REVISTA BRASILEIRA DE AGRICULTURA IRRIGADA

Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.2, n.1, p.16–23, 2008
ISSN 1982-7679 (On-line)
Fortaleza, CE, INOVAGRI – http://www.inovagri.org.br
Protocolo 007.08 – 05/02/2008 Aprovado em 06/10/2008

BASES TEÓRICAS E FUNDAMENTOS PARA A OTIMIZAÇÃO HIDRÁULICA DO COMPRIMENTO DE LINHAS LATERAIS EM MICROIRRIGAÇÃO

EURO ROBERTO DETOMINI[1]; JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE[2]

[1] ESALQ/USP, Depto Eng. Rural. Av. Pádua Dias, 11. Piracicaba-SP, 13418-900, Brasil. detomini@esalq.usp.br
[2]ESALQ/USP, Depto Eng. Rural. Av. Pádua Dias, 11. Piracicaba-SP, 13418-900, Brasil. frizzone@esalq.usp.br

RESUMO: O dimensionamento de linhas laterais consiste em um dos primeiros passos para a elaboração de projetos de microirrigação, sendo que a economicidade destes está intimamente ligada ao máximo comprimento que essas linhas laterais podem assumir em função dos critérios hidráulicos e de uniformidade. Existem diferentes modelos hidráulicos para a otimização hidráulica das linhas laterais em função do perfil de pressão existente e, não obstante, diferentes métodos de cálculo podem ser requeridos para uma solução ótima. Este trabalho tem como objetivo retomar as bases teóricas acerca deste assunto e discutir as peculiaridades dos procedimentos de cálculo através do uso do programa computacional MÁXIMO L.
Palavras-chave: métodos numéricos, perfil de pressão, dimensionamento, MÁXIMO L

THEORETICAL BASIS AND ASSESSMENT FOR HYDRAULIC OPTIMISATION OF LATERALS IN MICRO-IRRIGATION

ABSTRACT: The design of lateral lines is one of the first steps when elaborating micro-irrigation projects so that the economic suitability of them is closely linked to the biggest length that these laterals might achieve from both hydraulic and uniformity criteria. There are different hydraulic models according to different pressure profiles and, notwithstanding; different numerical methods might be required in order to obtain an optimal solution when the same model is considered. This work intends to highlight the theoretical basis of this approach and also bring a discussion about the calculation peculiarities through software MAXIMO L.
Keywords: Numerical methods, pressure profile, design, MAXIMO L

[1]ESALQ/USP, Depto Eng. Rural. Av. Pádua Dias, 11. Piracicaba-SP, 13418-900, Brasil. detomini@esalq.usp.br
[2]ESALQ/USP, Depto Eng. Rural. Av. Pádua Dias, 11. Piracicaba-SP, 13418-900, Brasil. frizzone@esalq.usp.br

INTRODUÇÃO

O perfil de pressão ao longo de uma linha lateral é uma importante característica dos projetos de irrigação, pois nos fornece, nesta etapa, um “mapeamento” da pressão existente em cada emissor e, conseqüentemente, a uniformidade de dimensionamento da linha lateral, principal atributo relacionado à redução do rendimento de culturas irrigadas (BHATNAGAR e SRIVASTAVA, 2003). O perfil de pressão, na fase de dimensionamento, é determinado principalmente pelas condições de declividade do solo e pelos critérios de projeto admitidos para a máxima variação relativa de pressão ou de vazão (WU et al., 1982). A análise reunida desses atributos permite calcular o máximo comprimento que a linha lateral pode assumir, ressaltando em geral que, quanto maior esse valor, mais barato se torna o projeto.

De acordo com Gillespie et al. (1979), os perfis de pressão podem ser classificados em: i) Tipo I, caracterizado por uma linha lateral posicionada em aclive ou nível, com pressão mínima no final da linha; ii) Tipo II-a, declive fraco, com pressão mínima ocorrendo depois da metade do comprimento total da linha lateral; iii) Tipo II-b, declive moderado, com pressão mínima ocorrendo exatamente na metade do comprimento total da linha lateral; iv) Tipo II-c, declive forte, com pressão mínima ocorrendo antes da metade do comprimento total da linha lateral; e v) Tipo III, declive muito forte, com pressão mínima já no início.

