirá para estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c).

Doorenbos e Pruitt (1975) propuseram uma metodologia para determinar a evapotranspiração das diferentes culturas por meio de duas etapas: primeiramente, a estimativa da evapotranspiração da cultura de referência e, segundo, a eleição de um coeficiente de cultura, tabelado, e distinto para cada cultura e para cada estágio de desenvolvimento. O produto de ET_o pelo K_c selecionado, estima a evapotranspiração da cultura de interesse.

2.3.3 Coeficiente da cultura – K_c

Segundo Pereira et al. (1997) o coeficiente de cultura representa a integração dos efeitos de três características que distinguem a evapotranspiração de qualquer cultura de referência: a) a altura da cultura (h) que afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica; b) a resistência da superfície relativa ao sistema solo-planta, que é afetada pela área foliar (determinando o número de estômatos), pela fração de cobertura do solo pela vegetação, pela idade e condição das folhas, e pelo teor de umidade à superfície do solo e, c) o albedo da superfície solo-planta, que é influenciado pela fração de cobertura do solo pela vegetação e pelo teor de umidade à superfície do solo, e influencia o saldo de radiação disponível à superfície, R_n , que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evaporação.

Durante o período vegetativo, o valor de K_c varia à medida que a cultura cresce e se desenvolve, do mesmo modo que varia com a fração de cobertura da superfície do solo pela vegetação, e à medida que as plantas envelhecem e atingem a maturação. Essa variação pode ser representada por uma curva dos valores de K_c , que caracteriza tipicamente o desenvolvimento de uma cultura anual, desde o plantio até à colheita, sendo que as mudanças na forma da curva acompanham o desenvolvimento e a senescência da cultura.

Uma vez que a ETo representa um índice climático associado à evaporação, o K_c varia essencialmente de acordo com as características da cultura, traduzindo em menor escala a variação dos fatores climáticos. Este fato torna possível a transferência de valores padrão do K_c de um local para outro e de um clima para outro.

De igual forma, na irrigação localizada, não se molha toda a área cultivada, de forma que na área molhada a ET_c é potencial e, na área não molhada, a ET_c é reduzida. Por isso é necessário corrigir o K_c , por um fator de localização (K_L , adimensional) com base na fração de área molhada (F_w) ou da área coberta (F_c). Existem muitas dúvidas sobre quais valores de K_L utilizar, necessitando de pesquisas específicas para cada sistema de plantio (FRIZZONE et al., 2012).

2.3.4 Irrigação Total Necessária – ITN

Para definir a Irrigação Total Necessária (ITN), ou comumente denominada lâmina bruta de irrigação, em um projeto de irrigação, deve-se ter em consideração fatores importantes como as perdas de água por percolação, por evaporação e deriva por vento, pela uniformidade de distribuição de água do sistema e para promover a lixiviação do excesso de sais na zona radicular, com o intuito de fornecer uma lâmina adicional de água para compensar essas perdas.

De um modo geral a ITN deve considerar a Eficiência de Aplicação (EA) e a fração de lixiviação (FL) necessária para a remoção de sais da zona radicular, mantendo assim a salinidade em um nível adequado para o desenvolvimento da planta. Segundo Frizzzone et al. (2012), para a aplicação prática da ITN consideram-se dois casos: (a) sendo as perdas de água por percolação onde considera-se que não há necessidade de lâmina adicional para controle da salinidade e que as perdas por percolação são suficientes para promover a lavagem da zona radicular e manter o nível de salinidade em condição não prejudicial, definida por: $(1 - ED) \geq FL$, onde ED é a eficiência de distribuição, e (b) quando as perdas por percolação são insignificantes e a lâmina de água percolada é inferior à lâmina de água necessária para

satisfazer a lixiviação $[(1 - ED) < FL]$, deve-se provocar a percolação para evitar a salinização do solo.

2.4 Indicadores de Eficiência

Considerando as condições atuais de disponibilidade dos recursos hídricos e do conjunto de fatores que influenciam a viabilidade da agricultura irrigada é necessário, atualmente, técnicas cada vez mais eficientes e adequadas a cada região e a suas características climáticas e de desenvolvimento. Isso implica em projetos de irrigação cada vez mais otimizados para poderem se viabilizar num cenário de escassez dos recursos hídricos.

A partição da água aplicada por irrigação é a base para a definição de alguns parâmetros de desempenho, especialmente os indicadores de eficiência. Os diferentes indicadores têm vários propósitos e devem ser cuidadosamente identificados. Expressos como porcentagens, eles representam frações do volume de água de irrigação destinadas a certas funções. É impossível definir alguns indicadores sem especificar cuidadosamente o período de tempo e os limites físicos da área analisada. Já outros, pelos seus pressupostos, podem evitar esses problemas (FRIZZONE et al., 2012)

2.4.1 Eficiência da Irrigação – EI

Eficiência da irrigação é uma medida crítica do desempenho da irrigação em termos da água necessária para irrigar uma determinada área do projeto. O valor da eficiência de irrigação e a sua definição são importantes para os pontos de vista sociais da agricultura irrigada e seu benefício no fornecimento de alta qualidade dos alimentos para atender a população mundial em crescimento.

Eficiência de irrigação representa a razão entre o volume de irrigação que é benéficamente usado e o volume total de água de irrigação (uso benéfico mais uso não benéfico) que deixa os limites da área considerada (BURT et al., 1997). Entre os usos benéficos pode se destacar os usos para múltiplos propósitos, como os usos para a evapotranspiração da cultura, lixiviação de sais, proteção contra geadas, controle de temperatura ambiente, aplicação de fertilizantes e pesticidas, preparação do solo, quebra de crosta superficial do solo para facilitar à emergência, etc. E entre os usos não benéficos os mais relevantes seriam a percolação profunda excessiva, o escoamento superficial, a deriva

pelo vento, a evaporação após a água ser aspergida no ar e a água usada pelas plantas daninhas (FRIZZONE et al., 2012).

2.4.2 Eficiência de Aplicação – EA

A eficiência de aplicação de água pode ser definida como a relação entre o volume de água que fica disponível para a cultura em seu sistema radicular e o volume de água aplicado pelo sistema de irrigação. Sendo assim, se toda a água aplicada for aproveitada pela planta, a eficiência de aplicação será igual a 1,0 ou 100%. Esse valor, entretanto, dificilmente poderá ser alcançado em condições de campo devido às perdas que ocorrem durante e após a irrigação.

2.4.3 Eficiência de Distribuição – ED

O planejamento racional de um sistema de irrigação requer o conhecimento da distribuição da água aplicada, uma vez que a baixa uniformidade de distribuição reduz a eficiência de aplicação o que pode conduzir a resultados insatisfatórios no manejo da irrigação (KINCAID; HEERMANN, 1970).

A distribuição de água pelos sistemas de irrigação não é completamente uniforme e, por isso, ao se irrigar uma área infiltram-se volumes de irrigação maiores que o volume meta (IRN) em uma fração da área e volumes menores em outra fração da área. Se os volumes infiltrados na área forem sempre menores que IRN diz-se que a irrigação é insuficiente e ocorre déficit de água em toda a área, não se verificando percolação profunda. Se os volumes infiltrados superarem IRN em toda a área, a irrigação será excessiva e ocorrerá percolação profunda em área total. Diz-se que a irrigação é balanceada quando os volumes infiltrados são maiores que IRN em uma fração da área e menores em outra (FRIZZONE et al., 2012),

Valores de ED são sugeridos por Hart et al. (1979): excelente: $\geq 0,8$; satisfatório: $\geq 0,5$ e $< 0,8$; insatisfatório: $< 0,5$.

2.4.4 Eficiência de Aplicação em Potencial – EAP

A Eficiência de Aplicação em Potencial – EAP é o parâmetro de maior importância para analisar qualquer sistema de irrigação, sendo a estimativa da porcentagem do total de

água aplicada na irrigação que atinge a superfície do solo e, ou, as plantas (BERNARDO, 2009).

Pelas definições de ED e EAP pode-se verificar que $EA = ED \times EAP$. Para sistemas de irrigação por gotejamento podem-se desconsiderar as perdas de água por evaporação, vento e escoamento superficial, resultando $EA = ED$ e $EA + PP$ (Percolação Profunda) = 100%, (FRIZZONE et al., 2012).

2.5 Dimensionamento hidráulico do sistema

2.5.1 Perda de carga distribuída em linhas laterais

A perda de carga nas tubulações é um fator importante para os projetos de engenharia de irrigação, por afetar o custo total e o balanço hidráulico do sistema (KAMAND, 1988). O diâmetro dos tubos da rede de distribuição de água depende da perda de carga admitida no sistema pelo projetista. O custo da energia de bombeamento ou operacional é afetado inversamente pelo diâmetro dos tubos, com o aumento do diâmetro, para uma determinada vazão, a perda de carga por unidade de comprimento diminui, reduzindo a energia de bombeamento requerida, porém proporciona aumento do capital necessário para aquisição dos tubos.

Por simplicidade matemática, muitos projetistas de sistemas de irrigação preferem utilizar equações empíricas, como as de Hazen-William, Manning e Scobey, para determinar as perdas de carga, em vez de utilizar a equação teórica de Darcy-Weisbach. Entretanto, uma importante limitação dessas equações empíricas é que um fator de rugosidade constante é assumido para todos os diâmetros e velocidades de escoamento (KAMAND, 1998). Em decorrência dessa suposição a perda de carga calculada pelas equações empíricas pode diferir significativamente daquela calculada pela equação de Darcy-Weisbach, na qual o fator de atrito varia com as condições do escoamento (BOMBARDELLI; GARCÍA, 2003). Isto pode influenciar na seleção dos diâmetros dos tubos e, conseqüentemente, na estimativa da energia requerida.

Existe um predomínio de material plástico nas tubulações das redes de distribuição de água de sistemas de irrigação localizada, isto porque, para tubulações de pequenos diâmetros, que transportam pequenas vazões, os tubos de plásticos fabricados em polietileno de baixa densidade são economicamente mais competitivos que os tubos dos demais materiais disponíveis no mercado. Em razão desses tubos serem produzidos com material plástico, seus

diâmetros podem variar em decorrência das variações de pressão de operação. Isso pode influenciar, portanto, na perda de carga real, o que resultaria em alterações nas condições hidráulicas do projeto.

O acréscimo do diâmetro de tubos de polietileno, em função da pressão de operação, também foi observado por Frizzone, Vieira e Paz (1998), ao analisarem um tubo gotejador com paredes de 225 µm de espessura. Vilela et al. (2003) trabalhando com tubos de polietileno, com espessuras de paredes de 1325 µm e 1050 µm, observaram influência significativa da pressão de operação no diâmetro dos tubos e relataram que alterações nos diâmetros internos, em virtude de variações na pressão de operação, podem ocasionar variações nas perdas de carga superiores a 20%. No mesmo estudo, conclui-se que para um tubo DN12, houve uma relação linear entre a pressão e o diâmetro, enquanto que para o tubo DN20, cuja classe de pressão é superior ao DN12, a relação foi potencial, representando maior variação de diâmetro interno com as pressões.

Os resultados encontrados por Vilela et al. (2003) contrariam a suposição de que tubos com paredes de menor espessura apresentariam maior deformação com a pressão de operação. Para explicar este efeito, além da espessura da parede e do coeficiente de elasticidade do material, outro componente a considerar é a força de deformação que atua nas paredes internas do tubo, que é diretamente proporcional ao diâmetro, portanto, para um comprimento unitário, pressão constante e mesmo material, no tubo de maior diâmetro atuará maior força na parede interna o que resultará em maior deformação.

O escoamento em tubos está sempre sujeito à resistência hidráulica e à dissipação de energia. Esta, por sua vez, representada pela perda de carga, em escoamento permanente e turbulento de fluidos reais, através de tubos de seção cilíndrica, pode ser calculada por diferentes equações, apresentadas na literatura básica de hidráulica (PORTO, 1998). A contribuição mais importante é expressa pela equação de Darcy-Weisbach (KAMAND, 1988; BERNUTH, 1990; BAGARELO et al., 1995; SONNAD; GOUDAR, 2006), cuja forma é expressa pela eq. (1):

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

em que hf – perda de carga (L); L – comprimento do tubo (L); D – diâmetro do tubo (L); V – velocidade média do escoamento (LT^{-1}); g – aceleração da gravidade (LT^{-2}); f – fator de atrito, dependente do número de Reynolds (R) e do tamanho das asperezas da parede do tubo (ϵ). Outra forma de apresentar a perda de carga é por unidade de comprimento do tubo, eq. (2):

$$J = f \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

sendo: J a perda de carga unitária ($L L^{-1}$).

A resistência hidráulica, expressa como um fator de atrito (f) constitui a informação básica necessária para o projeto hidráulico. Desde as contribuições pioneiras de Weisbach, em 1845, de Darcy, em 1857, de Boussinesq, em 1877 e de Reynolds em 1895, os dois últimos citados no trabalho de Yoo e Singh (2005), a resistência ao escoamento hidráulico tem sido objeto de muito interesse e pesquisa. Na equação de Darcy-Weisbach, a estimativa do fator de atrito (f) é essencial para o cálculo da perda de carga em redes de tubulações. Para escoamento laminar ($R < 2000$), o cálculo do fator de atrito é feito pela equação de Hagen-Poiseuille, sendo apenas uma função do número de Reynolds (R), o qual depende exclusivamente das propriedades do fluido, do diâmetro do tubo e da velocidade de escoamento. Entretanto, para o escoamento permanente turbulento, a estimativa do fator de atrito é mais complexa, pois f é uma função da rugosidade relativa das paredes do tubo (ε/D) e do número de Reynolds (R) (ROMEO; ROYO; MONZON, 2002; SONNAD; GOUDAR, 2006).

Para o escoamento turbulento uniforme em tubos comerciais rugosos, a equação de Colebrook-White é a mais utilizada para calcular o fator de atrito (f) (ROMEO; ROYO; MONZON, 2002; YOO; SINGH, 2005; SONNAD; GOUDAR, 2006), sendo válida para R entre 2000 e 10^8 e para ε/D entre 0 e 0,05. Esta equação relaciona o fator de atrito com a rugosidade relativa e com o número de Reynolds conforme a eq. (3):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,52}{R\sqrt{f}} \right) \quad (3)$$

sendo ε a altura das rugosidades do tubo (L). Esta equação é válida também para o caso limite de tubos lisos ($\varepsilon = 0$) e escoamento completamente turbulento.

Para escoamento turbulento uniforme em tubos lisos, o tamanho das asperezas não influi sobre a turbulência do escoamento, e o coeficiente f independe da rugosidade do conduto e a eq. (3) pode ser reescrita como uma relação funcional entre f e R , denominada equação de Von Karman, da seguinte forma (PORTO, 1998):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log (R\sqrt{f}) - 0,8 \quad (4)$$

As eq.s (3) e (4) são implícitas em f e requerem soluções por métodos numéricos iterativos como o de Newton-Raphson. Embora o trabalho computacional seja trivial no contexto da capacidade dos atuais computadores, a estimativa de f por métodos iterativos pode aumentar significativamente o trabalho computacional para redes de tubulações complexas onde é necessário o cálculo de múltiplos fatores de atrito. Além disso, o valor inicial atribuído a f e o critério de convergência para as iterações deverão ser selecionados cuidadosamente para se obter exatidão na estimativa. Reconhecendo estas dificuldades, vários autores propuseram aproximações explícitas para as eq.s (3) e (4), tornando-as convenientes para as implementações computacionais (ROMEO; ROYO; MONZON, 2002, SONNAD; GOUDAR, 2006).

Para tubos lisos e $4000 \leq R \leq 10^5$ o fator de atrito pode ser estimado por uma equação simples proposta por Blasius (BERNUTH, 1990). A equação de Blasius é uma função somente do número de Reynolds sendo apresentada pela eq. (5):

$$f = c * R^{-m} \quad (5)$$

Blasius, ao propor esta equação para estimar f , determinou m como sendo uma constante de valor igual a 0,25, enquanto que o coeficiente c seria outra constante de valor igual a 0,316. Para Bernuth (1990) a inserção do fator de atrito de Blasius na equação de Darcy-Weisbach resulta uma equação combinada com as seguintes vantagens: (a) é teoricamente perfeita e dimensionalmente homogênea. Tanto a equação de Darcy-Weisbach quanto a de Blasius têm bases teóricas; (b) tem bom grau de exatidão para tubos plásticos quando $4000 \leq R \leq 10^5$. O número de Reynolds limite não é restritivo para sistemas de irrigação que usam tubos com diâmetros inferiores a 80mm; (c) pode ser facilmente corrigida para variações na viscosidade da água. Bernuth (1990) salienta que para R inferior a 4000 a equação de Blasius superestima os valores de f .

Considerando os coeficientes da equação de Blasius, a eq. (2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$J = K \nu^{0,25} Q^{1,75} D^{-4,75} \quad (6)$$

sendo: ν – viscosidade cinemática da água ($1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ à 20°C); $K = 2,458 \times 10^{-2}$ para o sistema internacional de unidades; Q – vazão (L^3T^{-1}); D – diâmetro interno no tubo (L).

A determinação dos coeficientes da equação de Blasius também foi alvo de estudo de Bagarello et al. (1995). Estes autores, trabalhando com tubos de diâmetros nominais de 16, 20 e 25 mm, variaram o número de Reynolds pela mudança da viscosidade do fluido (R entre 3037 e 31373), ao se alterar a temperatura, obtendo $c = 0,302$ para $m = 0,25$. O valor do coeficiente c foi dado por uma constante que representou a média dos valores para os diâmetros experimentados. Por outro lado, ao fazerem uma análise semi-teórica do fator de atrito, estudando o perfil de distribuição da velocidade em uma seção da tubulação, concluíram que o coeficiente c pode variar bastante, sendo possível correlacioná-lo com R , propondo a equação (7):

$$c = \frac{6,152}{R^{0,183}} \quad (7)$$

enquanto que o valor do expoente m pode ser calculado pela equação:

$$m = \frac{2}{\left(8 - \frac{12,4}{R^{0,157}}\right)} \quad (8)$$

Alternativas empíricas para determinar f , por ensaios de laboratório, satisfazem a expectativa de se obter resultados satisfatórios, já que alguns autores (BERNUTH, 1990; BAGARELLO et al., 1995) obtiveram bons resultados usando equações do tipo potência, semelhante à de Blasius.

2.5.2 Perda localizada de carga em linhas laterais

Para efetuar a avaliação das perdas de energia, ao longo linhas laterais em irrigação localizada, de forma a se conseguir maior exatidão, devem ser consideradas as perdas de carga contínua nos trechos uniformes da tubulação e as perdas de carga devidas à inserção do emissor na linha (PROVENZANO; PUMO; DI DIO, 2005), essas perdas de carga ocorrem devido à contração e subsequente ampliação do trajeto do fluido, causado pela obstrução que o conector provoca na passagem do fluido.

Existem várias pesquisas publicadas para analisar o escoamento permanente e turbulento em linhas laterais de irrigação localizada (BERNUTH, 1990; ZAYANI et al., 2001). Recentemente, tem-se reconhecido a perda de carga em conexão de emissores, o que estimulou pesquisas no desenvolvimento de modelos matemáticos para estimá-las, por parte

de alguns pesquisadores (BAGARELO et al., 1997, PROVENZANO; PUMO, 2004; PROVENZANO; PUMO; DIDIO, 2005; PALAU-SALVADOR et al., 2006).

A perda localizada de carga (hf_L) na inserção de um gotejador sobre a linha lateral deve-se à resistência a movimentação do fluxo oferecida pela protrusão da conexão no interior do tubo, sendo expressa pela formula clássica como fração K_L da carga cinética, obtida pelo princípio da similaridade de Reynolds, como mostra a eq. (9):

$$hf_L = K_L \frac{V_0^2}{2g} \quad (9)$$

sendo: hf_L – perda localizada de carga (L); V_0 – velocidade média de aproximação da corrente fluida ($L T^{-1}$); K_L – coeficiente de carga cinética ou de resistência de perfil, g – aceleração da gravidade ($L T^{-2}$). Aumentando-se a velocidade de escoamento, maiores serão as perdas localizadas, uma vez que a turbulência do fluido na passagem entre o elemento obstrutor e a parede do tubo tende a aumentar.

O coeficiente K_L depende das características geométricas da inserção do emissor e do número de Reynolds, R . Para uma dada seção do tubo (A), vazão transportada (Q) e para uma conexão com dimensões definidas, o valor de K_L reduz-se com o aumento de R até certo limite a partir do qual se mantém aproximadamente constante (BAGARELLO et al., 1997; PROVENZANO; PUMO, 2004). Na prática, o efeito das forças viscosas é negligenciado a partir de certo valor de R (JUANA; RODRIGUES-SINOBAS; LOSADA, 2002 a), podendo-se relacionar K_L apenas com a geometria do elemento obstrutor, uma vez que se observa aumento de seu valor com o aumento da seção transversal obstruída (BAGARELLO et al., 1997; PROVENZANO; PUMO, 2004).

2.5.3 Perda de carga em linhas de derivação

As linhas de derivação, dentro da subunidade de irrigação, são tubos que recebem a água de outras linhas de maior diâmetro (linhas secundárias) e a distribuem, através das linhas laterais, ao longo do seu comprimento. Podem ser em Polietileno ou PVC, com diâmetro externo médio de 38,1 mm (DN 35) até 150 mm (DN 150) e comprimentos de 6m. Estas tubulações de derivação podem ser enterradas, no caso de PVC, para prolongar sua vida útil (LOPEZ et al., 1997). A tubulação de derivação, diferentemente da tubulação principal tem uma vazão inferior, seu dimensionamento pode ser feito utilizando um diâmetro só ou com

vários diâmetros (telescópica) ao longo do seu comprimento. A escolha das dimensões das linhas de derivação depende do cálculo hidráulico.

Normalmente, a pressão de serviço a que são submetidas é menor do que 40 m.c.a. (400 kPa), permitindo o uso de tubulações PN 40, de menor custo que as PN 80. É importante destacar que quando se projetam vários diâmetros em uma mesma linha de distribuição, no máximo até 4 diâmetros diferentes, o diâmetro menor não deve ser menor que a metade do maior diâmetro na linha. Isto, além de permitir um custo mais baixo economicamente, permite adaptar melhor a linha piezométrica ao perfil do terreno o qual faz com que se tenham diferenças de pressões menores ao longo da linha de derivação (KELLER; BLIESNER, 1990).

Nos sistemas de irrigação localizada, de modo geral, o controle de pressão é feito na entrada da linha de derivação, sendo assim, o conhecimento da pressão a ser fornecida nesta é muito importante, conseguindo um manejo da subunidade do sistema num mesmo ponto.

No dimensionamento da linha de derivação em subunidades retangulares com diâmetro único, ou seja, constante, o cálculo do diâmetro teórico é determinado em função da perda de carga máxima admitida na linha, levando-se em conta o desnível do terreno, sendo, terreno plano, em declive ou em aclave. No intuito de manter uma viabilidade econômica relacionada com análise técnica, o diâmetro comercial a ser utilizado na linha de derivação deve ser aquele que seu diâmetro interno seja imediatamente superior ao diâmetro teórico calculado (KELLER; BLIESNER, 1990).

Quando utilizada, no projeto da subunidade, uma linha de derivação telescópica, o seu dimensionamento consiste em dividir a linha em trechos, em que cada trecho corresponde a distancia entre laterais ao longo desta e com terreno em declive. Portanto, o cálculo consiste em determinar a perda de carga em cada um desses trechos, utilizando como primeira etapa do dimensionamento quantos diâmetros forem possíveis. Na etapa seguinte, o diâmetro que deve ser escolhido, para o cálculo definitivo da perda de carga na linha de derivação, é aquele cuja perda de carga se aproxime do valor da energia ganha com o desnível do terreno (FRIZZONE et al., 2012).

2.5.4 Perda localizada de carga em conexões nas linhas de derivação

Em um sistema de irrigação localizada, as conexões normalmente utilizadas para passagem da água da linha de derivação para a linha lateral são denominadas de conectores, ou conectores de inserção. Essas peças, ao serem instaladas na tubulação, ocasionam perdas

de carga localizadas decorrentes da inserção de parte de seu corpo no interior da linha de derivação, bem como pelas mudanças na velocidade e na direção do fluxo da água aí verificadas.

A avaliação da perda de energia é realizada, geralmente, assumindo a hipótese de que as perdas localizadas de energia (comumente chamadas de perdas menores) podem ser negligenciadas, ainda que estudos experimentais anteriores, como os realizados por Yildirim (2007), indicassem que as perdas menores podem tornar-se uma percentagem significativa das perdas totais de energia, como consequência do elevado número de emissores instalados ao longo da lateral linha.

A perda de carga em conectores pode acontecer de duas formas: na passagem direta ou na passagem lateral. No caso da passagem direta, a água escoar só numa direção e a perda ocorre devido à obstrução da seção do tubo decorrente da protrusão do conector na linha. No caso da passagem lateral a água é derivada de uma linha lateral para uma linha secundária. Neste caso, devido à mudança na direção do fluxo e da ocupação pelo conector, de uma área da seção interna do tubo, ocorre modificação nas condições de escoamento e turbulência (ZITTERELL, 2011).

Num estudo realizado por Melo, Silva e Faria (2000), foram testados três modelos de conectores, com o fluxo na passagem direta quanto na passagem lateral. Os autores conseguiram ajustar uma equação, para cada um dos modelos de conectores, em função da velocidade na linha lateral e a velocidade a montante do conector. Mesmo que estas equações apresentem bons ajustes, só poderão ser usadas para os modelos de conectores específicos.

Posteriormente, Vilaça (2012), desenvolveu um modelo matemático, utilizando o teorema dos Pi, para determinar a perda localizada de carga em conectores utilizados em linhas de derivação na irrigação localizada. Concluindo que a perda de carga localizada, para a passagem lateral, é diretamente proporcional a uma potência da velocidade de escoamento e da área da protrusão do conector e inversamente proporcional a uma potência do diâmetro interno da tubulação. Na passagem direta, essa perda localizada de carga é diretamente proporcional a uma potência do diâmetro de saída e do comprimento do conector, da velocidade de escoamento na entrada do conector e do tubo de polietileno.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O Modelo Computacional foi desenvolvido com a linguagem de programação *Visual Basic*. Essa linguagem foi selecionada pela simplicidade de programação já que é a base dos sistemas operacionais mais utilizados na atualidade, por exemplo, os sistemas Windows® e o Office®, e principalmente, pela facilidade de se fazerem atualizações futuras nas rotinas de programação.

Na figura 1 é apresentado o fluxograma geral do modelo computacional o qual seguirá uma serie de etapas que permitira o dimensionamento da subunidade, sendo elas: Etapa 1 – nesta serão fornecidas, por parte do usuário, as informações gerais do projeto a ser dimensionado; Etapa 2 – dados referentes ao módulo agrônômico; Etapa 3 – dimensionamento das linhas laterais; Etapa 4 – dimensionamento da linha de derivação; Etapa 5 – cálculo das perdas localizadas de carga e Etapa 6 - relatório de cálculos do dimensionamento da subunidade. Cada uma dessas etapas principais é formada por rotinas, permitindo o cálculo separado de cada um dos processos de dimensionamento da subunidade de irrigação.

Inicialmente, o desenvolvimento do modelo computacional, foi realizado dividindo o mesmo em etapas e rotinas (Figura 2), permitindo assim, uma sequência lógica dos procedimentos para o calculo e dimensionamento da subunidade de irrigação.

Figura 1 – Fluxograma geral do modelo computacional para o dimensionamento da subunidade em irrigação localizada

Figura 2 -Sequência de rotinas do modelo computacional

3.1 Rotina de Informações gerais do projeto

Nesta rotina são definidas as características do projeto as quais vão permitir criar a base de dados dos projetos elaborados pelo usuário, provendo, desse modo, informações básicas como o código do projeto, nome do projeto, nome da propriedade, nome do proprietário, nome do projetista, identificação, nome ou código da subunidade, área total a ser irrigada, área da subunidade e a data de elaboração do projeto.

Nas informações fornecidas pelo usuário a única que não pode ter duplicidade será o código do projeto; este código será o único identificador que permitirá que não exista um projeto com o mesmo código que outro, mas pode existir o caso de ter dois ou mais projetos com o mesmo nome, mas identificados com códigos diferentes, para fazer relação a possíveis diferenças nos cálculos e no dimensionamento da subunidade.

Na figura 3 é apresentada a rotina de informações gerais, a qual não permitirá salvar dois projetos com o mesmo código para, assim, diferenciar cada subunidade dimensionada de uma mesma área irrigada.

Figura 3 -Fluxograma da rotina de informações gerais do projeto

3.2 Rotina dos dados da cultura – determinação do K_C

Na determinação do coeficiente da cultura (K_C), utilizou-se uma rotina para seleção por parte do usuário (Figura 4), do valor a ser utilizado no cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_C), contudo, deverá para isto, selecionar-se entre os três possíveis K_C de cada uma das culturas que estão inseridas na base de dados do programa (Tabela 1). O K_C inicial refere-se ao período da sementeira até 10% de cobertura do terreno, o K_C de meia-estação refere-se ao período de 100% de cobertura do terreno até o início da maturação e o K_C final refere-se ao fim da maturação. Para plantas perenes, deve-se ainda, considerar os fluxos vegetativos.

Nesta base de dados de K_C poderá ser acrescentada em qualquer momento pelo usuário o valor dos K_C para cada estação da cultura, assim como, a cultura que não estiver na base de dados fornecida no programa.

Figura 4 -Fluxograma da rotina dados da cultura determinação do Kc

Tabela 1- Coeficientes de cultura simples (K_C) para climas subúmidos para uso com a evapotranspiração de referência de Penman-Monteith (ALLEN et al. 1998) (continua)

Cultura	K_C		
	Inicial	Meia-Estação	Final
a) Pequenos vegetais	0,70	1,05	0,95
Aipo	0,70	1,05	1,00
Alface	0,70	1,00	0,95
Alho	0,70	1,00	0,70
Brócolis	0,70	1,05	0,95
Cebola (seca)	0,70	1,05	0,75
Cenoura	0,70	1,05	0,95
Couve-De-Bruxelas	0,70	1,05	0,95
Couve-flor	0,70	1,05	0,95
Espinafre	0,70	1,00	0,95
Rabanete	0,70	0,90	0,85
Repolho	0,70	1,05	0,95
b) Solanáceas	0,60	1,15	0,80
Berinjela	0,60	1,05	0,90
Tomate rasteiro	0,60	1,15	0,70
Tomate tutorado	0,60	1,20	0,90
c) Cucurbitáceas	0,50	1,00	0,80

Tabela 1 - Coeficientes de cultura simples (Kc) para climas subúmidos para uso com a evapotranspiração de referência de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998)

(continuação)

Cultura	K _c		
	Inicial	Meia-Estação	Final
Melancia	0,40	1,00	0,75
Melão	0,50	1,05	0,75
Pepino	0,60	1,15	0,75
Batata	0,50	1,15	0,75
Batata doce	0,50	1,15	0,65
Beterraba	0,50	1,05	0,95
Mandioca – ano 1	0,30	0,80	0,30
Mandioca – ano 2	0,30	1,10	0,50
e) Leguminosas	0,40	1,15	0,55
Amendoim	0,40	1,15	0,60
Ervilha fresca	0,50	1,15	1,10
Ervilha seca	0,50	1,15	0,30
Feijão seco	0,40	1,15	0,35
Feijão verde	0,50	1,05	0,90
Lentilha	0,40	1,10	0,30
Soja	0,50	1,15	0,50
f) Vegetais perenes (com dormência de inverno)	0,50	1,00	0,80
Alcachofra	0,50	1,00	0,95
Aspargo	0,50	0,95	0,30
Hortelã	0,60	1,15	1,10
Morango	0,40	0,85	0,75
g) Fibrosas			
Algodão	0,35	1,15	0,50
Linho	0,35	1,10	0,25
Sisal com estresse	0,35	0,40	0,40
Sisal sem estresse	0,35	0,70	0,70
h) Oleaginosas	0,35	1,15	0,35
Canola	0,35	1,15	0,35
Gergelim	0,35	1,10	0,25
Girassol	0,35	1,15	0,35
Mamona	0,35	1,15	0,55
i) Cereais	0,30	1,15	0,40
Arroz	1,05	1,20	0,90
Aveia	0,30	1,15	0,25
Cevada	0,30	1,15	0,25
Milho	0,30	1,20	0,35
Milho doce	0,30	1,15	1,05
Painço	0,30	1,00	0,30
Sorgo-grão	0,30	1,00	0,55
Trigo (Primavera)	0,30	1,15	0,25

Tabela 1 - Coeficientes de cultura simples (K_c) para climas subúmidos para uso com a evapotranspiração de referência de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998)

Cultura	K_c		
	Inicial	Meia-Estação	Final
Alfafa	0,40	1,20	1,15
Azevém	0,95	1,05	1,00
Gramma bermuda	0,55	1,00	0,85
Trevo	0,40	1,15	1,10
k) Cana-de-açúcar	0,40	1,25	0,75
l) Frutíferas e Plantas Tropicais			
Abacaxi (sem cobertura do solo)	0,50	0,30	0,30
Abacaxi (com cobertura de grama)	0,50	0,50	0,50
Banana – 1º ano	0,50	1,00	1,00
Banana – 2º ano	1,00	1,20	1,00
Cacau	1,00	1,05	1,05
Café (sem cobertura do solo)	0,90	0,95	0,95
Café (com cobertura de grama)	1,05	1,10	1,10
Chá (não sombreado)	0,95	1,00	1,00
Chá (sombreado)	1,10	1,15	1,15
Palmeiras	0,95	1,00	1,00
Seringueira	0,95	1,00	1,00
Tâmara	0,90	0,95	0,95
m) Uvas			
Uva para mesa	0,30	0,85	0,45
Uva para vinho	0,30	0,70	0,45
n) Frutíferas de climas subtropical e temperado			
Abacate (solo sem cobertura)	0,60	0,85	0,75
Amêndoa	0,40	0,90	0,65
Cereja, Maçã, Pêra	0,80	1,20	0,85
Citros (solo sem cobertura)			
• Cobertura de 70%	0,70	0,65	0,70
• Cobertura de 50%	0,65	0,60	0,65
• Cobertura de 20%	0,50	0,45	0,55
Citros (solo com cobertura)			
• Cobertura de 70%	0,75	0,70	0,75
• Cobertura de 50%	0,80	0,80	0,80
• Cobertura de 20%	0,85	0,85	0,85
Damasco, Pêssego	0,80	1,15	0,85
Kiwi	0,40	1,05	1,05
Nogueira (Nozes)	0,50	1,10	0,65
Oliveira	0,65	0,70	0,70
Pistache	0,40	1,10	0,45

3.3 Rotina de cálculo da Evapotranspiração de referencia – ET_0

O cálculo da evapotranspiração de referência será realizado para cada um dos projetos a ser desenvolvidos, ficando disponível o resultado durante o desenvolvimento do mesmo. Assim que iniciar um novo projeto a ET_0 deverá ser calculada novamente. Na Figura 5 tem-se o fluxograma desta rotina com os métodos utilizados e as variáveis necessárias em cada um deles. Entre os métodos para estimativa da ET_0 o método de Hargraves – Samani (1985) incorpora, além das temperaturas mínima, média e máxima do ar, a radiação solar recebida em uma superfície horizontal na parte externa da atmosfera. O fator de radiação considerado é função da latitude e do período do ano. A ET_0 pode ser obtida pela eq. (10):

$$ET_0 = Ra \cdot 0,408 \cdot \sqrt{0,0023 \cdot (T_{média} + 17,8)(T_{max} - T_{min})} \quad (10)$$

em que,

T_{med} , T_{max} e T_{min} – representam, respectivamente, as temperaturas média, máxima e mínima, em °C, e

Ra – radiação solar no topo da atmosfera ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), Tabela 2.

Figura 5 – Fluxograma da rotina de cálculo da Evapotranspiração de referencia – ET_0

Tabela 2 – Valores de Radiação solar no topo da atmosfera (Ra), em (MJ m⁻² d⁻¹) para diferentes latitudes Sul. (BERNARDO et al., 2009)

Lat.	Mês											
S	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
70	41,4	28,6	15,8	4,9	0,2	0,0	0,0	2,2	10,7	23,5	37,3	45,3
68	41,0	29,3	16,9	6,0	0,8	0,0	0,0	3,2	11,9	24,4	37,4	44,7
66	40,9	30,0	18,1	7,2	1,5	0,1	0,5	4,2	13,1	25,4	37,6	44,1
64	41,0	30,8	19,3	8,4	2,4	0,6	1,2	5,3	14,4	26,3	38,0	43,9
62	41,2	31,5	20,4	9,6	3,4	1,2	2,0	6,4	15,5	27,2	38,3	43,9
60	41,5	32,3	21,5	10,8	4,4	2,0	2,9	7,6	16,7	28,1	38,7	43,9
58	41,7	33,0	22,6	12,0	5,5	2,9	3,9	8,7	17,9	28,9	39,1	44,0
56	42,0	33,7	23,6	13,2	6,6	3,9	4,9	9,9	19,0	29,8	39,5	44,1
54	42,2	34,3	24,6	14,4	7,7	4,9	6,0	11,1	20,1	30,6	39,9	44,3
52	42,5	35,0	25,6	15,6	8,8	6,0	7,1	12,2	21,2	31,4	40,2	44,4
50	42,7	35,6	26,6	16,7	10,0	7,1	8,2	13,4	22,2	32,1	40,6	44,5
48	42,9	36,2	27,5	17,9	11,1	8,2	9,3	14,6	23,3	32,8	40,9	44,5
46	43,0	36,7	28,4	19,0	12,3	9,3	10,4	15,7	24,3	33,5	41,1	44,6
44	43,2	37,2	29,3	20,1	13,5	10,5	11,6	16,8	25,2	34,1	41,4	44,6
42	43,3	37,7	30,1	21,2	14,6	11,6	12,8	18,0	26,2	34,7	41,6	44,6
40	43,4	38,1	30,9	22,3	15,8	12,8	13,9	19,1	27,1	35,3	41,8	44,6
38	43,4	38,5	31,7	23,3	16,9	13,9	15,1	20,2	28,0	35,8	41,9	44,5
36	43,4	38,9	32,4	24,3	18,1	15,1	16,2	21,2	28,8	36,3	42,0	44,4
34	43,4	39,2	33,0	25,3	19,2	16,2	17,4	23,3	29,6	36,7	42,0	44,3
32	43,3	39,4	33,7	26,3	20,3	17,4	18,5	23,3	30,4	37,1	42,0	44,1
30	43,1	39,6	34,3	27,2	21,4	18,5	19,6	24,3	31,1	37,5	42,0	43,9
28	43,0	39,8	34,8	28,1	22,5	19,7	20,7	25,3	31,8	37,8	41,9	43,6
26	42,8	39,9	35,3	29,0	23,5	20,8	21,8	26,3	32,5	38,0	41,8	43,3
24	42,5	40,0	35,8	29,8	24,6	21,9	22,9	27,2	33,1	38,3	41,7	43,0
22	42,2	40,1	36,2	30,6	25,6	23,0	24,0	28,1	33,7	38,4	41,4	42,6
20	41,9	40,0	36,6	31,3	26,6	24,1	25,0	28,9	34,2	38,6	41,2	42,1
18	41,5	40,0	37,0	32,1	27,5	25,1	26,0	29,8	34,7	38,7	40,9	41,7
16	41,1	39,9	37,2	32,8	28,5	26,2	27,0	30,6	35,2	38,7	40,6	41,2
14	40,6	39,7	37,5	33,4	29,4	27,2	27,9	31,3	35,6	38,7	40,2	40,6
12	40,1	39,6	37,7	34,0	30,2	28,1	28,9	32,1	36,0	38,6	39,8	40,0
10	39,5	39,3	37,8	34,6	31,1	29,1	29,8	32,8	36,3	38,5	39,3	39,4
8	38,9	39,0	37,9	35,1	31,9	30,0	30,7	33,4	36,6	38,4	38,8	38,7
6	38,3	38,7	38,0	35,6	32,7	30,9	31,5	34,0	36,8	38,2	38,2	38,0
4	37,6	38,3	38,0	36,0	33,4	31,8	32,3	34,6	37,0	38,0	37,6	37,2
2	36,9	37,9	38,0	36,4	34,1	32,6	33,1	35,2	37,1	37,7	37,0	36,4
0	36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,6	35,6

O método de Blaney – Criddle – FAO foi desenvolvido relacionando os valores da evapotranspiração mensal com o produto da temperatura média mensal pela percentagem mensal de horas anuais de luz solar, o qual foi modificado pela FAO, incluindo ajustes climáticos locais, sendo calculada pela eq. (11):

$$ET_o = (0,457 \cdot T_{média} + 8,13) \cdot \frac{P}{100} \quad (11)$$

em que,

ET_o – evapotranspiração potencial de referencia, em mm/dia;

$T_{média}$ – temperatura média diária, em °C; e,

P – percentagem diária de horas anuais de luz solar, Tabela 3.