Apenas as situações em que o perfil de pressão se apresenta como Tipo I em nível ou Tipo II-b definem equações analiticamente solucionáveis para o cálculo do comprimento ótimo da linha lateral. Os demais perfis definem equações que exigem solução numérica, em certos casos de difícil convergência, ou que apresentam resultados ambíguos, vindo a justificar a necessidade de se dispor de diferentes métodos numéricos para tal execução.

Este trabalho tem como objetivo trazer à luz as bases teóricas que fornecem subsídios para a otimização hidráulica do comprimento de linhas laterais; e simular, através do programa computacional MÁXIMO L (que dispõe dos métodos da bissecção, secante e Newton-Raphson), o valor ótimo das mesmas em projetos contemplando diferentes situações de uniformidade e de topografia; bem como discutir e exteriorizar o potencial de uso e as limitações deste programa, de acordo com os resultados obtidos.

MATERIAL E MÉTODOS

A modelagem do programa computacional MÁXIMO L, elaborado em Visual Basic, é baseada nas assunções preconizadas por Gillespie et al. (1979) e Wu et al. (1982), as quais estão alicerçadas nos locais de ocorrência das pressões mínima e máxima, no teorema de Bernoulli e em equações de perda de carga. O programa assim se baseia, para o cálculo da pressão (H_i, m) em um ponto qualquer da lateral à uma distância “i” do seu início:

$$H_i = H - \left[1 - (1 - CR)^{m+1}\right] \cdot Hf' + CR \cdot \Delta Z \qquad (1)$$

em que: H se refere à pressão de entrada (m) na linha lateral; m se refere ao parâmetro-expoente da vazão (proveniente da equação universal de perda de carga); CR ao comprimento relativo do trecho ou segmento; Hf' à perda de carga (m) total ao longo da lateral; e ΔZ à diferença de nível (m) entre o início e o final da lateral. Ressaltando ainda que:

$$CR = 1 - \left(\frac{So}{KK \cdot L^m \cdot (m+1)} \right)^{\frac{1}{m}} \qquad (2)$$

$$\Delta Z = So \cdot L \qquad (3)$$

$$Hf' = JJ \cdot L \qquad (4)$$

$$JJ = KK \cdot L^m \qquad (5)$$

$$KK = \frac{K \cdot q^m}{360000^m \cdot (m+1) \cdot D^n} \cdot \left(\frac{Se + Le}{Se^{m+1}} \right) \qquad (6)$$

$$H_{\text{var}} = \frac{H_{máx} - H_{mín}}{H_{máx}} \qquad (7)$$

$$H_{\text{var}} = 1 - (1 + 0.01 \cdot vrq_p)^{-1/x} \qquad (8)$$

em que: L se refere ao máximo comprimento (m) da linha lateral; So à inclinação do terreno (adimensional); *KK* à uma constante generalizada; *K* à constante da equação de perda de carga (considerando a tubulação sem a presença de emissores); *Se* ao espaçamento (m) entre emissores; *Le* ao comprimento equivalente (m) referente ao efeito da conexão; *q* à vazão de projeto (L h^{-1}) dos emissores da lateral; *n* ao parâmetro-expoente do diâmetro; *JJ* à perda de carga unitária (m), considerando o efeito da vazão e das conexões sobre a lateral; H_{var} à máxima variação relativa de pressão admitida para projeto; $H_{máx}$ e $H_{mín}$ à máxima e mínima pressão (m) existente na lateral, respectivamente; e vrq_p à diferença percentual (%) entre a máxima e a mínima vazão de projeto ao longo da linha lateral (critério de uniformidade).