Tabela 3 - Percentagem diária de horas anuais de luz solar para diferentes latitudes(BROUWER; HEIBLOEM, 1986)

Lat.	North South	Jan July	Feb Aug	Mar Sept	Abr Oct	Mai Nov	Jun Dec	July Jan	Aug Feb	Sept Mar	Oct Apr	Nov May	Dec Jun
60°		15	20	26	32	38	41	40	34	28	22	17	13
55		17	21	26	32	36	39	38	33	28	23	18	16
50		19	23	27	31	34	36	35	32	28	24	20	18
45		20	23	27	30	34	35	34	32	28	24	21	20
40		22	24	27	30	32	34	33	31	28	25	22	21
35		23	25	27	29	31	32	32	30	28	25	23	22
30		24	25	27	29	31	32	31	30	28	26	24	23
25		24	26	27	29	30	31	31	29	28	26	25	24
20		25	26	27	28	29	30	30	29	28	26	25	25
15		26	26	27	28	29	29	29	28	28	27	26	25
10		26	27	27	28	28	29	29	28	28	27	26	26
5		27	27	27	28	28	28	28	28	28	27	27	27
0		27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27

O método de Penman-Monteith – FAO56 (ALLEN et al., 1998) é do tipo combinado e é reconhecida por muitos pesquisadores como padrão para estimativa da ET_o . Mas este método traz limitações, visto que são poucas as estações meteorológicas que fornecem todos os parâmetros necessários para o cálculo da ET_o (dados de radiação líquida total diária, fluxo de calor no solo, velocidade do vento), podendo esta, ser obtida pela eq. (12):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (12)$$

em que:

ET_o – Evapotranspiração de referência diária (mm/dia);

R_n – Saldo diário de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

G – Fluxo de calor no solo diário ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

T – Temperatura do ar a 2 m de altura (°C);

- U_2 – Velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1});
 e_s – Pressão da saturação do vapor (kPa);
 e_a – Pressão atual de vapor (kPa);
 $(e_s - e_a)$ – Déficit de pressão de vapor, (kPa)
 Δ – Declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); e
 γ – Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Inicialmente com os valores de $T_{\text{máx}}$ e T_{min} , inseridos pelo usuário, é determinado o valor da pressão de saturação de vapor, e_s , calculado da eq. (13)

$$e_s (\text{KPa}) = \frac{[e^\circ(T_{\text{max}}) + e^\circ(T_{\text{min}})]}{2} \quad (13)$$

Portanto, o valor de $e^\circ(T_{\text{max}})$ e $e^\circ(T_{\text{min}})$, será calculado pela eq. (14), a qual fornece a pressão de saturação de vapor para diferentes temperaturas (T , $^\circ\text{C}$), (BERNARDO et al., 2009)

$$e^\circ(T) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T}{T + 273,3} \right] \quad (14)$$

Com o valor da pressão de saturação de vapor pode-se, determinar o valor da pressão atual de vapor (e_a), o qual será derivado da umidade relativa média- UR_m (%), sendo determinado pela eq. (15).

$$e_a = e_s \cdot \frac{UR_m}{100} \quad (15)$$

Com os valores de e_s e e_a determinados é possível conhecer o valor do déficit de pressão de vapor ($e_s - e_a$), componente da formula da ETo.

Em seguida, para determinar o valor do saldo de radiação à superfície deverá se determinar, inicialmente, o valor da radiação solar no topo da atmosfera, sendo determinado da Tabela 2, precisando assim, dos dados de latitude e data que serão fornecidos pelo usuário. Posteriormente será selecionada a duração máxima possível da insolação ou da luz no dia (N) da Tabela 4, e com o valor de n (insolação) dado pelo usuário, determina-se o valor da

Com o valor de Rs pode-se determinar o valor da radiação solar em um dia claro sem nuvens (R_{so}) pela eq. (17),

$$R_{so} (MJ m^{-2} d^{-1}) = \left[0,75 + 2 \cdot \frac{Altitude}{100.000} \right] \cdot Ra \quad (17)$$

Conhecendo os valores de Rs e R_{so} é possível determinar, com o quociente desses valores (R_s/R_{so}), o valor da radiação relativa de onda curta, para assim, seguidamente, poder calcular o valor da radiação líquida (R_{ns}) pela eq. (18).

$$R_{ns} (MJ m^{-2} d^{-1}) = 0,77 \cdot R_s \quad (18)$$

Posteriormente, para determinar o valor do saldo diário de radiação deverá se calcular, inicialmente, o valor da constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma \cdot T_K^4$), Tabela 5, para as temperaturas máxima e mínima. Com esses valores selecionados é possível calcular o valor da radiação líquida de onda longa (R_{nl}) pela eq. (19)

$$R_{nl} (MJ m^{-2} d^{-1}) = \left[(\sigma \cdot T_{\max K}^4 + \sigma \cdot T_{\min K}^4) / 2 \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) (1,35 R_s / R_{so} - 0,35) \quad (19)$$

Com essas variáveis determinadas será calculado o saldo diário de radiação ($MJ m^{-2} d^{-1}$) através da eq. (20)

$$R_n (MJ m^{-2} d^{-1}) = R_{ns} - R_{nl} \quad (20)$$

Tabela 5 - Valores de $\sigma \cdot T_K^4$ (Lei de Stefan-Boltzmann) para diferentes temperaturas (T) (BERNARDO et al., 2009) (continua)

T (°C)	$\sigma \cdot T_K^4$ (MJ m ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	$\sigma \cdot T_K^4$ (MJ m ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	$\sigma \cdot T_K^4$ (MJ m ⁻² d ⁻¹)
1,0	27,70	17,0	34,75	33,0	43,08
1,5	27,90	17,5	34,99	33,5	43,36
2,0	28,11	18,0	35,24	34,0	43,64
2,5	28,31	18,5	35,48	34,5	43,93
3,0	28,52	19,0	35,72	35,0	44,21
3,5	28,72	19,5	35,97	35,5	44,50
4,0	28,93	20,0	36,21	36,0	44,79
4,5	29,14	20,5	36,46	36,5	45,08

Tabela 5 - Valores de $\sigma \cdot T_K^4$ (Lei de Stefan-Boltzmann) para diferentes temperaturas (T) (BERNARDO et al., 2009)

(conclusão)					
T (°C)	$\sigma \cdot T_K^4$ (MJ m ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	$\sigma \cdot T_K^4$ (MJ m ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	$\sigma \cdot T_K^4$ (MJ m ⁻² d ⁻¹)
5,0	29,35	21,0	36,71	37,0	45,37
6,0	29,78	22,0	37,21	38,0	45,96
6,5	29,99	22,5	37,47	38,5	46,26
7,0	30,21	23,0	37,72	39,0	46,56
7,5	30,42	23,5	37,98	39,5	46,85
8,0	30,64	24,0	38,23	40,0	47,15
8,5	30,86	24,5	38,49	40,5	47,46
9,0	31,08	25,0	38,75	41,0	47,76
9,5	31,30	25,5	39,01	41,5	48,06
10,0	31,52	26,0	39,27	42,0	48,37
10,5	31,74	26,5	39,53	42,5	48,68
11,0	31,97	27,0	39,80	43,0	48,99
11,5	32,19	27,5	40,06	43,5	49,30
12,0	32,42	28,0	40,33	44,0	49,61
12,5	32,65	28,5	40,60	44,5	49,92
13,0	32,88	29,0	40,87	45,0	50,24
13,5	33,11	29,5	41,14	45,5	50,56
14,0	33,34	30,0	41,41	46,0	50,87
14,5	33,57	30,5	41,69	46,5	51,19
15,0	33,81	31,0	41,96	47,0	51,51
15,5	34,04	31,5	42,24	47,5	51,84
16,0	34,28	32,0	42,52	48,0	52,16
16,5	34,52	32,5	42,80	48,5	52,49

Posteriormente, é calculado o valor da declividade da curva de pressão de vapor de saturação (Δ), com a eq. (21).

$$\Delta(kPa \text{ } ^\circ C^{-1}) = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27T}{T + 237,3} \right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (21)$$

O valor da pressão atmosférica (P), para a altitude do local, informado pelo usuário, é calculado com a eq. (22) e a constante psicrométrica (γ) pela eq. (23).

$$P(kPa) = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right)^{5,26} \quad (22)$$

$$\gamma(\text{kPa} / ^\circ\text{C}) = 0,665 \times 10^{-3} \cdot P \quad (23)$$

Para o cálculo de ET_O a única variável da eq. (10) faltante seria o valor do fluxo de calor do solo (G), sendo a energia que é utilizada para aquecer o solo. G tem valores positivos quando o solo é aquecido e valores negativos quando é esfriado. Embora o fluxo calórico do solo seja pequeno, comparado com o R_n e, em certas ocasiões pode até não ser considerado, a quantidade de energia ganhada ou perdida pelo solo neste processo, teoricamente deverá ser acrescentada ou diminuída do valor de R_n para determinar a evapotranspiração.

3.4 Rotina de cálculo da porcentagem de área umedecida – P_W

A P_W depende do espaçamento entre emissores, da vazão dos mesmos, do tempo ou volume da irrigação e do tipo de solo, principalmente da condutividade hidráulica do solo. Na determinação do valor de P_W , como mostrado na rotina para o cálculo da P_W (Figura 6), têm-se dois casos a considerar. Primeiro, quando se irriga uma faixa contínua do solo, o que é mais comum na irrigação por gotejamento, e o segundo quando se irriga por árvore, ou seja, não se formará uma faixa molhada contínua, mas sim bulbos molhados ou áreas molhadas. Não existe, de tal modo, um critério de aplicação da percentagem de área molhada; vários autores relatam que um critério adequado é $30\% < P_W < 60\%$, isto dependendo do tipo de solo local onde está implantada a cultura.

No caso de irrigação por árvore, podem-se ter sistemas com um ou mais emissores por planta, no qual se pode ter uma ou duas linhas laterais, assim a estimativa da área molhada poderá ser determinada pela eq. (24). Desta mesma equação, conhecendo-se o valor de P_W , pode-se estimar o número de gotejadores por planta (N_P).

$$P_W = N_P \cdot \frac{\pi \cdot D_W^2}{4 \cdot S_P \cdot S_R} \cdot 100 \quad (24)$$

em que,

P_W – Porcentagem máxima de área molhada pelo gotejador, %;

N_P – Número de gotejadores por planta;

D_W – Máximo diâmetro molhado pelo gotejador, m;

S_R – Espaçamento entre fileiras de plantas, m;

S_P – Espaçamento entre plantas na fileira, m.

Sendo D_w determinado pela eq. (25), conforme proposto por Schwartzman e Zur, 1986.

$$D_w = 1,32 \cdot Z^{0,35} \left(\frac{q}{k_0} \right)^{0,33} \cong 1,32 \left(\frac{Z \cdot q}{k_0} \right)^{1/3} \quad (25)$$

Figura 6 - Fluxograma da rotina de cálculo da área umedecida – P_w

No caso de irrigação para formar faixa molhada continua o espaçamento entre gotejadores (Se) deve ser no máximo duas vezes o raio molhado saturado ($2.R_w$), calculado pela eq. (26), contudo o valor de P_w , neste caso de disposição do sistema, será determinado pela eq. (27).

$$R_w = \sqrt{\frac{4}{\alpha^2 \pi^2} + \frac{q}{\pi K_o}} - \frac{2}{\alpha \pi} \quad (26)$$

em que,

K_o – Condutividade hidráulica do solo saturado, cm h^{-1} ;

α – Parâmetro do modelo exponencial para a condutividade hidráulica do solo não saturado.

$$P_w = \frac{A_w}{A_p} 100 \quad (27)$$

em que,

A_W – Área umedecida = $S_P \times S_W$ (Faixa Umedecida); m^2 ;

A_P – Área ocupada pela planta = $S_P \times S_R$, m^2 .

3.5 Rotina de cálculo da porcentagem de área sombreada – P_S

A porcentagem de área sombreada pela planta, expressa a relação entre a área sombreada pela planta (A_S) e a área total ocupada por esta mesma planta (A_P), e calculada com base na rotina mostrada na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma da rotina de cálculo da porcentagem de área sombreada – P_S

Este parâmetro será utilizado para a determinação do coeficiente de localização (K_L). Na determinação de P_S existem dois casos a se considerar, o primeiro quando se tem uma faixa sombreada pela planta (S_S), determinado pela eq. (28), e o segundo quando se tem o diâmetro da projeção da copa da planta (D_{CO}), determinado pela eq. (29).

$$P_S = \frac{S_S}{S_R} \quad (28)$$

$$P_S = \frac{\pi \cdot \frac{D_{CO}^2}{4}}{S_R \cdot S_P} \quad (29)$$

3.6 Rotina para o cálculo da evapotranspiração da cultura – ET_C

Para a determinação da ET_C em irrigação localizada (Figura 8), é necessário fazer uma correção na evapotranspiração da cultura determinada para os demais sistemas de irrigação. No método de irrigação localizada a aplicação de água é feita de forma pontual, não sendo irrigada toda a área, promovendo uma redução da evapotranspiração. A redução da evapotranspiração se dá em função do decréscimo da evaporação pela percentagem de área molhada e pelo sombreamento da cultura. Alguns pesquisadores desenvolveram coeficientes de localização (K_L) para ajustar a evapotranspiração gerada a partir da irrigação total em evapotranspiração promovida a partir de irrigação pontual, destacando-se os modelos de Keller (1978), Fereres (1981) e Keller e Bliesner (1990), apresentados por Bernardo, Soares e Mantovani (2009) para a determinação de K_L .

Keller (1978)

$$K_L = P + 0,15 \cdot (1 - P) \quad (30)$$

Bernardo (1996)

$$K_L = P/100 \quad (31)$$

Fereres (1981)

$$\text{Se, } P \geq 65\% \rightarrow K_L = 1,0 \quad (32)$$

$$\text{Se, } 20\% < P < 65\% \rightarrow K_L = 1,09 \cdot P + 0,30 \quad (33)$$

$$\text{Se, } P \leq 20\% \rightarrow K_L = 1,94 \cdot P + 0,1 \quad (34)$$

Keller e Bliesner (1990)

$$K_L = 0,10 \sqrt{P} \quad (35)$$

Em todas as equações, P representa o valor da percentagem de área sombreada ou molhada, em decimal, prevalecendo o maior valor, entretanto, as eq.s (30) e (31), têm sido mais utilizadas para culturas com plantios mais adensados, como olerícolas e café em sistema de colheita manual. As eq.s (32), (33) e (34), são recomendadas para culturas com maior espaçamento, como fruteiras e café em sistemas de colheita mecanizada.

Estes métodos supõem que a evapotranspiração na área sombreada se comporta quase igual à evapotranspiração da superfície de um solo sob irrigação convencional, enquanto a área não sombreada perde água com uma intensidade muito menor.

Figura 8 -Fluxograma da rotina do cálculo da evapotranspiração da cultura – ET_c

3.7 Rotina de cálculo da irrigação real necessária - IRN

Nesta rotina, Figura 9, é calculada a irrigação real necessária à cultura, a vazão mínima continua do projeto e o turno de rega, para cálculos hidráulicos, com dados fornecidos pelo usuário de clima, cultura e solo. Assim, será possível conhecer igualmente a lâmina líquida e lâmina bruta da subunidade, o número de emissores por planta, a percentagem de área molhada em função da disposição do sistema em campo e os requerimentos da cultura.

Figura 9 – Fluxograma de cálculo da irrigação real necessária - IRN

Portanto, inicialmente será calculada a capacidade total de água disponível no solo (CAD), com os dados inseridos pelo usuário referente aos teores de umidade, correspondentes à capacidade de campo (θ_{cc}) e ao ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), assim como, a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura e a densidade do solo, sendo que a CAD é obtida pela eq. (36):

$$CAD = 1000(\theta_{cc} - \theta_{pmp})z \quad (36)$$

em que θ_{cc} é a umidade do solo na capacidade de campo, em $m^3 \cdot m^{-3}$; θ_{pmp} é a umidade do solo no ponto de murcha permanente, em $m^3 \cdot m^{-3}$ e z é a profundidade efetiva do sistema radicular, em m.

Considerando que o sistema de irrigação vai operar para suprir a necessidade de água da planta, é preciso conhecer a irrigação real necessária (IRN) e, portanto, considerar dois casos típicos: suprir essa necessidade com irrigação total ou com irrigação suplementar. No primeiro caso a IRN é determinada pela eq. (37), e neste caso a irrigação vai suprir o total dos requerimentos hídricos da cultura. No caso da IRN suplementar, determinada pela eq. (38), só parte da água necessária à cultura será suprida pela irrigação.

$$IRN = CAD \cdot f \quad (37)$$

$$IRN = (CAD \cdot f) - Pe \quad (38)$$

em que Pe é a precipitação efetiva (mm), f é o fator de depleção ou de consumo da água do solo, adimensional, sempre menor do que 1, com valores entre 0,3, para culturas com sistemas radicular rasos e altas taxas de demanda atmosférica e, 0,7, para plantas com sistemas radicular profundo e baixas taxas de demanda atmosférica, portanto específico para cada cultura, como mostrado na Tabela 6. Este fator representa a fração da CAD que a planta pode consumir antes das irrigações sem que ocorram prejuízos ao desenvolvimento e produção das culturas. Os valores apresentados na Tabela 6 foram sugeridos para irrigações sem estresse hídrico e ET_C de aproximadamente 5 mm dia^{-1} (ALLEN et al., 1998).

Segundo Frizzone et al. (2012), para outros valores de ET_C , o valor de f pode ser ajustado pela eq. (39).

$$f = f_{tab} + 0,04 (5 - ETc) \quad (39)$$

sendo f_{tab} o valor de f apresentado na Tabela 6.

Como na microirrigação só uma fração da área cultivada é umedecida é preciso conhecer essa fração que o sistema irá umedecer, para assim, determinar a máxima irrigação real necessária dada pela seguinte equação:

$$IRN_{máx} = CAD \times f \times F_w \quad (40)$$

em que F_w é a fração de área total umedecida, adimensional.

Tabela 6 – Fator de depleção de água no solo (f) para fins de irrigação sem estresse hídrico e evapotranspiração de 5 mm d⁻¹ (ALLEN et al., 1998) (continua)

Cultura	Fator f	Cultura	Fator f
(A) Hortaliças pequeno porte		(F) Hortaliças Perenes	
Brócoli	0,45	Alcachofra	0,45
Couve-de Bruxelas	0,45	Aspargos	0,45
Repolho	0,45	Hortelã	0,40
Cenoura	0,35	Morango	0,20
Couve-flor	0,45	(G) Plantas Fibrosas	
Aipo	0,20	Algodão	0,65
Alface	0,30	(H) Plantas oleaginosas	
Cebola-seca	0,30	Mamona	0,50
Cebola-semente	0,35	Canola	0,60
Espinafre	0,20	Gergelim	0,60
Rabanete	0,30	Girassol	0,45
(B) Hortaliças – Solanáceas		(I) Cereais	
Berinjela	0,45	Cevada	0,55
Pimentão	0,30	Aveia	0,55
Tomate	0,40	Trigo	0,55
(C) Hortaliças – Curcubitáceas		Milho	0,55
Melão Cantalupe	0,45	Milheto	0,55
Pepino	0,50	Sorgo-grão	0,55
Abóbora	0,35	Arroz	0,20
Abobrinha	0,50	(J) Plantas forrageiras	
Melão	0,40	Pasto	0,60
Melancia	0,40	Gramado estação fria	0,40
(D) Raízes e Tubérculos		Gramado estação quente	0,50
Mandioca – 1º ano	0,35	(K) Cana-de-açúcar	
Mandioca – 2º ano	0,40	(L) Frutas tropicais e Árvores	
Beterraba	0,50	Banana	0,35

Tabela 6 – Fator de depleção de água no solo (f) para fins de irrigação sem estresse hídrico e evapotranspiração de 5 mm d⁻¹ (ALLEN et al., 1998)

		(conclusão)	
Cultura	Fator f	Cultura	Fator f
Batata	0,35	Cacau	0,30
Batata doce	0,65	Café	0,40
Nabo	0,50	Palmáceas	0,65
(E) Leguminosas		Abacaxi	0,50
Feijão vagem	0,45	Chá sem sombreamento	0,40
Feijão	0,45	Chá sombreado	0,45
Feijão mungo e feijão caupi	0,45	(M) Uva	
Grão-de-bico	0,50	Uva de mesa ou passa	0,35
Amendoim	0,50	Uva para vinho	0,45
Lentilha	0,50	(M) Árvores frutíferas	
Ervilha fresca	0,35	Maçã, cereja, pera, pêssego e citros.	0,50
Ervilha seca	0,40	Abacate	0,70
Soja	0,50	Kiwi	0,35

3.8 Rotina do cálculo da Irrigação Total Necessária – ITN

Para o cálculo da ITN, como mostrado na Figura 10, muitas vezes chamada de lâmina bruta de irrigação, no projeto de irrigação localizada por gotejamento, se deverão levar em conta as seguintes considerações. Primeiro, as perdas neste sistema poderão ser só por percolação abaixo da zona radicular. Segundo, EA = ED, pois, considera-se que as perdas de água por evaporação e deriva são insignificantes. Terceiro, a eficiência de aplicação potencial (EAP) é considerada 100%. (FRIZZONE et al., 2012).

Figura 10 – Fluxograma da rotina do cálculo da Irrigação Total Necessária – ITN

Portanto, para realização do cálculo de ITN, como mostrado na Figura 10, será por meio das eq.s (41) e (42), as quais representam dois casos a se considerar neste procedimento de cálculo, (a) sendo as perdas de água por percolação, ou seja, que não existe a necessidade de aplicar uma lâmina adicional para percolação dos sais sendo que as perdas por percolação serão suficientes para promover esta lavagem, e, (b) quando as perdas por percolação, $(1 - ED) < FL$, são insignificantes e a lâmina de água percolada é inferior à lâmina de água necessária para satisfazer a lixiviação.

$$ITN = \frac{IRN}{EAP \times UE} \quad (41)$$

$$ITN = \frac{IRN}{(1 - FL) \times EAP \times UE} \quad (42)$$

em que

FL – representa a mínima fração de lixiviação a ser adotada para controlar a salinidade ao nível de tolerância da cultura.

UE – Uniformidade de Emissão do sistema.

Assim, para determinar o valor da variável FL, será utilizada a eq. (43) com auxílio da Tabela 7, que apresenta os valores da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CE_e) para várias culturas.

$$FL = \frac{CE_i}{2 (\text{máx } CE_e)} \quad (43)$$

Em que,

CE_i – condutividade elétrica da água de irrigação, $dS\ m^{-1}$ (mmhos cm^{-1}), e

CE_e – condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, $dS\ m^{-1}$ (mmhos cm^{-1}).

No intuito do programa fornecer as variáveis a serem utilizadas nos cálculos, o usuário, poderá determinar a CE_i como sendo a seguinte relação, $CE_i \leq (\text{máx}CE_e + \text{mín}CE_e)/2$, informação que será apresentada no programa.

Tabela 7 - Valores máximos e mínimos da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CE_e) para várias culturas (SCALOPPI e BRITO, 1986; KELLER e BLIESNER, 1990).

CULTURA	CE_e (dS m ⁻¹)		CULTURA	CE_e (dS m ⁻¹)	
	¹ mín	² máx		mín	máx
Extensivas			Nabo	0,9	12,0
Algodoeiro	7,7	27,0	Pepino	2,5	10,0
Amendoim	3,2	6,5	Pimentão	1,5	8,5
Beterraba açucareira	7,0	24,0	Tomate	2,5	12,5
Cana-de-açúcar	1,7	19,0	Repolho	1,8	12,0
Cevada	8,0	28,0	Frutíferas		
Feijoeiro comum	1,0	6,5	Abacateiro	1,3	6,0
Milho	1,7	10,0	Ameixeira	1,5	7,0
Soja	5,0	10,0	Coqueiro	4,0	32,0
Sorgo	4,0	18,0	Damasco	1,6	6,0
Trigo	6,0	20,0	Figueira	2,7	14,0
Olerícolas			Framboeseira	1,5	6,0
Abóbora	2,5	10,0	Laranjeira	1,7	8,0
Alface	1,3	4,0	Limão	1,7	8,0
Batata	1,7	10,0	Macieira	1,7	8,0
Batata-doce	1,5	10,5	Morangueiro	1,0	4,0
Beterraba	4,0	15,0	Oliveira	2,7	14,0
Brócoli	2,8	13,5	Pereira	1,7	8,0
Cebola	1,2	7,2	Pessegueiro	1,3	6,0
Cenoura	1,0	8,0	Pomeleiro	1,8	8,0
Couve	1,8	12,0	Videira	1,5	12,0
Espinafre	2,0	15,0			
Melão Cantaloupe	2,2	16,0			

¹min CE_e – condutividade elétrica do extrato do solo saturado que não causa decréscimo na produtividade;

²máx CE_e – condutividade elétrica do extrato do solo saturado que reduz a produtividade para zero.

Baseado na determinação da ITN, posteriormente, pode-se calcular o valor do turno de rega máximo ($TR_{máx}$) ou intervalo entre irrigações, sendo obtido pela razão entre a máxima lâmina líquida de irrigação e a evapotranspiração calculada da cultura, como mostrado na eq. (44).

$$TR_{máx} = INT \left(\frac{IRN_{máx}}{ET_C \cdot S_P \cdot S_R} \right) \quad (44)$$

em que TR é o Turno de Rega (dias); $IRN_{máx}$ é a Irrigação Real Necessária máxima (mm) e ET_C é a evapotranspiração da cultura calculada. O termo INT indica que o valor de $TR_{máx}$ será

o menor inteiro mais próximo ao valor calculado, o qual será limite do $TR_{\text{máx}}$ para o cálculo hidráulico.

O tempo de irrigação (TI) pode ser determinado com base nas equações anteriormente descritas, o que resultaria:

$$TI = \frac{ITN \cdot S_p \cdot S_R}{Np \cdot q_a} \quad (45)$$

em que q_a é a vazão média do emissor ($L \cdot h^{-1}$)

É conveniente que o tempo de irrigação (TI) seja um submúltiplo do tempo de operação do sistema no dia, podendo assim, configurar o sistema para trabalhar continuamente sem tempo ou intervalos ociosos, permitindo por sua vez, projetar o número de subunidades e o tempo de irrigação de cada uma destas.

Para iniciar a execução na rotina do cálculo do comprimento máximo da linha lateral será necessário conhecer o tipo de emissor e a quantidade de emissores por planta que será utilizado no sistema, eq. (46).

$$Np = \frac{4 \cdot Sp \cdot S_R \cdot Pw}{\pi \cdot D_w^2 \cdot 100} \quad (46)$$

Sendo o resultado do número de emissores por planta um número inteiro, e para garantir as necessidades hídricas da cultura será o número inteiro maior mais próximo do resultado obtido na equação anterior.

3.9 Rotina do dimensionamento da linha lateral

Para o dimensionamento da linha lateral da subunidade, será calculado o comprimento máximo desta utilizando como rotinas de cálculo o método trecho a trecho e o método hidráulico. Para isto, serão utilizados dados referentes ao emissor selecionado e as características da linha lateral a ser utilizada no dimensionamento, (Figura 11).

Como critério de projeto será utilizada a variação máxima da carga de pressão na subunidade ($\Delta H_{(s)}$), que será determinada por um dos dois critérios solicitados como dados

de entrada, sendo, a variação de vazão dos emissores causada pela variação da carga de pressão (q_{var} , %) ou pela variação máxima de pressão dos emissores na lateral (H_{var} , %).

Figura 11 – Fluxograma da rotina de dimensionamento da linha lateral

3.9.1 Cálculo do comprimento máximo da lateral pelo método trecho a trecho

Neste método, calcula-se o comprimento máximo partindo do final para o início da linha lateral. No primeiro trecho, distância entre o último e o penúltimo emissor, conhecendo-se a pressão deste último, sua vazão e o diâmetro interno da linha lateral, o modelo calcula a perda de carga. Deste modo, a pressão no penúltimo emissor é o somatório da pressão do último emissor com a perda de carga calculada no trecho, mais a componente de desnível do trecho, positiva quando o desnível em aclave e negativa quando o desnível do trecho em declive.

No cálculo do trecho seguinte, entre o penúltimo e o antepenúltimo emissor, com a pressão do penúltimo emissor, calcula-se novamente a vazão. A perda de carga no trecho em estudo deve levar em conta a vazão acumulada, ou seja, a soma das vazões dos trechos, do último ao penúltimo e do penúltimo ao antepenúltimo emissor. Os trechos restantes da linha lateral seguem o mesmo raciocínio de cálculo.

O comprimento máximo da linha lateral é encontrado quando a diferença de pressão entre o último emissor e o emissor na posição atual for menor ou igual à máxima variação de pressão admitida na tubulação lateral. O comprimento máximo da linha lateral será a soma dos comprimentos dos trechos acumulados.

Inicialmente é calculado o número de Reynolds (R), como apresentado na eq. (47).

$$R = \frac{VD}{\nu} \quad (47)$$

em que R é o número de Reynolds (adimensional); V é a velocidade média do escoamento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); D o diâmetro da tubulação (m) e ν é a viscosidade cinemática do fluido, sendo para água a 20°C , igual a $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

Seguidamente é calculado o fator de atrito f o qual pode ser determinado através de equações matemáticas, uma para cada regime de escoamento que ocorrer na linha. Isto permite uma seleção mais adequada dos diâmetros dos tubos e da energia requerida pelo sistema.

Para escoamento em regime laminar, $R < 2000$, utiliza-se a fórmula de Hagen-Poiseuille para o cálculo de f , como se mostra a seguir na eq. (48).

$$f = \frac{64}{R} \quad (48)$$

No escoamento turbulento uniforme em tubos comerciais rugosos, a equação de Colebrook-White é a mais utilizada para calcular f (PORTO, 1988; ROMEO et al., 2002; YOO; SINGH, 2005; SONNAD; GOUDAR, 2006), sendo válida para $2000 < R < 10^8$ e $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$. Esta equação relaciona o fator de atrito com a rugosidade relativa e com o número de Reynolds conforme a equação (3), sendo ε a altura média das rugosidades do tubo (m). Esta equação também é válida para o caso limite de tubos lisos ($\varepsilon = 0$) e escoamento completamente turbulento. Entretanto, a exatidão do método de Colebrook-White é questionada por muitos pesquisadores. Bernuth (1990) cita que este método é ineficiente para o cálculo da perda de carga em tubos plásticos de pequenos diâmetros.

No regime de escoamento turbulento em tubos lisos, $3000 < R < 10^5$, o fator de atrito f é calculado pela formula de Blasius, eq. (49).

$$f = \frac{c}{R^m} \quad (49)$$

em quem m uma constante de valor igual a 0,25, enquanto que o coeficiente c seria outra constante de valor igual a 0,316.

De acordo com Alves e Porto (2002) e Bernuth (1990), a equação de Blasius é válida para tubos lisos desde que Reynolds não ultrapasse 10^5 . Quando R é muito elevado, a precisão é reduzida, pois o fator de atrito se aproxima de zero. Quando o $R < 4 \times 10^3$, em regime laminar ou zonas críticas, a equação de Blasius superestima f .

Para o escoamento na zona de transição, $2000 < R < 3000$, o f pode ser aproximado por um valor constante, igual a 0,04 (YITAYEW, 2009).

Posteriormente, para determinar a perda de carga total na linha lateral utilizou-se a eq. (50):

$$h_F = 2,8287 \times 10^{-4} Q^{1,75} D^{-4,75} L \lambda \quad (50)$$

em que, Q é a vazão (m^3h^{-1}), D é o diâmetro interno da tubulação (m), L o comprimento da linha lateral (m) e λ um fator que usa o conceito de comprimento

equivalente para representar as perdas localizadas de carga nas conexões emissor-lateral, definido pela eq. (51)

$$\lambda = \frac{Le + Se}{Se} \quad (51)$$

Ou de uma forma geral, a perda de carga num trecho qualquer a partir do início da tubulação lateral é:

$$hf_l = \left[1 - \left(1 - \frac{l}{L} \right)^{m+1} \right] \cdot Hf \quad (52)$$

sendo,

$$Hf = \frac{K}{Se^m \cdot (m+1)} \cdot q_n^m \cdot L^m \quad (53)$$

Sendo:

$$K = \frac{7,793 \times 10^{-4} \cdot \lambda}{D^{4,75}} \quad (54)$$

3.9.2 Cálculo do comprimento máximo da lateral pelo método da aproximação hidráulica.

Na determinação do comprimento máximo da linha lateral, o importante inicialmente é encontrar o tipo de perfil de carga de pressão que possui a linha lateral, e assim, utilizar a equação apropriada no procedimento de cálculo (GILLESPIE; PHILLIPS; WU, 1979).

A metodologia proposta por Gillespie, Phillips e Wu (1979), em que derivaram expressões matemáticas para auxiliar no dimensionamento de linhas laterais, é aplicável para condições de topografia uniforme ao longo da linha lateral. O método desenvolvido pelos autores permite o cálculo do comprimento máximo da tubulação lateral em condições do terreno em nível, alicive ou declive.

Figura 12 - Perfis de pressão em linhas laterais

A forma do perfil de pressão (Figura 12) depende da pressão de entrada na tubulação lateral, da perda de carga e da variação de energia total devido ao desnível. Portanto, há cinco tipos de perfil de pressão

Perfil Tipo I

Ocorre quando a linha lateral está em nível ou em aclave. A energia de pressão é perdida pela elevação do terreno, em caso de aclave, e pela perda de carga na tubulação. A pressão decresce em relação ao comprimento da tubulação e a pressão máxima ($H_{máx}$) ocorre no início da linha e a pressão mínima ($H_{mín}$) no final.

Na determinação do comprimento máximo da linha lateral, neste tipo de perfil, utiliza-se a seguinte equação:

$$L = \frac{(H \cdot H_{var})}{J' + S_o} \quad (55)$$

sendo,

$$J' = k' \cdot L^{1,75} \quad (56)$$

$$K' = \frac{K}{S_e^{1,75}} \left(\frac{-}{q} \right)^{1,75} \quad (57)$$

em que L é o comprimento máximo da lateral (m); H é a pressão de entrada na linha lateral (m.c.a.); H_{var} é a variação máxima de pressão entre os emissores (decimal), So é a declividade do terreno (adimensional) e q a vazão média do emissor (m^3s^{-1})

Substituindo a eq. (56) na eq. (55) tem-se que, de forma geral, o comprimento máximo da linha lateral pode ser definido da seguinte equação:

$$L = \frac{(H \cdot H_{var})}{k' \cdot L^{1,75} + So} \quad (58)$$

A solução desta equação será por métodos iterativos, já que o comprimento L faz parte dos dois termos da equação apresentada.

Perfil Tipo II-a

Ocorre quando a linha lateral está em desnível, em que o ganho de energia de pressão pela declividade do terreno é maior que a energia dissipada por perda de carga, mas, a pressão no fim da tubulação é, ainda, menor que a pressão no início da tubulação. H_{max} ocorre no início e H_{min} em algum ponto ao longo da linha. O declive neste caso pode ser considerado fraco.

Para determinar que a linha lateral faça parte deste tipo de perfil, deve-se cumprir a seguinte condição de ocorrência:

$$0 < \frac{So}{k' \cdot L^{1,75}} < 1 \quad (59)$$

Dessa forma, o comprimento máximo da linha lateral será calculado pelas seguintes equações:

$$L = \frac{H \cdot H \text{ var}}{\left[1 - \left(1 - \frac{\ell}{L} \right)^{2,75} \right] \cdot k' \cdot L^{1,75} - \frac{\ell}{L} \cdot S_0} \quad (60)$$

onde,

$$\frac{\ell}{L} = 1 - 0,56098 \left[\frac{S_0}{k' \cdot L^{1,75}} \right]^{0,57143} \quad (61)$$

Do mesmo modo, a solução desta equação será por métodos iterativos, já que o comprimento L faz parte dos dois termos da equação apresentada.

Perfil Tipo II-b

Igual ao perfil IIa mas, o perfil é tal que a pressão no final é igual à pressão de entrada na linha lateral. $H_{\text{máx}}$ ocorre no início e no final da linha e H_{min} está localizada em algum ponto próximo a seção média da linha. Neste caso o declive pode ser considerado moderado.

Para determinar se a linha lateral faça parte deste tipo de perfil, o terreno deve estar em declive e que atenda a seguinte condição de ocorrência:

$$\frac{k' \cdot L^{1,75}}{S_0} = 1 \quad (62)$$

Por conseguinte, o comprimento máximo da linha lateral neste tipo de perfil de pressão será dado pela seguinte equação:

$$L = \frac{H \cdot H \text{ var}}{0,357 \cdot S_0} \quad (63)$$

Perfil Tipo II-c

Ocorre quando o declive na linha é tão excessivo que a pressão no final da linha é maior que a pressão na entrada. Nestas condições, $H_{\text{máx}}$ ocorre no final da linha e H_{min} em algum ponto da linha. Neste caso o declive pode ser considerado como forte.

Para garantir que a linha lateral faça parte deste tipo de perfil, o terreno deve estar em declive e que atenda a seguinte condição de ocorrência:

$$1 < \frac{S_0}{k' \cdot L^{1,75}} < 2,75 \quad (64)$$

Desse modo, o comprimento máximo da linha lateral neste tipo de perfil de pressão será dado pela seguinte equação:

$$L = \frac{H \cdot H_{\text{var}}}{S_0 - k' \cdot L^{1,75} - \frac{\ell}{L} \cdot S_0 + \left[1 - \left(1 - \frac{\ell}{L} \right)^{2,75} \right] \cdot k' \cdot L^m - H_{\text{var}}(S_0 - k' \cdot L^{1,75})} \quad (65)$$

A solução desta equação será por métodos iterativos, sendo que L faz parte dos dois termos da equação apresentada.

Perfil Tipo II-d

Ocorre quando a linha lateral está em condições excessivas de declive, no qual a energia ganha pelo desnível é maior que a perda de carga na linha, em todas as seções ao longo da linha. Nestas condições, $H_{\text{máx}}$ ocorre no final da linha e H_{min} está localizada no início da linha. Neste caso o declive é considerado muito forte.