Estando a tubulação lateral em nível (ΔZ = 0) ou aclive (perfil Tipo I), torna-se evidente que a pressão de entrada na linha lateral será a máxima ($H = H_{máx}$), sempre maior que a pressão em qualquer posição posterior da linha, já que nunca haverá ganho de energia potencial. Conseqüentemente, a pressão mínima ocorrerá sempre no final da linha lateral ($H_i = H_{mín}$). Considerando essas premissas, a eq. (1) se torna:

$$H_{mín} = H_{máx} - Hf' - \Delta Z \qquad (9)$$

Dividindo a equação acima por $H_{máx}$, e rearranjando-a de forma conveniente:

$$\frac{H_{máx} - H_{mín}}{H_{máx}} = \frac{Hf' + \Delta Z}{H_{máx}} \qquad (10)$$

Substituindo a eq. (7) na eq. (9), e na seqüência substituindo, na equação resultante, o pressuposto $H = H_{máx}$, e finalmente dividindo por L, tem-se:

$$\frac{H \cdot H_{var}}{L} = \frac{Hf'}{L} + \frac{\Delta Z}{L} \qquad (11)$$

Substituindo as equações (3) e (4) na equação acima, e considerando a eq. (5):

$$L \cdot \left(KK \cdot L^m + So\right) - H \cdot H_{\mathrm{var}} = 0 \qquad (12)$$

A eq. (12) é o modelo hidráulico que determina o máximo comprimento que a linha lateral pode assumir em uma situação de nível ou aclive, não sendo necessário assumir um valor negativo ou positivo para *So* (é só substituí-lo pelo valor absoluto – implícito na dedução). Se o terreno não apresentar declividade (*So* = 0), a eq. (12) é simplificada e pode ser resolvida analiticamente, caso contrário necessita de um método numérico de resolução.

Entretanto, para os casos de declive, o dimensionamento é um pouco mais complexo porque o grau de inclinação (declive fraco, forte, etc.) não é conhecido *a priori*, já que dependerá dos ganhos (por energia potencial) e perdas (por fricção) existentes ao longo da lateral. Não somente a modelagem hidráulica se torna mais complexa nos casos de declive como as próprias equações, em alguns casos, são de difícil resolução.

O perfil Tipo II-a poderá ocorrer em situações muito particulares, onde há menos perda de pressão devido ao atrito do que ganho de pressão devido à diferença de nível ocorrente ao longo da linha. Neste caso, a máxima pressão deverá ocorrer no início da linha lateral ($H = H_{máx}$). A eq. (1) pode ser então reescrita da seguinte forma:

$$H_{mín} = H_{máx} - \left[1 - (1 - CR)^{m+1}\right] \cdot Hf' + CR \cdot \Delta Z \qquad (13)$$

Após várias manipulações algébricas, analogamente ao feito para o Perfil Tipo I, chega-se à equação que permite calcular o máximo comprimento da lateral para o Perfil Tipo II-a:

$$L \cdot \left\{\left[1 - (1 - CR)^{m+1}\right] \cdot KK \cdot L^m - CR \cdot So\right\} - H \cdot H_{\mathrm{var}} = 0 \qquad (14)$$

A eq. (14) apresenta certa complexidade de convergência, e serve para determinar o máximo comprimento da lateral numa situação de declive supostamente fraco. Depois de encontrado o valor de *L*, este deve ainda ser substituído na equação abaixo, a qual deverá validar ou não tal valor de acordo com a condição de ocorrência do Perfil Tipo II-a:

$$0 < \frac{S_0}{KK \cdot L^m} < 1 \qquad (15)$$

Já o Perfil Tipo II-b é de rara ocorrência, e existirá se a diferença de nível ao longo da tubulação for equivalente à perda de carga unitária, (*So* = *JJ*). A pressão mínima deve ocorrer exatamente na metade do comprimento da linha, e a pressão máxima será igual à de entrada e igual à existente no final da linha, resultando no seguinte modelo analítico:

$$L = \frac{H \cdot H_{\text{var}}}{So \cdot m \cdot (m+1)^{\frac{m+1}{-m}}} \tag{16}$$