Para garantir que a linha lateral faça parte deste tipo de perfil, o terreno deve estar em declive e que atenda a seguinte condição de ocorrência:

$$\frac{S_0}{k' \cdot L^{1,75}} \geq 2,75 \quad (66)$$

Assim, o comprimento máximo da linha lateral neste tipo de perfil de pressão será dado pela seguinte equação:

$$L = \frac{H \cdot H_{var}}{(S_0 - k' \cdot L^{1,75})(1 - H_{var})} \quad (67)$$

O procedimento para o cálculo do comprimento máximo da linha lateral em declive foi iniciado calculando-se o comprimento pela eq. (61) e eq. (62), ou seja, para a condição de pressão do perfil tipo IIa. Encontrado o valor de L verifica-se a condição de ocorrência pela eq. (60). Caso se cumpra a condição de ocorrência é apresentado o comprimento L obtido no cálculo. Caso contrário, isto é, não se cumprindo a condição de ocorrência proposta pela eq. (60) será calculado o comprimento máximo da linha lateral pela eq. (64) e verifica-se novamente a condição imposta pela eq. (60). Caso se cumpra a condição apresenta-se o valor do comprimento máximo da lateral (L), caso contrário, não cumprindo a condição de ocorrência, será, novamente, calculado o comprimento máximo pela eq. (66), verificando, de igual maneira, a condição de ocorrência proposta na eq. (65). Caso não se cumpra essa condição será, do mesmo modo, e finalmente, calculado o comprimento máximo da linha lateral pela eq. (68), sendo esta para a condição de pressão do perfil tipo III e verificando a condição de ocorrência dada pela eq. (67).

3.9.3 Perda localizada de carga nas conexões emissor-lateral

A perda localizada de carga na inserção de um emissor na linha lateral deve-se a resistência à movimentação do fluxo oferecida pela protrusão do emissor na linha lateral, sendo expressa pela forma clássica, eq. (9), como uma fração da energia cinética.

O coeficiente K_L depende das características geométricas da inserção do emissor e do R , sendo que, para uma dada seção do tubo (A), vazão transportada (Q) e para uma conexão com dimensões definidas, o valor de K_L reduz-se com o aumento de R até certo limite, a partir do qual permanece constante (BAGARELLO et al., 1997; PROVENZANO, G; PUMO, D. 2004)

Algumas soluções particulares para K_L , dependendo do tipo de inserção na lateral, são apresentadas a seguir, permitindo assim o cálculo da perda localizada de carga. Estes modelos de emissores também serão apresentados no modulo gráfico para seleção por parte do usuário do modelo do sistema projetado.

De forma geral o K_L pode ser apresentado da seguinte forma:

$$K_L = a \cdot IO^b \quad (68)$$

em que IO é o índice de obstrução

A introdução de emissores nas linhas laterais provoca perda localizada de carga, cujo efeito no cálculo hidráulico dessas tubulações é significativo. As pesquisas desenvolvidas por Cardoso e Frizzone (2007) para emissores com conexão do tipo “online”, a de Rettore Netto et al. (2009), para emissores tipo pastilha integrados na linha, e a de Gomes et al. (2009) para emissores integrados tipo bóbi, permitem prever o valor de K_L , eq.s (69), (70) e (71) respectivamente, em função da razão entre as áreas da seção transversal do tubo (A_t) e da seção de escoamento no local em que o emissor está inserido (A_r).

$$K_L = 1,935 IO^{0,595} \text{ para } 1,08 < A_t/A_r < 1,75 \quad (69)$$

$$K_L = 1,383 IO^{0,576} \text{ para } 1,08 < A_t/A_r < 1,89 \quad (70)$$

$$K_L = 1,230 IO^{0,510} \text{ para } 1,07 < A_t/A_r < 1,89 \quad (71)$$

sendo r a razão de obstrução definida por $r = A_r/A_t$.

Para a determinação da perda de carga localizada nos conectores usados nas conexões das linhas laterais com os microtubos, considerando a perda de carga localizada na passagem lateral do fluxo através dos conectores será utilizado o modelo desenvolvido por Zitterell (2011), expresso pela eq. (72), a qual é afetada pelas dimensões do conector, pelo diâmetro interno da tubulação e pela velocidade de escoamento.

$$Hf_c = 0,000141 \cdot D_{ie}^{-5,739} \cdot D_{is}^{2,156} \cdot L_c^{0,925} \cdot D_t^{1,756} \cdot V_t^{1,971} \quad (72)$$

em que D_{ie} é o diâmetro interno de entrada (mm); D_{is} é o diâmetro interno de saída (mm); L_c é o comprimento do conector; D_t é o diâmetro interno da tubulação de derivação e V_t é a velocidade da água na tubulação ($m \cdot s^{-1}$).

Segundo Zitterell (2011), o modelo proporcionou um coeficiente de determinação de 93,31% para os dados do experimento, sendo válido para as seguintes condições:

$$2,318 \leq Die \leq 7,900 \text{ mm}$$

$$2,318 \leq Dis \leq 12,006 \text{ mm}$$

$$21,483 \leq Lc \leq 65,046 \text{ mm}$$

$$4,050 \leq Dt \leq 12,854 \text{ mm}$$

$$0,363 \leq Vt \leq 7,580 \text{ m s}^{-1}$$

$$2405,599 \leq R \leq 66670,140$$

O modelo apresentado se tornara mais eficiente quando a caracterização do conector utilizado no sistema esteja mais próxima dos conectores estudados.

Como parte dessa rotina, serão apresentados os diferentes tipos de conectores que foram avaliados para, desse modo, o usuário selecionar o mais parecido com o do seu sistema de irrigação.

3.10 Rotina do dimensionamento da linha de derivação

O dimensionamento da linha de derivação, estando esta em declive, é realizado pelo método da divisão em trechos. Caso a linha esteja em nível ou acline, o cálculo é realizado com um único diâmetro, utilizando como critério para determinar este diâmetro, a variação máxima de pressão permitida, para a linha de derivação, como valor de perda de carga.

Figura 13 – Fluxograma da rotina de dimensionamento da linha de derivação

Este método da divisão em trechos, para o dimensionamento da linha de derivação, é simples e preciso, em comparação com os procedimentos de cálculos realizados manualmente que são dispendiosos por envolver muitas tentativas. Ao se utilizar o modelo computacional proposto se torna extremamente rápido e ainda mais preciso.

Como a soma das vazões de entrada das linhas laterais em cada trecho, calcula-se a perda de carga no trecho com os diferentes diâmetros previamente determinados. Será, neste procedimento, escolhido aquele diâmetro, cuja perda de carga se aproxima mais do ganho de energia pelo declive.

Para realizar o cálculo da perda de carga, utiliza-se a equação geral para perda de carga, sendo:

$$hf = 8,263 \times 10^{-2} \cdot \lambda \cdot f \cdot \frac{Q^2}{D^5} \cdot L \quad (73)$$

A diferença de nível (ΔZ) no trecho é utilizada como critério para calcular o diâmetro a ser utilizado no trecho. Assim, de posse do desnível no trecho e assumindo este valor como sendo a perda de carga no trecho, o cálculo do diâmetro teórico no trecho, isolando o termo D da eq. (74), será:

$$D = \left(\frac{8,263 \times 10^{-2} \cdot f \cdot Q^2}{hf} \cdot L_v \right)^{1/5} \quad (74)$$

Com o diâmetro teórico calculado, a rotina vai selecionar, com base numa tabela de dados de diâmetros comerciais, o diâmetro imediatamente superior e inferior ao calculado. Com esses diâmetros será calculada, novamente, a perda de carga no trecho para esses diâmetros, utilizando a eq. (73), compensando o resultado com o desnível do trecho. O diâmetro cujo resultado apresentar, em módulo, o menor valor calculado de perda de carga será o escolhido. No trecho seguinte, para o cálculo do diâmetro teórico, deve-se primeiramente acrescentar o ganho de pressão do trecho ao desnível e, em seguida, calcular o diâmetro teórico. Deste ponto em diante, o raciocínio é o mesmo utilizado para o primeiro trecho. A equação para o cálculo do ganho de pressão no trecho é dada por:

$$H_1 = H_0 - hf_1 + \Delta Z_1 \quad (75)$$

em que H_0 é o ganho ou perda de pressão no trecho na posição anterior a i -ésima posição(m); ΔZ_I é a diferença de nível no trecho (m).

No primeiro resultado, em que são calculados os diâmetros comerciais por trecho, podem ocorrer valores de diâmetros que não seguem uma sequência lógica de crescimento ao longo da linha de derivação; neste caso, o usuário pode interferir no resultado, modificando os diâmetros nos trechos, ate um limite superior de quatro combinações de diâmetros na derivação.

3.10.1 Perda localizada de carga nas conexões linha lateral – linha de derivação

Para realizar o cálculo da perda localizada de carga, foram utilizados os modelos desenvolvidos por Vilaça (2012), para calcular a perda localizada de carga no conjunto conector-anel de vedação, utilizado no início de linhas laterais de microirrigação, para fazer a conexão entre as laterais e de derivação. Para a perda localizada de carga na passagem direta ($H_{FL(d)}$, em m) utilizou-se a eq. (76) para, $0,133 \leq v_D \leq 3,0 \text{ m s}^{-1}$; $0,0357 \leq D_D \leq 0,0721 \text{ m}$; $103 \times 10^{-6} \leq A_P \leq 355 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, e na passagem lateral ($H_{FL(l)}$, em m) a eq. (77) para $0,0078 \leq D_S \leq 0,0167 \text{ m}$; $0,0495 \leq L_C \leq 0,0664 \text{ m}$; $0,267 \leq v_E \leq 14,378 \text{ m s}^{-1}$; $0,132 \leq v_L \leq 3,0 \text{ m s}^{-1}$.

$$H_{FL(d)} = 0,043695 v_D^{1,897} D_D^{-2,428} A_P^{1,109} \quad (76)$$

$$H_{FL(l)} = 2,268121 D_C^{0,106} L_C^{1,057} v_C^{1,766} v_L^{0,386} \quad (77)$$

sendo:

v_D – velocidade da água na linha de derivação, na aproximação com a conexão, m s^{-1} ;

v_C – velocidade da água na seção de entrada do conector, m s^{-1} ;

v_L – velocidade da água no início da linha lateral, m s^{-1} ;

D_D – diâmetro interno do tubo da linha de derivação, m;

D_C – diâmetro interno da saída do conector, m;

L_C – comprimento do conector, m;

A_P – área da protrusão do conector mais anel de vedação, m^2 .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados do *modelo computacional para dimensionamento da subunidade em irrigação localizada* será dividida em duas partes, a primeira para apresentação do modelo, exibindo as telas na sequência de execução do programa. A segunda parte apresenta o dimensionamento de uma subunidade de irrigação por gotejamento com todas as etapas envolvidas no projeto de irrigação utilizando o modelo computacional desenvolvido.

4.1 Apresentação do modelo

A tela principal do modelo computacional (Figura 14) permitirá ao usuário ingressar na base de dados dos projetos realizados e salvos, apertando no botão ‘abrir’, sem precisar entrar em um novo projeto, abrindo, portanto, a tela de acesso para projetos já salvos na base de dados do modelo computacional (Figura 15), dessa mesma forma, poderá, nesta tela principal, ingressar no modelo computacional para criar um novo projeto a ser dimensionado apertando o botão ‘iniciar’, ou simplesmente sair do modelo computacional apertando o botão “sair”.

Figura 14 - Tela inicial do modelo computacional para dimensionamento da subunidade em irrigação localizada

Figura 15 - Tela de Projetos existentes na base de dados do modelo

Posteriormente, iniciado um novo projeto de dimensionamento da subunidade, é apresentada a tela de informações gerais do projeto, informações necessárias para a criação de um novo projeto, onde serão inseridos os dados que o identifica no banco de dados para o controle dos projetos salvos (Figura 16).

Figura 16 - Tela de Informações Gerais do projeto

Na tela das informações gerais do projeto será necessário determinar dados referentes à cultura utilizada a ser irrigada pela subunidade, portanto, nesta tela, existe um quadro que

fornece as informações sobre o K_C necessário para determinar os requerimentos hídricos da cultura, onde inicialmente será necessário selecionar o grupo no qual a cultura pertence e posteriormente selecionar a cultura a ser utilizada. Sendo assim, aparecerão os três possíveis K_C , inicial, médio e final da estação. O K_C inicial refere-se ao período da semeadura até 10% de cobertura do terreno; o K_C de meia-estação refere-se ao período de 100% de cobertura do terreno até o início da maturação; o K_C final refere-se ao final da maturação.

Se a cultura e/ou K_C forem diferentes daquele que se quer utilizar no dimensionamento, é possível adicionar uma nova cultura com um K_C determinado, apertando o botão “Adicionar Culturas” apresentando a tela de culturas existentes na base de dados do modelo computacional (Figura 17).

Nesta mesma tela de informações gerais, são requeridos os dados referentes às condições climáticas do local de projeto do sistema de irrigação localizada, sendo, dados da ET_O e da precipitação efetiva, contidas no requadro de condições climáticas. É possível, da mesma forma, realizar o cálculo, se não for conhecido o valor da ET_O apertando o botão “ ET_O ”, aparecendo a tela do cálculo da ET_O (Figura 18).

Grupo	Cultura	Kc Inicial	Kc f
Leguminosas	Soja	0.4	
Leguminosas	Feijão seco	0.4	
Leguminosas	Feijão verde	0.5	
Leguminosas	Amendoim	0.4	
Leguminosas	Ervilha seca	0.5	
Leguminosas	Ervilha fresca	0.5	
Leguminosas	Lentilha	0.4	

Adicionar Cultura

Grupo:

Cultura:

Kc Inicial: Kc Médio:

Kc Final: f:

Adicionar Cultura

Deletar Cultura

Cancelar

Figura 17 - Tela de Culturas existentes na base de dados

Figura 18 - Tela do cálculo da evapotranspiração de referencia - ET_o

Na tela a seguir do modelo computacional, tela do Módulo Agrônômico (Figura 19), serão inseridos os dados referentes ao solo e a água a ser utilizada no sistema de irrigação localizada: umidade do solo na capacidade de campo, umidade do solo no ponto de murcha permanente, o fator f de depleção ou de consumo de água do solo, a profundidade efetiva do sistema radicular, a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo e a condutividade elétrica da água de irrigação. Neste mesmo quadro dos dados do solo e da água será possível, se não disponibilizar dessa informação, obter o valor do f apertando o botão “f” apresentando a tela do f (Figura 20) para ser selecionado o seu valor dependendo da cultura utilizada no projeto de dimensionamento.

Igualmente, se não for conhecido o valor da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, poderá ser selecionado da tela dos valores da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (Figura 21), e posteriormente calculado o valor da condutividade elétrica da água de irrigação como explicado anteriormente.

Módulo Agrônômico

Dados do Solo e da Água | Disposição do Sistema | Seleção do Emissor

Umidade do solo na Capacidade de Campo - Occ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

Umidade do solo no Ponto de Murcha Permanente - Opmp ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

Fator de depleção ou de consumo da água do solo - f

Profundidade efetiva do sistema radicular - z (m)

Condutividade Elétrica do extrato de saturação do solo (CEe máx), dS m^{-1}

Condutividade Elétrica da água de irrigação (CEi), dS m^{-1}

Cálculos

Evapotranspiração da cultura para irrigação localizada - ETc (mm/dia)

Numero de gotejadores por planta - Np

Separação entre emissores - Se (m)

Máxima Irrigação Real Necessária - IRNmáx

Turno de Rega Máximo - TRmáx (dias)

Irrigação total necessária - ITN (mm)

Informações Importantes

Calcular

Sair Voltar Continuar

Figura 19 - Tela do Módulo Agrônômico do projeto dados do solo e da água

Fator de depleção ou de consumo de água do solo - f

Grupo: Leguminosas

Cultura: Soja

f: 0.5

Confirmar

Cancelar

Figura 20 - Tela do fator de depleção ou de consumo de água no solo – f

condutividade elétrica do extrato de saturação do solo - CEe

Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo - CEe

Grupo: Extensivas

Cultura: Milho

CEe máx: 10.0

Confirmar

Cancelar

Figura 21 - Tela da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo– CEe

Na tela do modulo agrônômico, serão inseridos, também, os dados alusivos à disposição do sistema como: espaçamento entre fileiras de plantas, espaçamento entre plantas na fileira, espaçamento entre as linhas laterais, porcentagem de área molhada, porcentagem de área sombreada e a uniformidade de emissão assumida para projeto (Figura 22). Os valores de P_w e P_s poderão ser calculados, se não forem conhecidos no momento do dimensionamento do sistema, apertando os botões de “ P_w ” e “ P_s ” respectivamente aparecendo às telas das Figuras 23 e 24.

Figura 22 - Tela do Módulo Agrônômico – Disposição do Sistema

Figura 23 - Tela do cálculo da porcentagem de área molhada – P_w

Figura 24 - Tela do cálculo da área sombreada – P_s

Além disso, para realizar os cálculos apresentados no módulo agrônomo: evapotranspiração da cultura, número de gotejadores por planta, espaçamento entre emissores, máxima irrigação real necessária, turno de rega e irrigação total necessária, serão requeridos os dados referentes ao emissor selecionado no sistema de irrigação localizada, podendo assim, selecionar o tipo de emissor da lista apresentada no quadro “seleção do emissor” (Figura 25), e informando as características do mesmo como: vazão, relação vazão – pressão, coeficiente de variação e, no caso de selecionar o microtubo, será necessário informar o diâmetro deste. Assim, quando selecionado o microtubo, aparecerá uma tela com os diferentes conectores (Figura 26) utilizados na conexão microtubo – linha lateral, para ser selecionado o tipo de conector utilizado e realizar o cálculo da perda de carga pela inserção deste conector na linha. Em seguida, para o valor do comprimento equivalente, o qual poderá ser informado apertando no botão “Le” aparece uma tela para informar o valor do Le conhecido (Figura 27) ou, se não disponibilizar dessa informação, poderá ser calculado a partir das informações referentes à área de passagem do fluido no tubo com o emissor inserido (A_r) ou da área da protrusão da conexão no tubo (A_p), a qual pode ser selecionada apertando o botão “ A_p ” aparecendo assim, a tela das informações sobre A_p do emissor selecionado (Figura 28).

Etapa 2 (Módulo Agrônomo)

Arquivo Ferramentas Ajuda

10%

Módulo Agrônomo

Dados do Solo e da Água | Disposição do Sistema | Seleção do Emissor

Tipo de emissor

- ☐ Emissor Integrado (Pastilha)
- ☐ Emissor Integrado (bob)
- ☐ Conexão On-line
- ☐ Tubo emissor tipo fita com labirintos modelados
- ☒ Microtubo

Características do emissor

- Área da protusão da conexão no tubo - A_p (mm²):
- Área de passagem do fluido no tubo com o emissor inserido - A_r (mm²):
- Vazão do Emissor: L/h $\times$
- Relação de vazão-pressão - q (L/h) = $k H$ (m.c.a.): q (L/h) = H (m.c.a.)
- Coefficiente de variação de fabricação do emissor - CV(F) (%):
- Diâmetro do microtubo - D (mm):

Cálculos

Evapotranspiração da cultura para irrigação localizada - ET_c (mm/dia):

Numero de gotejadores por planta - N_p :

Separação entre emissores - S_e (m):

Máxima Irrigação Real Necessária - $IRN_{máx}$: mm L planta⁻¹

Turno de Rega Máximo - $TR_{máx}$ (dias):

Irrigação total necessária - ITN (mm):

Informações Importantes

Conector Microtubo Lateral

Calcular

Logos: ESALQ, CAPES, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia

Sair **Voltar** **Continuar**

Figura 25 - Tela do Módulo Agrônomo do projeto – Seleção do emissor

Representação esquemática dos conectores utilizados nas conexões Microtubo - Linha Lateral

Conectores utilizados nas conexões Microtubo - Linha Lateral

Por favor selecione, dos conectores mostrados abaixo, o conector que será utilizado na conexão microtubo com a linha lateral.