Como $So = JJ$, a condição de ocorrência do perfil Tipo II-b será:

$$\frac{So}{KK \cdot L^m} = 1 \tag{17}$$

O perfil Tipo II-c, por ser um declive forte, deverá apresentar uma pressão mínima ocorrente em um ponto qualquer entre a metade e o início do comprimento total da linha lateral ($H_i = H_{mín}$), já que se ganha mais pressão por diferença de nível (energia potencial) do que se perde por atrito; ao passo que a pressão no final deverá ser maior (e máxima da lateral) que a de entrada, sendo $H_L = H_{máx}$. A perda de carga na tubulação deste tipo de perfil será, por definição, simplesmente Hf'. Substituindo essas premissas na eq. (1):

$$H_{máx} = H - Hf' + \Delta Z \tag{18}$$

Analogamente às manipulações algébricas realizadas para a obtenção da equação necessária à simulação do perfil Tipo I, chega-se, a partir da eq. (18), na equação que determina o máximo comprimento de laterais para o caso de perfis Tipo II-c:

$$L \cdot \left\{ So - JJ + JJ \cdot \left[1 - (1 - CR)^{m+1} \right] - CR \cdot So - H_{\text{var}} \cdot (So - JJ) \right\} - H \cdot H_{\text{var}} = 0 \tag{19}$$

A eq. (19) apresenta extrema complexidade de convergência, o que na prática se traduz em um perfil de pressão não muito comum. Depois de encontrado o valor de L (necessariamente por algum método numérico), este valor deve ser substituído na seguinte condição de ocorrência para o perfil do Tipo II-c, deduzida também em Detomini (2006):

$$1 < \frac{So}{KK \cdot L^m} < (m+1) \tag{20}$$

A diferença entre os perfis Tipo II-c e Tipo III reside no local de ocorrência da pressão mínima. Embora ambos apresentem pressão máxima no final da lateral, no primeiro caso ela ocorre entre o início e a metade da lateral, ao passo que, no segundo caso, essa pressão ocorre já no início da lateral, ou seja, é a própria pressão de entrada ($H_{mín} = H$), ressaltando que a pressão máxima ocorrerá no final da linha lateral, para ambos os casos. Dessa forma, o sistema ganha muito mais energia devido à energia potencial do que perde por atrito, conforme já exposto. Para a dedução do perfil III, reescreve-se oportunamente a eq. (18):

$$H_{máx} = H - Hf' + \Delta Z \tag{18}$$

Pela condição $H_{mín} = H$, rearranjando de forma conveniente e substituindo as equações (3) e (7) e (5), a eq. (18) é transformada, para que se encontre o valor de L em uma condição de perfil de declividade muito forte (Tipo III), através da seguinte equação:

$$L \cdot \left(S_0 - KK \cdot L^m\right) \cdot (1 - H_{var}) - H_{var} \cdot H = 0 \tag{21}$$

Cabe aqui ressaltar que a constante KK é dependente do valor da vazão de projeto, pois, como no caso do perfil Tipo III a vazão mínima ocorre já no início da linha lateral, e não em um ponto qualquer posterior, a vazão de projeto deve ser recalculada (q_r) antes que o valor de L seja encontrado, por método numérico, pela eq. (21). O programa Máximo L realiza esse procedimento de acordo com a equação universal do emissor [forma funcional descrita pela eq. (28), em que CC e x são os parâmetros da mesma]. Apenas para o Perfil Tipo III, assumindo que a vazão média seja a média aritmética entre as vazões máxima ($q_{máx}$) e mínima ($q_{mín}$), tem-se uma melhor aproximação da vazão média de dimensionamento, a qual será necessária para se recalcular o valor de L:

$$q_{mín} = CC \cdot H^x \tag{22}$$

$$q_{máx} = \frac{CC \cdot H^x}{(1 - H_{\text{var}})^x} \tag{23}$$

$$q_r = \frac{q_{máx} + q_{mín}}{2} \tag{24}$$

Depois de recalculada a vazão média e calculado o máximo comprimento da lateral pela eq. (21), verifica-se então se o perfil é do Tipo III caso a seguinte condição seja atendida:

$$\frac{S_0}{KK \cdot L^m} \geq (m+1) \qquad (25)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelo método da Bissecção e da Secante, é necessário o estabelecimento prévio de um intervalo no qual esteja compreendido um possível valor de *L*, ao passo que no método de Newton-Raphson, faz-se necessário assumir um valor inicial para *L* para que o procedimento iterativo seja iniciado. Uma explanação mais detalhada sobre cada método numérico é encontrada em Burden e Faiures (2004). As derivadas das funções correspondentes às equações (12), (19), (14) e (21) são necessárias para resolvê-las pelo método de Newton-Raphson, e podem ser encontradas em Detomini (2006), onde a derivada da eq. (19) é apresentada diferentemente de sua derivação original (a qual não possibilita convergência).

Ao simular o comprimento de uma linha lateral posicionada em aclive de 1%, com emissores espaçados em 2 m, vazão média de 4,2 L h^{-1} e comprimento equivalente a perda de carga nas conexões dos emissores de 0,3 m; com pressão de entrada de 12 m, e com a equação da perda de carga $hf = 261932{,}74 * L * q^{1{,}749}$ (fornecida pelo fabricante – tubulação sem emissores); e estabelecendo-se, como critério de projeto, que a máxima variação relativa de pressão admitida ao longo da linha lateral seja 8,6% (o que significa aproximadamente 5% de diferença entre a máxima e a mínima vazão na linha lateral), o programa MÁXIMO L forneceu um máximo comprimento de 79,4024 m para qualquer um dos métodos numéricos empregados, diferindo apenas quanto ao número de iterações.

Ressaltamos que, como o espaçamento entre emissores é de 2 m, o valor de *L* encontrado deve ser aproximado para um valor múltiplo de 2, e imediatamente inferior a 79,4024 m; no caso, *L* = 78 m. Mantendo-se as mesmas condições, mas assumindo um terreno em nível (mesmo perfil de pressão), o comprimento da lateral é ampliado em quase 72%, ou em quase 75% se considerarmos a readequação dos valores em função do espaçamento. Caso o intervalo utilizado (no método da bissecção, por exemplo) apresente um limite superior menor que o valor a ser encontrado, o programa não apresenta solução, após 1000 iterações. Se considerarmos um aclive de 1%, mas alterando-se o critério de projeto para 5% em termos de máxima variação relativa de pressão (sendo mais rigoroso, portanto, na uniformidade), observa-se que o comprimento da lateral se reduz para aproximadamente 33% do valor de *L* simulado para 8,6%. A Tabela 1 apresenta uma síntese dos resultados mencionados.

Tabela 1. Resultados das simulações contemplando linhas laterais em aclive (1%) ou em nível

Inclinação do terreno (%)	Máxima variação relativa de pressão admitida para projeto (%)	Método numérico de resolução	Intervalo ou valor inicial (m)	Máximo comprimento da linha lateral (m)	Número de iterações
1 (Aclive)	8,6	B	1 - 1000	79, 9284	21
1 (Aclive)	8,6	S	1 - 1000	79, 9284	7
1 (Aclive)	8,6	NR	1	79, 9284	4
1 (Aclive)	8,6	NR	10000	79, 9284	13
1 (Aclive)	5,0	NR	1	52,6238	4
0	8,6	B	1 - 1000	137, 4060	21
0	8,6	NR	1000	137, 4061	8
0	8,6	B	1-100	Não converge	1000

Legenda dos métodos: B – Bissecção; S – Secante; e NR – Newton-Raphson.

De fato, pode-se concluir que a Equação (12) é de fácil convergência para as mais diversas simulações envolvendo aclive ou nível, restando ao usuário apenas definir, com certo discernimento, os limites inferior e superior em caso de opção pelos métodos bissecção ou secante. Sugere-se que, para o caso do perfil Tipo I, o comprimento da linha lateral seja simulado em um intervalo de 1 a 1000 m. Como a pressão mínima ocorre no final da lateral, não se verifica nenhuma condição de ocorrência para este tipo de perfil.

Utilizando os mesmos valores da primeira situação (de 1% de aclive e 8,6% para H_{var}), mas simulando-se valores de comprimento de linha lateral para um declive de 2,5%, verifica-se que não há convergência quando alguns casos são propostos. Isso ocorre devido ao método numérico selecionado. Outra constatação é que uma gama de diferentes respostas pode ser obtida para a mesma situação de simulação para o máximo comprimento da lateral, podendo estes resultados ser ainda aceitos ou não, conforme as condições de ocorrência impostas para cada perfil de pressão.