Conectores

- ☐ Conector A
- ☐ Conector B
- ☐ Conector C
- ☐ Conector D
- ☐ Conector E
- ☐ Conector F
- ☐ Conector G
- ☒ Conector H
- ☐ Conector I
- ☐ Conector J
- ☐ Conector K

Esquema

Dimensões

Área de protusão no tubo - A_p (mm) = 101,183

Diâmetro interno de entrada - D_{ie} (mm) = 7,028

Diâmetro interno de saída - D_{is} (mm) = 12,006

Comprimento do conector - L_c (mm) = 65,046

Selecionar

Cancelar

Fonte: Zitterell, 2011 (Pode-se consultar o trabalho completo no menu "pesquisas".)

Figura 26 - Tela dos conectores utilizados nas conexões microtubo – linha lateral

Figura 27 - Tela do comprimento equivalente –Le

Figura 28 - Tela da área da protrusão do emissor inserido na linha

A próxima tela consta do dimensionamento da linha lateral, onde os dados das condições iniciais do dimensionamento da linha lateral serão inseridos, sendo: desnível do terreno, pressão de entrada na linha lateral, diâmetro interno da linha lateral, separação entre emissores, distância do início da linha lateral até o primeiro emissor, o critério de projeto que será a variação máxima da carga de pressão na lateral ou a variação máxima de vazão nos emissores na lateral (Figura 29). Neste modulo será possível determinar o comprimento máximo da linha lateral apresentando como resultados o comprimento equivalente causado pela inserção do emissor selecionado na linha lateral, a perda localizada nos emissores, o comprimento máximo da lateral, a pressão no final da linha, o local da máxima pressão e a variação máxima da carga de pressão na subunidade.

Figura 29 - Tela do dimensionamento da linha lateral da subunidade

A tela seguinte (Figura 30) refere-se ao dimensionamento da linha de derivação. Serão inseridos os dados das condições iniciais do dimensionamento da linha de derivação sendo: desnível do terreno, pressão na entrada da linha de derivação, comprimento da linha de derivação, máxima variação de pressão admissível na linha, separação entre os laterais, vazão da linha lateral, a distância do início da linha até a primeira saída ou linha lateral e o conector utilizado nas conexões linha lateral – linha de derivação (Figura 31) o qual deverá ser selecionado da lista de conectores existentes na base de dados do programa.

Por último, no dimensionamento da subunidade, é mostrado o relatório final (Figura 32) gerado pelo modelo, onde pode se comparar o comprimento máximo da linha lateral considerando e desconsiderando as perdas localizadas causadas pela inserção do emissor na linha e o dimensionamento da linha de derivação com os diferentes diâmetros selecionados de igual forma, considerando e desconsiderando as perdas localizadas de carga ocasionadas pela inserção do conector na linha de derivação e pelo aumento do comprimento da linha lateral ao desconsiderar as perdas localizadas de carga no seu dimensionamento.

Etapa 4 [Dimensionamento da Linha de Derivação]

Arquivo Ferramentas Ajuda

80%

Dimensionamento da Linha de Derivação

Condições Iniciais

Terreno em: ☒ Nível ☐ Ative Uniforme (%): ☐ Decive Uniforme (%):

Comprimento da linha de Derivação - L (m):

Pressão na entrada da Linha de Derivação - H (m.c.a.):

Máxima variação de pressão admissível - Hvar (%): 16,5

Separação entre Linhas Laterais - SL (m):

Distância do início até a primeira linha lateral - SL1 (m):

Vazão de cada Linha Lateral (L/h):

Conector da conexão entre as linhas laterais e de derivação:

Informações Importantes

Cálculos | Tabela de cálculo de dimensionamento | Gráfico

Comprimento equivalente - Le (m):

Pressão no final da linha (m.c.a.):

Número de Linhas Laterais - NL:

Diâmetros e Comprimentos

	Diâmetros	Comprimentos
1	<input type="text"/> mm	<input type="text"/> m
2	<input type="text"/> mm	<input type="text"/> m
3	<input type="text"/> mm	<input type="text"/> m
4	<input type="text"/> mm	<input type="text"/> m

Figura 30 -Tela do dimensionamento da linha de derivação da subunidade

Conectores Linha de Derivação-Lateral

Conectores utilizados nas conexões Linha Lateral - Linha de Derivação

Por favor selecione, dos conectores mostrados abaixo, o conector que será utilizado na conexão da linha lateral com a linha de derivação.

Conectores

- ☒ Conector 1
- ☐ Conector 2
- ☐ Conector 3
- ☐ Conector 4
- ☐ Conector 5

Esquema

Dimensões

Diâmetro interno de entrada - Die (mm) = 7,001

Diâmetro interno de saída - Dis (mm) = 7,765

Comprimento do conector - Lc (mm) = 58,072

Fonte: Vilaça, 2012 (Pode-se consultar o trabalho completo no menu "pesquisas".)

Figura 31 -Tela dos conectores utilizados nas conexões linha lateral – linha de derivação

Figura 32 -Tela do relatório de dimensionamento da subunidade

4.2 Dimensionamento da subunidade de irrigação localizada utilizando o modelo

Os resultados são apresentados utilizando as janelas do modelo computacional, utilizando um exemplo que será salvo no programa para utilização como guia de cálculo dos projetos a serem dimensionados. O projeto de irrigação a ser dimensionado é uma subunidade de 5,0 ha, com declividade uniforme no sentido da linha de derivação de 1% e no sentido das linhas laterais de 1% para todos os emissores e conectores da base de dados. A cultura a ser utilizada é da cana de açúcar, e a região Piracicaba para efeitos climáticos no sistema.

Na tela de informações gerais (Figura 33) são apresentadas as informações gerais do projeto a ser dimensionado, utilizando o modelo computacional, selecionando para este, a cultura da cana de açúcar com o K_C da meia-estação, e calculando a ET_0 com as condições climáticas da região de Piracicaba para o mês de outubro (Figura 34), considerando uma precipitação efetiva inexistente para suprir a necessidades hídricas da cultura unicamente com irrigação.

Figura 33 - Tela de informações gerais do projeto TESE

Figura 34 - Tela do cálculo da ETo do projeto TESE

4.2.1 Necessidades de irrigação calculadas utilizando o modelo

No módulo agrônômico do modelo, Etapa 2 do dimensionamento da subunidade (Figura 35), é mostrado o cálculo das necessidades de irrigação da cultura da cana de açúcar, com os dados do solo e da água como segue: $z = 0,70\text{m}$, $\theta_{cc} = 270 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, $\theta_{pmp} = 140 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, $CEe = 19,0 \text{ dSm}^{-1}$ e $CEi = 6,0 \text{ dSm}^{-1}$, com disposição do sistema: $S_r = 1,5 \text{ m}$, $S_p = 1,0 \text{ m}$, SL (opcional) = 6 m , $PW = 60\%$, $PS = 40 \%$ e $UE = 90\%$ e com parâmetros da seleção do emissor dos tipos de emissores e conectores existentes na base de dados do modelo.

Como resultado das necessidades de irrigação (Figura 35), o modelo mostra a $ET_c = 5,902875$ mm/dia, $N_p = 4$, Se (opcional) = 0,25, $IRN_{máx} = 35,49$ mm, $IRN_{máx} = 53,235$ L*planta⁻¹, $TR_{máx} = 6$ dias e $ITN = 46,8271$ mm.

Módulo Agrônomo

Dados do Solo e da Água

Umidade do solo na Capacidade de Campo - θ_{cc} ($m^3 m^{-3}$)
270

Umidade do solo no Ponto de Murcha Permanente - θ_{pmp} ($m^3 m^{-3}$)
140

Fator de depleção ou de consumo da água do solo - f
0,65

Profundidade efetiva do sistema radicular - z (m)
0,70

Condutividade Elétrica do extrato de saturação do solo (CE_e máx), $dS m^{-1}$
19,0

Condutividade Elétrica da água de irrigação (CE_i), $dS m^{-1}$
6

Cálculos

Evapotranspiração da cultura para irrigação localizada - ET_c (mm/dia)
5,902875

Numero de gotejadores por planta - N_p
4

Separação entre emissores - Se (m)
0,25

Máxima Irrigação Real Necessária - $IRN_{máx}$
35,49 mm 53,235 L planta⁻¹

Turno de Rega Máximo - $TR_{máx}$ (dias)
6

Irrigação total necessária - ITN (mm)
46,8271

Informações Importantes

A Capacidade de campo determina o volume máximo aproximado de água que um solo bem drenado pode armazenar por longos períodos sem evapotranspiração, sendo assim, quantidade de água que um perfil de terreno sem vegetação retém contra ação da gravidade, após plenamente inundado e deixado drenar livremente por poucos dias (um a quatro dias), em condições de campo. VEIHMEYER e HENDRICKSON, 1931

UNESP ESALQ CAPES INIA

Sair Voltar Continuar

Figura 35 - Tela da Etapa 2 [Modulo Agrônomo] do projeto TESE

Os valores descritos como opcionais, dos resultados obtidos no modulo agrônomo, são valores que poderão ser mudados nas seguintes etapas do dimensionamento da subunidade, o que significa que servem como parâmetro para determinar os requerimentos do sistema, mas que dependendo da disponibilidade e critério do projetista poderão ser mudados para quando calculados as linhas laterais e de derivação da subunidade. É importante ressaltar que nos cálculos dos requerimentos de irrigação foram utilizadas as mesmas características do emissor selecionado para o dimensionamento da subunidade, como sua vazão e as características do solo. Esses parâmetros opcionais estarão o mais perto do dimensionamento adequado do sistema de irrigação, pois esses parâmetros determinam a P_w que é o critério fundamental para determinar a separação entre emissores no sistema.

4.2.2 Dimensionamento do comprimento máximo da linha lateral utilizando os diferentes tipos de emissores disponíveis na base de dados do modelo

Utilizando o modelo computacional dimensiona-se o comprimento máximo da linha lateral da subunidade do projeto, com base nos modelos dos emissores contidos na base de

dados, para assim, visualizar os diferentes comprimentos e as diferenças relacionadas com a perda localizada de carga ocasionada pelo emissor selecionado.

Na tabela 8, apresentam-se a declividade (S_o), a vazão nominal do emissor (q_n), o seu espaçamento na linha lateral (S_e), o diâmetro interno da lateral (D_i) e a pressão de serviço indicada pelo fabricante (H), para os emissores do tipo bóbi. Para conseguir visualizar uma melhor comparação dos resultados, obtidos para todos os cálculos efetuados, se considerou como critério de projeto a variação máxima da carga de pressão no sistema, e sempre mantendo, como proporção do critério de projeto, uma variação na carga de pressão de 50% para a linha lateral e de 50% para a linha de derivação. De igual forma, para todos os cálculos do comprimento equivalente foi utilizada uma velocidade estimada de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$, velocidade igual ou inferior à utilizada em todas as pesquisas desenvolvidas para os modelos matemáticos de perda localizada de carga (CARDOSO, 2007; RETTORE NETO et al., 2009; ZITTERELL et al., 2009; GOMES et al., 2010; VILAÇA, 2012).

Considerando-se que a distancia entre os emissores não é significativa, para gotejadores utilizados no cálculo, o permite visualizar as diferentes perdas localizadas de carga, em termos de comprimento equivalente (L_e), sendo, para o emissor Amanco Drip AC (autocompensado) no valor de 0,628 m, para o Amanco Drip (não autocompensado) de 0,222 m, para o Naan PC (autocompensado) de 0,415 m e para o Naan TIF de 0,129 m. Portanto, entre os gotejadores não-autocompensantes, o modelo Amanco Drip apresentou maior perda localizada de carga, um acréscimo de 71,7% em relação ao Naan TIF, decorrente da menor área de protrusão do emissor e por conseguinte do menor diâmetro da seção de escoamento através do gotejador. Fazendo-se esse mesmo análise para os gotejadores compensantes, o emissor Amanco Drip – AC apresentou uma maior perda localizada de carga, em 51,2% a mais em relação ao Naan PC, corroborando o encontrado por Gomes et al., 2009, que determinou uma diferença de 60,5 % entre o emissor Amanco Drip e o Naan TIF, conforme também foi observado nos trabalhos experimentais realizados por Al-Amound (1995), Bagarello et al. (1997), Cardoso (2007).

Esses acréscimos na perda localizada de carga, quando comparados os emissores autocompensantes em relação aos não-autocompensantes, estão relacionados à geometria interna do gotejador, uma vez que o dispositivo de regulação de pressão ocupa certa fração da área de escoamento

Realizando a análise da variação da perda localizada de carga, Le (m), e do comprimento máximo da linha lateral, para diferentes Di , para os emissores on-line tipo bôbi, existentes no modelo, (Figura 36), com os parâmetros de dimensionamento $Se = 1$ m, $H = 10$ m.c.a., terreno em nível e $Hvar = 10$ %, mostra como resultados que, para o emissor NaanTif ($A_P = 52,76$ mm²), o menor diâmetro interno da linha (Di) que pode ser utilizado, sem violar o domínio da função desenvolvida para o cálculo dessa perda localizada de carga ($1,08 < At/Ar < 1,89$), é o de 10 mm, causando Le de 0,219 m, o que resulta num comprimento máximo de linha de 43 m. Já quando o diâmetro interno da linha lateral for de 19,7 mm o Le passa a ser de 0,074 m, resultando comprimento máximo da linha lateral de 145 m.

Figura 36. Variação do Le e do comprimento máximo em função do diâmetro da linha lateral para emissores on-line tipo bôbi

Nesse caso, para uma redução do Le de 66,21 % (de 0,219m para 0,074 m) o acréscimo no comprimento máximo da linha é de 237,21 % (de 43 m para 145 m).

Quando comparado os emissores NaanTif (não autocompensado), como o Naan PC (autocompensado), com o mesmo $Di = 14,4$ mm, os valores de Le são 0,114 e 0,327 m, respectivamente, o que resulta acréscimo de 186,49 %. Já para os emissores Amanco Drip (não compensado) e Amanco Drip AC (compensado), esse acréscimo é de 172,86 %, sendo que o Le de 0,199 e 0,543 m, respectivamente.

Se comparados os emissores autocompensados (Naan PC e Amanco Drip AC), com o $Di = 14,4$ mm, existe um acréscimo no Le de 66,26 %, já para os emissores não autocompensados (NaanTif e Amanco Drip), esse acréscimo do Le é do valor de 74,56 %.

Seguidamente, realizando o mesmo procedimento de cálculo, para os emissores tipo pastilha, se mostra, portanto, na Tabela 9, os resultados obtidos do dimensionamento do comprimento máximo da linha lateral, apresentando-se a declividade (So), a vazão nominal do emissor (q_n), seu espaçamento na linha lateral (Se), o diâmetro interno da lateral (Di) e a pressão de serviço indicada pelo fabricante (H), para os emissores testados no modelo.

Entretanto, para conseguir visualizar melhor a comparação dos resultados obtidos, para todos os cálculos efetuados se considerou como critério de projeto uma variação máxima na carga de pressão no sistema de 100% para os gotejadores autocompensados, sendo, portanto, para a linha lateral uma variação máxima de 50% e de 50% para a linha de derivação, e para o gotejador não autocompensado a variação máxima do sistema foi de 40%, sendo 20% para a linha lateral e 20% para a linha de derivação, e de igual forma, utilizada uma estimativa de velocidade máxima de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$, isto, considerando que a velocidade afeta, mantendo o diâmetro da tubulação e a viscosidade da água, o valor do numero de Reynolds.

Observa-se na Tabela 9, que a perda localizada de carga, em termos de Le (m), representa um valor expressivo na linha lateral, sendo que o gotejador Tiran (Não-autocompensante) apresentou o menor valor da perda localizada de carga (0,238 m), e o gotejador Uniram (Autocompensado) a maior (0,758 m).

Com os dados obtidos nos cálculos, pode-se observar também que tem aumento do comprimento máximo da lateral quando desconsideradas as perdas localizadas de carga, para todos os modelos de emissores testados. Dessa forma, corroboram-se os resultados encontrados na pesquisa de Rettore Netto et al. (2009).

Tabela 9 - Resultados dos cálculos do comprimento máximo da lateral para emissores tipo pastilha

Parâmetros	Emissor											
	Tiran+				Uniram++				Twin Plus+++			
	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive
So (%)	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
qn (L/h)	1,91	1,95	1,94	2,3	2,3	2,3	1,8	1,8	1,8	1,6	1,6	1,6
Se (m)	0,7	0,7	0,7	0,75	0,75	0,75	1	1	1	0,75	0,75	0,75
Di (mm)	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	15,5	15,5	15,5	15,2	15,2	15,2
HS (m.c.a.)	11	11	11	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Hvar _{LATERAL} (%)	20	20	20	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Hinicial (m.c.a)	10,97	10,97	10,99	24,84	24,85	24,93	24,88	24,89	24,94	24,89	24,90	24,95
Hfinal (m.c.a.)	9,905	8,79	9,32	10,01	9,98	10,40	10,06	9,99	11,04	9,99	10,08	10,80
Hf (m.c.a.)	2,189	1,236	3,78	14,99	13,16	17,58	14,94	11,783	15,54	15,01	12,17	18,86
NE	171	139	300	260	248	397	351	322	558	396	367	621
Le (m)	0,238	0,238	0,238	0,758	0,758	0,758	0,433	0,433	0,433	0,406	0,406	0,406
Lmáx -PLC (m)	119,7	97,3	210	195	186	297,75	351	322	558	297	275,25	465,75
Lmáx (m)	160,3	130,2	281,4	392,25	374,25	598,5	503	461	799	457,5	424,5	718,5
Lvar (%)	33,92	33,81	34,00	101,15	101,21	101,01	43,30	43,17	43,19	54,04	54,22	54,27

qn = 0,659 H^{0,481} (L/h)⁺ ; qn = 2,3 H⁰ (L/h)++; qn = 1,8 H⁰ (L/h)+++; qn = 1,6 H⁰ (L/h)++++

Portanto, é possível observar, que houve maior aumento na perda de carga localizada quando se utilizou gotejadores autocompensados e, a desconsideração desta no dimensionamento ocasiona maior aumento do comprimento da linha lateral, atingindo valores superiores a 100% (Uniram). E, para o gotejador não autocompensado (Tiran), esse aumento, no comprimento da linha, foi de 33,92 % para terreno em nível, 33,81% para alicive de 1%, e para declive de 1%, o aumento no comprimento da linha lateral foi de 34 %, o que resultaria em aumento no comprimento da linha em 40,6, 32,9 e 71,4 m, respectivamente. Este fato está em conformidade com os relatados de Al-Amound (1995), que salienta que a perda localizada de carga pode atingir valores superiores a 32% no tubo com conexões de emissores, sendo diretamente proporcional a protrusão do mesmo, e que, a negligência das perdas localizadas promove aumento do comprimento calculado para a lateral.

Na Figura 37 é apresentada a variação da perda localizada de carga, Le (m), em função de diferentes diâmetros na linha lateral, para os tipos de emissores existentes na base de dados do modelo, com parâmetros de dimensionamento de $Se = 1$ m, $H = 10$ m.c.a., terreno em nível e $Hvar = 10$ %. Assim, para o emissor Uniram ($A_p = 69,86$ mm²) o menor diâmetro interno da linha (Di) que pode ser utilizado, sem violar o domínio da função desenvolvida para o cálculo dessa perda localizada de carga ($1,08 < At/Ar < 1,75$), é o de 14,4 mm, causando uma perda localizada de carga, ocasionada pela inserção desse emissor na linha, de 0,759 m, o que resulta num comprimento máximo de linha de 92 m. Já quando o diâmetro interno da linha lateral for de 19,7 mm o Le passa a ser de 0,373 m, resultando comprimento máximo da linha lateral de 173 m. Nesse caso, para uma redução do Le de 50,88 % (de 0,759m para 0,373 m) o acréscimo no comprimento máximo da linha é de 88,03 % (de 92 m para 173 m).

Essa mesma análise realizada para o emissor Tiran ($A_p = 35,93$ mm²), mostra que o menor diâmetro da linha lateral, mantendo o domínio da função, é de 11 mm, resultando Le de 0,421 m, com comprimento máximo da linha de 70 m; já quando o $Di = 19,7$ mm o Le será de 0,144 m, com comprimento da linha de 206 m. Portanto, nesse caso, para uma diminuição do Le de 34,14 % (de 0,421 m para 0,144 m) o acréscimo no comprimento máximo da linha é de 194,29 % (de 70 m para 206 m).

Se comparados os dois emissores analisados acima, para o mesmo $Di = 14,4$ mm, o valor do Le é 0,759 m para o Uniram e para o Tiran é de 0,238 m, com comprimento máximo de 92 e 117 m, respectivamente. Este acréscimo do Le , no Uniram, permite que esse emissor seja menos susceptível à variação da pressão na linha propiciando, assim, um maior comprimento da linha se calculado com um $Hvar$ maior que o utilizado nestes cálculos.

Figura 37. Variação do Le e do comprimento máximo em função do diâmetro da linha lateral para emissores in-line tipo pastilha

Na tabela 10 são apresentados os resultados do dimensionamento da linha lateral para os diferentes níveis de declividade do terreno para o emissor tipo conexão online, apresentando-se a declividade (S_o), a vazão nominal do emissor (q_n), seu espaçamento na linha lateral (S_e), o diâmetro interno da lateral (D_i) e a pressão de serviço indicada pelo fabricante (H), para os emissores testados no modelo. Mantendo os parâmetros de dimensionamento e para conseguir visualizar melhor a comparação dos resultados obtidos, para todos os cálculos efetuados, se considerou como critério de projeto uma variação máxima da carga de pressão no sistema de 20%, sendo, 10% para a linha lateral e 10% para a linha de derivação.

Tabela 10 - Resultados dos cálculos do comprimento máximo da lateral para emissores tipo conexão online

Parâmetros	Emissor											
	Naan Click Tif - PC+			Plasnova - Microjet++			Plastro - Katif+++			Naan Click Tif - PC*		
	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive
So (%)	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
qn (L/h)	1,98	1,99	1,98	2,3	2,3	2,3	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Se (m)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Di (mm)	13	13	13	10	10	10	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7
HS (m.c.a.)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	30	30	30
Hvar LATERAL(%)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	40	40	40
Hinicial (m.c.a)	19,957	19,962	19,97	19,927	19,934	20	19,979	19,981	20	29,890	29,902	29,95
Hfinal (m.c.a.)	18,000	18,006	18,340	18,012	18,032	18,110	18,008	18,000	19,090	10,021	17,987	19,030
Hfl (m.c.a.)	1,999	1,01	3,152	1,988	1,328	2,705	1,992	0,459	4,392	11,979	9,172	16,000
NE	127	99	149	74	64	82	262	154	348	314	285	503
Le (m)	0,145	0,145	0,145	0,141	0,141	0,141	0,111	0,111	0,111	1,0	1,0	1,0
Lmáx -PLC (m)	127	99	149	74	64	82	262	154	348	314	285	503
Lmáx (m)	145	113	170	84	73	94	291	171	387	628	570	1006
Lvar (%)	14,17	14,14	14,09	13,51	14,06	14,63	11,07	11,04	11,21	100	100	100

qn = 0,52 H^{0,46} (L/h)⁺; qn = 2,3 H⁰ (L/h)++; qn = 1,8 H⁰ (L/h)+++; *Emissor avaliado por CARDOSO, 2007.

Verifica-se, portanto, que para todos os modelos utilizados nos cálculos do dimensionamento da linha lateral, a perda localizada de carga, em termos do comprimento equivalente, aumenta em relação ao grau de obstrução que a inserção do emissor ocasiona na linha lateral. Assim, para o emissor do tipo Katif que possui a maior área de protrusão de $31,66 \text{ mm}^2$, o comprimento equivalente para esse emissor, para quando utilizada uma linha lateral de diâmetro interno de $19,7 \text{ mm}$, é de $0,111 \text{ m}$. Isto resulta em um aumento no comprimento da linha lateral, se forem negligenciadas as perdas localizadas de carga ocasionadas por este gotejador, em $11,21 \%$ ou 39 m de comprimento, para o terreno em declive de 1% . Já no caso do emissor Microjet, essa perda localizada, causada pela área de protrusão desse gotejador de $19,7 \text{ mm}^2$ e inserido numa linha lateral de diâmetro interno de 10 mm , atinge o valor de $0,141 \text{ m}$ por emissor, o que resulta em um aumento no comprimento máximo da linha em $14,63 \%$ ou 12 m , para o terreno em declive. Para o emissor do tipo Click Tif- PC, que apresentou a maior perda localizada de carga, em termos de comprimento equivalente, com valor de $0,145 \text{ m}$ por emissor, resultante da área de protrusão de $26,5 \text{ mm}^2$, inserido na linha com diâmetro interno de 13 mm , obteve-se um aumento de $14,17 \%$ no comprimento máximo da linha lateral, resultando assim, em 18 m de acréscimo da linha lateral se negligenciadas as perdas localizadas de carga.

Na pesquisa desenvolvida por Cardoso (2007), dados resultantes apontam que para um desses modelos de emissores avaliado, os acréscimos da perda localizada de carga, em metros, para $L_e = 1 \text{ m}$ e terreno em nível, podem chegar a valores $0,03771 \text{ m.c.a.}$ ocasionando acréscimos na perda localizada de carga de 24% . Realizando o cálculo com o modelo computacional, seguindo os mesmos parâmetros utilizados na pesquisa do modelo matemático, esse valor da perda localizada de carga foi de $0,038 \text{ m.c.a.}$ por metro de linha lateral.

Na Figura 38, apresenta-se a variação da perda localizada de carga, $L_e \text{ (m)}$, e do comprimento máximo da lateral em função do D_i , para os diferentes emissores on-line, com $Se = 1 \text{ m}$, $H = 20 \text{ m.c.a.}$, terreno em nível e $Hvar = 10 \%$, como resultados, para o emissor Microjet ($A_p = 19,7 \text{ mm}^2$), mostra que o menor diâmetro interno da linha (D_i) que pode ser utilizado, sem violar o domínio da função desenvolvida para o cálculo dessa perda localizada de carga ($1,07 < At/Ar < 1,89$), é o de 10 mm , causando L_e de $0,141 \text{ m}$, o que resulta num comprimento máximo de linha de 74 m . Do mesmo modo, quando o diâmetro interno da linha lateral for de $19,7 \text{ mm}$ o L_e passa a ser de $0,066 \text{ m}$, resultando comprimento máximo da linha lateral de 244 m . Portanto, para uma redução do L_e de $53,34 \%$ (de $0,141 \text{ m}$ para $0,066 \text{ m}$) o acréscimo no comprimento máximo da linha é de $229,73 \%$ (de 74 m para 244 m).

Figura 38. Variação do Le e do comprimento máximo em função do diâmetro da linha lateral para emissores on-line.

Quando realizada essa avaliação para o emissor Click Tif-PC ($A_P = 26,5 \text{ mm}^2$), mostra que o menor diâmetro da linha lateral, mantendo o domínio da função, é de 10 mm, resultando Le de 0,216 m, com comprimento máximo da linha de 79 m; já quando o $D_i = 19,7 \text{ mm}$ o Le será de 0,091 m, com comprimento da linha de 264 m. Portanto, nesse caso, para uma diminuição do Le de 57,81 % (de 0,216 m para 0,091 m) o acréscimo no comprimento máximo da linha é de 234,18 % (de 79 m para 264 m).

Já para o emissor Katif, o acréscimo do Le é de 61,32 % (de 0,288 para 0,111), apresentando um aumento no comprimento máximo da lateral de 83 m para 280 m, o que representa um acréscimo de 237,35 %.

Do mesmo modo, para os cálculos do comprimento máximo da linha lateral, foram utilizadas as conexões do microtubo na linha lateral e os resultados destes cálculos são

apresentados na Tabela 11, onde são mostrados: a declividade (S_o), a vazão nominal do emissor (q_n), seu espaçamento na linha lateral (S_e), o diâmetro interno da lateral (D_i), o diâmetro interno do microtubo (D_{i-MT}) e a pressão de serviço indicada pelo fabricante (H), para os conectores A, E e D, utilizados igualmente no desenvolvimento do modelo matemático para determinação da perda localizada de carga (ZITTERELL et al., 2010).

Verifica-se que para os conectores E e D, conectores com área de protrusão similar (33,785 e 33,102 mm², respectivamente), existe uma variação na perda localizada de carga na passagem lateral, sendo do conector D de 0,309 m e do E de 0,565 m (acrécimo de 88,85 %), causada está, pelo aumento no comprimento do conector D em relação ao conector E. Quando comparados o acréscimo do L_e total, perda localizada de carga na passagem lateral e direta, dos conectores acima mencionados, tem uma redução para 62,16 % (L_e – conector D = 0,407 m; L_e – conector E = 0,660 m), causado pela diferença na área de protrusão do conector.

Quando comprimento dos conectores similares, conector A (24,575 mm) e E (24,222 mm), a diferença na perda de carga localizada, em termos de comprimento equivalente – L_e , é dada pela variação entre os diâmetros interno de entrada e de saída, que para estes conectores consideram-se iguais, ocasionando um acréscimo da perda localizada de carga na passagem lateral, do conector E em relação ao A, em 5,81%, e na passagem direta em 7,49 %.

Como é mostrado, para os conectores utilizados no dimensionamento, foram corroborados os resultados obtidos por Zitterell et al. (2010), sendo que para o conector D, com terreno em nível, o comprimento máximo da linha foi de 104 m, o mesmo encontrado por Zitterell et al. (2010). Para os outros conectores o comprimento máximo da linha foi de 100 m, mantendo o parâmetro de projeto estabelecido ($H_{var} = 16,5$ %).

Em relação ao comprimento da linha lateral que seria superestimado ao desconsiderar as perdas localizadas de carga, o maior valor foi de 24,39% para o conector D+, com acréscimo de 24, 20 e 40 m na linha lateral, para terreno em nível, aclive de 1 % e declive de 1 % respectivamente. Já para os outros conectores A, D e E, com terreno em nível, os valores foram 8,00, 7,69 e 16,00 % de acréscimo no comprimento máximo da linha, ao serem negligenciadas as perdas localizadas de carga no dimensionamento da linha. Quando calculado para terreno em aclive de 1% os acréscimo no comprimento da linha foram de 9,09; 9,09 e 15,91 %, respectivamente para os três conectores, e em declive de 1% esses valores, para os três conectores foram de 9,52; 9,30 e 16,67 % de aumento no comprimento da linha lateral.

Tabela 11 - Resultados dos cálculos do comprimento máximo da lateral para emissores tipo microtubo

Parâmetros	Emissor											
	Conector A				Conector D				Conector E			
	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive
So (%)	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
qn (L/h)	30,57	30,98	29,62	30,57	30,89	29,47	30,7	30,95	29,58	30,32	30,83	29,66
Se (m)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Di (mm)	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4
Di _{-MT} (mm)	4,47	4,47	4,47	4,63	4,63	4,63	4,09	4,09	4,09	5,66	5,66	5,66
HS (m.c.a.)	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Hvar _{LATERAL} (%)	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
Hinicial (m.c.a)	16,718	16,738	16,39	16,713	16,732	16,39	16,715	16,736	16,39	16,693	16,718	16,38
Hfinal (m.c.a.)	14,341	14,268	14,21	14,194	14,095	14,100	14,320	14,253	14,180	14,110	14,107	14,240
Hfl (m.c.a.)	2,369	1,65	3,864	2,527	1,576	3,926	2,393	1,667	3,892	2,559	1,562	3,843
NE	25	22	42	26	22	43	25	22	42	25	21	41
Le _{LATERAL} (m)	0,534	0,534	0,534	0,309	0,309	0,309	0,565	0,565	0,565	0,886	0,886	0,886
Le _{DIRETA} (m)	0,08	0,08	0,08	0,098	0,098	0,098	0,095	0,095	0,095	0,098	0,098	0,098
Le (m)	0,614	0,614	0,614	0,407	0,407	0,407	0,660	0,660	0,660	0,984	0,984	0,984
Lmáx -PLC (m)	100	88	168	104	88	172	100	88	168	100	84	164
Lmáx (m)	108	96	184	112	96	188	116	102	196	124	104	204
Lvar (%)	8,00	9,09	9,52	7,69	9,09	9,30	16,00	15,91	16,67	24,00	23,81	24,39

qn = 7,28 H^{0,535} (L/h), + Conector adaptado ao microtubo de 5,66 mm de diâmetro

Para os conectores, utilizados no cálculo do comprimento máximo da linha lateral, foi realizada, igualmente, a análise da variação da perda localizada de carga, Le (m), e do comprimento equivalente para diferentes Di (Figura 39), com parâmetros de dimensionamento $Se = 4$ m, $H = 15$ m.c.a., terreno em nível e $Hvar = 16,5$ %. Mostra-se, que para o Conector A ($A_P = 28,436$ mm²), o menor diâmetro interno da linha (Di) que pode ser utilizado, sem violar o domínio da função desenvolvida para o cálculo dessa perda localizada de carga ($1,07 < At/Ar < 1,89$), é o de 10 mm, causando uma perda localizada de carga, de 0,614 m, o que resulta num comprimento máximo de linha de 100 m.

Figura 39. Variação do Le e do comprimento máximo em função do diâmetro da linha lateral para emissores tipo microtubo

Já quando o diâmetro interno da linha lateral for de 19,7 mm o Le passa a ser de 0,602 m, resultando comprimento máximo da linha lateral de 124m. Deste modo, para uma redução do Le de 17,65% (de 0,731m para 0,602 m) com acréscimo no comprimento máximo da linha é de 210 % (de 40 m para 124 m). Quando avaliado, para esses mesmo parâmetros, o Conector D, essa redução do Le é de 31,64 %, ocasionando um aumento no comprimento máximo da lateral de 40 para 128 m (220 %). No caso do Conector E, o valor do Le = 0,819 m para Di = 10 mm, com comprimento máximo de 40 m na linha lateral, e para o Di = 19,7 mm o Le = 0,646 m, resultando em um comprimento máximo da lateral de 124 m, isto, resulta em redução do Le de 21,12 % com acréscimos no comprimento máximo da linha de 210 %.

4.2.3 Dimensionamento da linha de derivação utilizando os diferentes tipos de conectores disponíveis na base de dados do modelo

Neste procedimento de cálculo, para dimensionamento da linha de derivação, foram utilizados dados de entrada referentes à declividade do terreno – So (%), comprimento da linha de derivação – L (m), pressão na entrada da linha – H (m.c.a.), máxima variação de pressão – Hvar (%), valor determinado na Etapa 3 como critério de projeto, separação entre as linhas laterais – SL (m), distância do início até a primeira linha lateral – SL1(m) e a vazão de cada linha lateral, parâmetro calculado na Etapa 3 do modelo, e que foi tomado como constante para o cálculo do dimensionamento da linha em todos os conectores analisados.

Quando iniciado o cálculo para o dimensionamento da linha de derivação, foi necessário selecionar entre os diferentes tipos de conectores existentes na base de dados do modelo, os que foram utilizados na pesquisa de Vilaça (2012) e que permitem determinar as perdas localizadas, na passagem direta e lateral, ocasionadas pela inserção do conector na linha de derivação. Desse mesmo modo, selecionou-se um conjunto de tubulações que permitiram dimensionar os diâmetros possíveis a serem utilizados para o comprimento estimado da linha.

Na Tabela 12 são mostrados os resultados dos cálculos do dimensionamento da linha de derivação utilizando os diferentes conectores. Para o Conector 1 as perdas localizadas de carga, referentes as perdas na conexão (Hfl-c), na passagem direta e lateral, foram calculadas em 6,97, 2,99 e 2,99 m.c.a. para o terreno em nível, aclive de 1 % e declive de 1 %, respectivamente, valores que representam ate 56,4% do valor da perda de carga total da linha de derivação, determinada em 12,37 m.c.a., para quando em nível.

Tabela 12 - Resultados dos cálculos do dimensionamento da linha de derivação utilizando os diferentes tipos de conectores

Parâmetros	Conector 1			Conector 2			Conector 3			Conector 4			Conector 5		
	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive	Nível	Active	Declive
So (%)	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
QL (L/h)	774,68	774,68	774,68	774,68	774,68	774,68	774,68	774,68	774,68	774,68	774,68	774,68	774,68	774,68	774,68
SL (m)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
L (m)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
HS (m.c.a.)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Hvar _{DER} (%)	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
Hinicial (m.c.a.)	38,39	39,96	39,84	38,74	39,99	39,87	38,70	39,99	39,87	38,72	39,99	39,87	38,81	40,00	39,88
Hfinal (m.c.a.)	27,63	27,54	41,70	28,67	28,55	42,68	28,42	28,43	42,59	28,51	28,46	42,62	29,10	28,70	42,86
Hf _{trecho} (m.c.a.)	5,29	2,19	2,19	6,07	2,19	2,19	6,07	2,19	2,19	6,07	2,19	2,19	6,07	2,19	2,19
Hf _c (m.c.a.)	6,97	2,99	2,99	5,12	2,02	2,02	5,37	2,10	2,10	5,29	2,07	2,07	4,69	1,83	1,83
Hf _R (m.c.a.)	0,11	0,20	0,20	0,14	0,20	0,20	0,14	0,20	0,20	0,14	0,20	0,20	0,14	0,20	0,20
Hf _{T_{total}} - PLC (m)	12,37	5,38	5,38	11,33	4,41	4,41	11,58	4,49	4,49	11,49	4,46	4,46	10,90	4,22	4,22
Hf _{T_{total}} (m)	7,10	2,27	2,27	6,76	2,24	2,24	6,79	2,25	2,25	6,77	2,24	2,24	6,68	2,23	2,23
NL	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
D1 (mm)	48,1	97,6	97,6	48,1	97,6	97,6	48,1	97,6	97,6	48,1	97,6	97,6	48,1	97,6	97,6
D2 (mm)	37,5	72,5	72,5	37,5	72,5	72,5	37,5	72,5	72,5	37,5	72,5	72,5	37,5	72,5	72,5
D3 (mm)	-	48,1	48,1	-	48,1	48,1	-	48,1	48,1	-	48,1	48,1	-	48,1	48,1
D4 (mm)	-	37,5	37,5	-	37,5	37,5	-	37,5	37,5	-	37,5	37,5	-	37,5	37,5
L1 (m)	42	6	6	36	6	6	36	6	6	36	6	6	36	6	6
L2 (m)	48	24	24	54	24	24	54	24	24	54	24	24	54	24	24
L3 (m)	-	24	24	-	24	24	-	24	24	-	24	24	-	24	24
L4 (m)	-	36	36	-	36	36	-	36	36	-	36	36	-	36	36

Já quando desconsideradas as perdas localizadas de carga o valor da perda de carga na linha lateral diminuiu para 7,10 m.c.a., o que ocasionaria um dimensionamento errado do sistema de irrigação quando negligenciadas essas perdas.

Quando realizado o cálculo para os outros conectores, as perdas localizadas de carga apresentaram valores de 5,12, 5,37, 5,29 e 4,69 m.c.a., para os conectores 2, 3, 4, e 5 respectivamente, mantendo assim, um valor superior a 40% das perdas totais de carga na linha de derivação. Portanto, quando desconsideradas as perdas ocasionadas pela inserção do conector na linha, o ajuste dos diâmetros utilizados no dimensionamento da linha não é preciso, pois se considera uma menor perda de carga unicamente causada pelo número de saídas na tubulação, mas não pela obstrução que o conector produz na passagem do fluido.

5 CONCLUSÕES

O modelo computacional para dimensionamento da subunidade em irrigação localizada mostrou-se eficiente no seu objetivo de dimensionar a subunidade em irrigação por gotejamento, desde o cálculo das necessidades hídricas da cultura como no dimensionamento do sistema, relativamente ao comprimento máximo da linha lateral, considerando as perdas localizadas de carga para os diferentes tipos de emissores e conectores, e ao cálculo da linha de derivação considerando, igualmente, os conectores utilizados na inserção da linha lateral na linha de derivação.

O modelo permite realizar as comparações do dimensionamento da subunidade considerando e desconsiderando as perdas localizadas de carga, possibilitando observar as diferenças resultantes no dimensionamento da subunidade quando negligenciadas estas perdas.

Com as avaliações realizadas pode-se concluir também, que o modelo ajustou-se aos modelos matemáticos desenvolvidos para a determinação das perdas localizadas de carga o que permitiu, para o dimensionamento da linha lateral, estimar que, quando desconsideradas as perdas localizadas de carga, pode se chegar a dimensionamentos da linha lateral com acréscimos no seu comprimento de até 69,88% para os emissores tipo bóbi, 101,21% para os tipo pastilha, 14,63% para os tipo conexão online e de 24% para os conectores quando utilizado o microtubo.

A variação da perda localizada de carga (Le), em função do diâmetro da linha lateral (Di), mostrou-se mais sensível para os emissores tipo bóbi, alcançando valores de 66,21 % (NaanTif), quando da variação do Di dentro do domínio da função. Já no caso dos emissores conexão on-line foi de 61,32 % (Katif), dos emissores tipo pastilha (Uniram) de 50,88 % e dos emissores tipo microtubo de 31,64 % (Conector D).

Em termos do comprimento máximo da linha lateral, a variação em função do Di , mostrou-se maior para o emissor tipo conexão on-line (Katif) com valor de 237,35 %, do emissor tipo bóbi (NaanTif) de 237,21 %, do emissor tipo pastilha (Tiran) de 194,29 % e de 220 % para o emissor tipo microtubo (Conector D), mostrando, com isso, a importância da perda localizada de carga, ocasionada pela inserção do emissor na linha, no dimensionamento da linha lateral.

A consideração da perda de carga localizada, no dimensionamento da linha de derivação, permite um ajuste melhor dos diâmetros a serem utilizados no dimensionamento desta linha, proporcionando assim, a menor variação possível de carga de pressão na entrada das laterais.

REFERÊNCIAS

AL-AMOUND, A.I. Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 60, n. 1, p. 1-5, 1995.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVES, P.R.V.; PORTO, R.M. Coeficiente geométrico para estimativa da perda de carga localizada em linhas laterais de irrigação por gotejamento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.22, n.1, p.51-59, 2002.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Design and installation of microirrigation systems**: ASABE standards 2003, EP405.1 Apr1988 (R2008). St. Joseph, 2008. 5p.

AZEVEDO, H.J.; BERNARDO, S.; RAMOS, M.M.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R. Influência de elementos do clima e da pressão de operação do aspersor no desperdício de água, em um sistema de irrigação por alta pressão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.4, p.53-62, 1999.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental study on flow resistance Law for small-diameter plastics types. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.121, n.5, p.131-316, 1995.

_____. Evaluating pressure losses in drip-irrigation line. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 123, n. 1, p. 1-7, 1997.

BERNARDO, S.; SOARES, S.; MANTOVANI, E. **Manual de irrigação**.8.ed. Viçosa: UFV, 2009. 625p.

BERNUTH, R.D. von. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.116, n.2, p. 294-298, 1990.

BLANEY, H.F.; CRIDDLE, W.D. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data**. Washington: USDA, 1950. 48p.

BOMBARDELLI, F.A.; GARCÍA, H. Hydraulic design of large-diameter pipes. **Journal of Hydraulics Engineering**, New York, v. 129, n. 11, p. 839-846, 2003.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **A irrigação no Brasil**: situação e diretrizes. Brasília: IICA, 2008. 132p.

_____. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil** 2009. Brasília, 2009. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/srh_su_i.htm>. Acesso em: 10 dez. 2012.

BROUWER, C.; HEIBLOEM, M. **Irrigation water management: irrigation water needs**. Roma: FAO, 1986. 102p. (Manual de Treinamento, 3).

BURT, C.M.; CLEMMENS, A.J.; STRELKOFF, T.S.; SOLOMON, K.H.; BLIESNER, R.D.; HARDY, L.A.; HOWELL, T.A.; EISENHAUER, D.E. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.123, n.6, p.423- 442, 1997.

CARDOSO, G.G.G. **Índice geométrico na determinação da perda de carga localizada em conexão de emissores sobre tubos de polietileno de pequenos diâmetros**. 2007. 65p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

DASBERG, S.; OR, D. **Drip irrigation**. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 163p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1975. 179p. (FAO.Irrigation and DrainagePaper, 24).

FRIZONE, J.A.; VIEIRA, A.T.; PAZ, V.P. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 278-283, 1998.

FRIZZONE, J.A.; FREITAS, P.S.L. de; REZENDE, R.; FARIA, M.A. de. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2012. 356p.

GILLESPIE, V.A.; PHILLIPS, A.L.; WU, P. Drip irrigation design equations. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 105, n. 3, p. 247-58, 1979.

GOMES, A.W.A. **Perda de carga em gotejadores integrados em tubos de polietileno**. 2009. 62p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

GOMES, A.W.A.; FRIZZONE, J. A.;RETORE NETO, O.; MIRANDA, J.H.Perda de carga em gotejadores integrados em tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 435-446, maio/jun. 2010.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Newak,v.108, n.3, p.225-230, 1982.

HART, W.E.; PERI, G.; SKOGERBOE, G.V. Irrigation performance: an evaluation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Ontário,v. 105, n.3, p.275-288, 1979.

JUANA,L.; RODRIGUES-SINOBAS, L.; LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. I: Methodology. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 128, n. 6, p. 376-384, 2002a.

_____. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. II: Experimental study and validation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 128, n. 6, p. 385-396, 2002b.

KAMAND, F. Hydraulic factors for pipe flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.114, n.2, p. 311-323, 1988.

KELLER, J.; BLIESNER, I.D. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.

KINCAID, D.C.; HEERMANN, D.F. Pressure distribution on a center pivot sprinkler irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 13, n. 11, p. 558, 1970.

LOPEZ, J.R.; HERNÁNDEZ A.J.M.; PÉREZ R.A.; GONZÁLEZ H.J.F. **Riego localizado**. 2 ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1997. 405p.

LÓPEZ-URREA R.; MARTÍN DE SANTA OLALLA, F.; FABEIRO, C.; MORATALLA, A. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. **Agricultural Water Management**, New York, v. 85, p. 15–26, 2006.

MELO, L.J.V.; SILVA, E.L.; FARIA, M.A. de. Perda de carga em conectores utilizados em sistemas de irrigação localizada. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. esp., p. 205-214, 2000.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, Cambridge, v.19, p.205-234, 1965.

MUKHERJI, A. FACON, T.; BURKE, J.; DE FRAITURE, C.; FAURÈS, J.-M.; FÜLEKI, B.; GIORDANO, M.; MOLDEN, D.; SHAH, T. **Revitalizing Asia's irrigation: to sustainably meet tomorrow's food needs**. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute; Rome: FAO, 2009. 39p.

OLIVEIRA, A.M.S.; PORTO FILHO, F.Q; MEDEIROS, J.F. de; COSTA, M.C. Caracterização hidráulica do tubo gotejador hidrorip II. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.483-486, 2000.

PALAU-SALVADOR, G.; SANCHIS, L.H.; GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; ARVIZA-VALVERDE, J. Real local losses estimation for on-line emitters using empirical and numerical procedures. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.132, n.6, p.522-530, 2006.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings Royal Society of London**, London, v. A193, p.120-146, 1948.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. São Carlos: USP, EESC, 1998. 540p.

PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental analysis of local pressure losses formicroirrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 130, n. 4, p. 318-324, 2004.

PROVENZANO, G.; PUMO, D.; DIDIO, P. Simplified procedure to evaluate head losses in drip irrigation lateral. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 131, n. 6, p. 525-532, 2005.

RETORE NETO, O.; FRIZZONE, J.A.; MIRANDA, J.H.; BOTREL, T.A. Perda de carga localizada em emissores não coaxiais integrados a tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29. n. 1, p. 28–39, 2009.

ROMEO, E.; ROYO, C.; MONZÓN, A. Improved explicit equation for estimation of the friction factor in rouge and smooth pipes. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v.86, n.3, p. 369-374, 2002.

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

SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.112, p.242-253, 1986.

SMITH, M.; ALLEN, R.G.; MONTEITH, J.L.; PERRIER, A.; PEREIRA, L.S.; SEGEREN, A. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for predictions of crop water requirements**. Rome, FAO, 1991. 45p.

SONNAD, J.R.; GOUDAR, C.T. Turbulent flow friction factor calculation using a mathematically exact alternative to the Colebrook-White equation. **Journal of Hydraulics Engineering**, New York, v.132, n.8, p.863-867, 2006.

SWAMEE, P.K. Design for a submarine pipeline. **Journal of Transportation Engineering**, New York, v. 119, n. 1, p. 159–170, 1993.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographic Review**, New York, v.38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; WILM, H.G. Report of the committee on evapotranspiration and transpiration 1943-1944. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v.25, pt. 5, p.686-693, 1944.

VILAÇA, F.N. **Perda de carga em conectores iniciais da irrigação localizada**. 2012. 65p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

VILELA, L.A.A.; SOCCOL, O.J.; GERVÁZIO, E.S.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A. Alteração no diâmetro de tubos de polietileno submetidos a diferentes pressões. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p.182-185, 2003.

YILDIRIM, G. An assessment of hydraulic design of trickle laterals considering effect of minor losses. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.56, n.4, p. 399-421, 2007.

_____. Total energy loss assessment for trickle laterals lines equipped with integrated in-line and on-line emitters. **Irrigation Science**, New York, v. 28, n. 4, p. 341-352, 2010.

YITAYEW, M. Simplified method for sizing laterals with two or more diameters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 135, n. 1, p. 111-114, 2009.

YOO, D.H.; SINGH, V. P. Two methods for the computation of commercial pipe friction factors. **Journal of the Hydraulics Division ASCE**, New York, v.131, n. 8, p. 694-704, 2005.

ZAYANI, K.A.A.; LEBDI, F.; LAMADDALENA, N. Design of drip line in irrigation systems: using the energy drop ratio approach. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 44, n. 5, p. 1127-1133, 2001.

ZITTERELL, D.B. **Perda localizada de carga em conectores utilizados em microirrigação**. 2011. 65p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

ZITTERELL, D.B.; FRIZZONE, J.A.; RETORE NETO, O. Perda de carga em microtubos e conectores utilizados em microaspersão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 591–604, out./dez. 2009.

ANEXOS

ANEXO A –Tabela do comprimento máximo da linha lateral para emissor tipo microtubo

L (m)	A	A x L	V/L	hfl (m)	hl (m)	q (L/h)
4	0,0001	0,0005	0,0417	0,294822	16,70518	32,83603
8	0,0004	0,0031	0,0833	0,568044	16,43196	32,5475
12	0,0008	0,0095	0,125	0,820373	16,17963	32,27905
16	0,0013	0,0208	0,1667	1,052526	15,94747	32,03033
20	0,0019	0,0386	0,2083	1,265228	15,73477	31,80098
24	0,0026	0,0636	0,25	1,459214	15,54079	31,59054
28	0,0035	0,0972	0,2917	1,635226	15,36477	31,39855
32	0,0044	0,1405	0,3333	1,794019	15,20598	31,22446
36	0,0054	0,194	0,375	1,93636	15,06364	31,06768
40	0,0065	0,2592	0,4167	2,063025	14,93698	30,92759
44	0,0077	0,337	0,4583	2,174804	14,8252	30,80351
48	0,0089	0,4282	0,5	2,272504	14,7275	30,6947
52	0,0103	0,5335	0,5417	2,356944	14,64306	30,60038
56	0,0117	0,6541	0,5833	2,428963	14,57104	30,51974
60	0,0132	0,7908	0,625	2,489417	14,51058	30,45191
64	0,0148	0,9446	0,6667	2,539187	14,46081	30,39596
68	0,0164	1,1159	0,7083	2,579174	14,42083	30,35095
72	0,0181	1,3061	0,75	2,610314	14,38969	30,31586
76	0,0199	1,5154	0,7917	2,633571	14,36643	30,28962
80	0,0218	1,7448	0,8333	2,649956	14,35004	30,27113
84	0,0238	1,9958	0,875	2,660529	14,33947	30,25919
88	0,0258	2,2678	0,9167	2,666422	14,33358	30,25253
92	0,0279	2,5631	0,9583	2,66887	14,33113	30,24977
96	0,03	2,881	1	2,669297	14,3307	30,24928

ANEXO B –Variação do Le e do comprimento máximo da linha lateral em função de diferentes diâmetros, para os emissores existentes no modelo

Emissores in-line tipo pastilha

Uniram			Tiran			Twin Plus			Drip net		
Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)	Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)	Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)	Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)
14,4	0,759	92	11,0	0,421	70	13,3	0,630	96	13,3	0,556	106
15,2	0,653	103	13,0	0,289	97	14,4	0,512	114	14,4	0,458	124
15,5	0,621	108	14,4	0,238	117	15,2	0,452	127	15,2	0,406	138
16,0	0,575	115	15,2	0,216	129	15,5	0,433	131	15,5	0,390	143
17,4	0,476	136	17,4	0,173	165	17,4	0,343	164	17,4	0,312	178
19,7	0,373	173	19,7	0,144	206	19,7	0,275	207	19,7	0,251	225

Emissores on-line tipobóbi

NaanTif			Naan PC			Amanco Drip AC			Amanco Drip		
Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)	Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)	Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)	Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)
10	0,219	43	13	0,415	61	13,7	0,628	87	13	0,242	61
13	0,134	70	13,3	0,392	64	14,4	0,543	97	13,3	0,231	64
13,3	0,129	73	14,4	0,327	74	15,2	0,471	108	14,4	0,199	74
14,4	0,114	84	15,2	0,292	82	15,5	0,449	112	15,2	0,182	81
17,4	0,087	117	17,4	0,228	106	17,4	0,3487	140	17,4	0,147	104
19,7	0,074	145	19,7	0,186	132	19,7	0,277	177	19,7	0,123	129

Emissores conexão on-line

Microjet			Click Tif - PC			Katif		
Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)	Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)	Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)
10	0,141	74	10	0,216	79	10	0,288	83
13	0,100	118	13	0,145	127	13	0,182	134
13,3	0,098	122	13,3	0,141	132	13,3	0,177	139
14,4	0,090	141	14,4	0,128	152	14,4	0,159	161
17,4	0,074	196	17,4	0,103	212	17,4	0,127	225
19,7	0,066	244	19,7	0,091	264	19,7	0,111	280

Emissores tipo microtubo

Conector A			Conector D			Conector E		
Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)	Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)	Di (mm)	Le (m)	Comp. Máx. (m)
10	0,731	40	10	0,572	40	10	0,819	40
13,3	0,651	64	13,3	0,455	64	13,3	0,707	64
14,4	0,638	72	14,4	0,437	76	14,4	0,690	72
15,2	0,630	80	15,2	0,427	80	15,2	0,680	80
17,4	0,614	100	17,4	0,406	104	17,4	0,660	100
19,7	0,602	124	19,7	0,391	128	19,7	0,646	124

ANEXO C– Tabela do dimensionamento da linha de derivação para o conector 1

Trecho	Lj	L	Acumulado	Vazão	Trecho	Desnível	D teórico	D ajustado	Hfd trecho	Hfi conexão	Hfi redução	Hf total	Carga disponível	Saldo carga	Carga pressão
0-1	6	6	0,0032	0	42,4	48,1	0,5338	0,941	0	1,475	0	1,475	0	-1,475	38,5247
1-2	6	12	0,003	0	41,8631	48,1	0,467	0,8117	0	1,2787	0	1,2787	0	-1,2787	37,246
2-3	6	18	0,0028	0	40,6404	48,1	0,4047	0,6922	0	1,0968	0	1,0968	0	-1,0968	36,1492
3-4	6	24	0,0026	0	39,3598	48,1	0,3467	0,5827	0	0,9295	0	0,9295	0	-0,9295	35,2197
4-5	6	30	0,0024	0	38,0135	48,1	0,2932	0,4833	0	0,7765	0	0,7765	0	-0,7765	34,4431
5-6	6	36	0,0021	0	36,5915	48,1	0,2441	0,3938	0	0,6379	0	0,6379	0	-0,6379	33,8052
6-7	6	42	0,0019	0	35,0814	48,1	0,1995	0,314	0	0,5135	0	0,5135	0	-0,5135	33,2917
7-8	6	48	0,0017	0	33,467	48,1	0,1593	0,2437	0	0,4031	0	0,4031	0	-0,4031	32,8886
8-9	6	54	0,0015	0	31,7263	48,1	0,1236	0,1829	0	0,3065	0	0,3065	0	-0,3065	32,5821
9-10	6	60	0,0013	0	29,8291	48,1	0,0923	0,1313	0	0,2236	0	0,2236	0	-0,2236	32,3585
10-11	6	66	0,0011	0	27,7312	48,1	0,0655	0,0888	0	0,1542	0	0,1542	0	-0,1542	32,2043
11-12	6	72	0,0009	0	25,3632	48,1	0,0431	0,0549	0	0,0981	0	0,0981	0	-0,0981	32,1062
12-13	6	78	0,0006	0	22,6063	48,1	0,0253	0,0296	0	0,0549	0	0,0549	0	-0,0549	32,0512
13-14	6	84	0,0004	0	19,2217	48,1	0,0121	0,0124	0	0,0245	0	0,0245	0	-0,0245	32,0268
14-15	6	90	0,0002	0	14,5673	48,1	0,0035	0,0028	0	0,0063	0	0,0063	0	-0,0063	32,0205

ANEXO D – Relatório final de dimensionamento da subunidade

RELATÓRIO FINAL DE DIMENSIONAMENTO DA SUBUNIDADE									
Informações do Projeto:								Data: 18/02/2013	
Nome do Projeto:		Exemplo							
Projetista:		Christian Mendoza							
Código da Subunidade:		LEB							
Área da Subunidade (ha):		5							
Dados Agronômicos:									
Cultura:		Cana de açúcar		IRNmáx:		3,549		mm	
ETc:		5,902875		mm/dia		ITN:		4,6827	
mm/dia									
Linha Lateral:									
Emissor selecionado:		Microtubo							
Considerando as PLC:					Desconsiderando as PLC:				
Desnível-So:		Nível		%		Desnível-So:		Nível	
Carga de pressão na entrada-H:		17		m.c.a		Carga de pressão na entrada-H:		17	
Separação entre emissores-Se:		4		m		Separação entre emissores-Se:		4	
Comprimento máximo da linha:		104		m		Comprimento máximo da linha:		114	
Diâmetro da linha:		17,4		mm		Diâmetro da linha:		17,4	
Perda de carga-Hf:		2,8245		m		Perda de carga-Hf:		3,7319	
m						m			
Linha de Derivação:									
Tubulação selecionada:		LF PN 40 PBL							
Considerando as PLC:					Desconsiderando as PLC:				
Desnível-So:		Nível		%		Desnível-So:		Nível	
Carga de pressão na entrada-H:		17		m.c.a		Carga de pressão na entrada-H:		40	
Separação entre emissores-Se:		6		m		Separação entre emissores-Se:		6	
1		2		3		4		1	
2		3		4		1		2	
3		4		1		2		3	
4		1		2		3		4	
L-'s (m):		42		48		L-'s (m):		42	
D-'s(mm):		48,1		35,7		D-'s(mm):		48,1	
Perda de carga-Hf:		10,4603		m		Perda de carga-Hf:		6,3681	
m						m			
Considerações Finais									
A consideração das PLC num projeto de irrigação localizada é um critério de muita importancia, especialmente em irrigação por gotejamento, portanto, neste projeto, se desconsideradas as PLC, o comprimento máximo da linha lateral será superestimado em 9,62 %									