Isso justifica a importância possibilidade de escolha de um dos três métodos numéricos pelo programa MÁXIMO L.

Como não se sabe, *a priori*, qual o tipo de perfil que a situação em declive denuncia, opta-se aleatoriamente pelo perfil Tipo II-c. Ao se utilizar o método da secante em um intervalo variando de 1 a 100, o programa fornece o resultado L = 60,5960 m (sendo necessário 4 iterações), ao passo que, variando-se o intervalo de 1 a 250, apresenta L = 233,4283 m (5 iterações), embora não atenda às condições de ocorrência, em ambos os casos. Desta forma, os valores encontrados não são válidos, não podendo ser assumidos para dimensionamento. Por outro lado, ao utilizarmos um intervalo de 1 a 1000 m, o programa apresenta como resposta um erro inerente ao método de cálculo (para esta situação específica), o mesmo ocorrendo ao simularmos com o método de Newton-Raphson adotando-se um valor inicial de 1 m. Se alterarmos este para 100 m, há convergência para L = 233,4283 m (21 iterações), com a ressalva de também não atender às condições de ocorrência. Logo, este valor também não deve ser assumido (Tabela 2).

Conforme o perfil selecionado, o método numérico e a condição inicial empregada, diferentes respostas podem ser apresentadas, levando-se à suspeita de que o perfil possa não ser aquele inicialmente selecionado. Isso leva a crer que o perfil de pressão não é definido apenas da declividade, embora seja caracterizado por ela, pois é também revelado pela situação específica de simulação, principalmente alterando-se o critério de uniformidade de projeto. Comprovando isso, se modificarmos o critério H_{var} para 21%, verificar-se-á convergência para L = 275,1376 m, pelos três métodos disponíveis, atendendo-se a condição de ocorrência imposta na eq. (20), revelando ser, de fato, perfil Tipo II-c (Tabela 2). Em contrapartida, se a opção é feita perfil Tipo III, mantendo-se 8,6% para H_{var}, boa parte das simulações apresenta como resposta L = 47,3743 m, em conformidade com a condição de ocorrência correspondente. Em alguns casos, não há convergência para o valor do máximo comprimento da lateral. Uma outra resposta é apresentada quando se altera o valor inicial para 500 m, no método de Newton-Raphson (Tabela 2), embora esta não atenda a condição de ocorrência do perfil Tipo III, expressa pela eq. (25).

É importante observar que, embora o perfil Tipo III seja denominado como “declive muito forte”, a expectativa seria que, ao se obter ganho de pressão ao longo da linha lateral em função da inclinação do terreno, o comprimento dessa linha devesse ser maior que o comprimento para situações de declives menores. Isso não ocorreu devido ao critério de máxima variação relativa de pressão (H_{var}), pois, quanto menor essa variação (que é estipulada pelo projetista), mais rigoroso se torna o projeto em termos de uniformidade. Pressões muito elevadas em determinados emissores elevariam de sobremaneira suas respectivas vazões, deixando de atender o critério de uniformidade. A Tabela 2 permite revelar que um determinado valor de declividade (ex.: 2,5%) pode ser tanto forte (Perfil II-c) quanto muito forte (Perfil III), dependendo das demais situações contempladas pelo projetista.

Portanto, as condições de ocorrência apresentadas nas equações (20), (15) e (25) são essenciais na aceitação dos valores encontrados nas simulações, já que as equações (19), (14) e (21), respectivamente, podem apresentar mais de uma raiz como solução (são de difícil convergência, em alguns casos), ou mesmo não confirmar as premissas de pressão mínima ao longo do perfil, o que quase sempre acontece em simulações com o perfil Tipo II-b, visto ser este de rara ocorrência. Os resultados constantes na Tabela 2 corrobora esta informação, sumarizando ainda que pequenas modificações no critério de máxima variação relativa de pressão, no método numérico de resolução ou critério inicial empregado, influenciam largamente o resultado encontrado para o máximo comprimento da lateral.

Caso não se disponha de uma equação de perda de carga específica ou da equação de perda de carga fornecida pelo fabricante (como a utilizada para a elaboração dos resultados aqui apresentados – Tabela 1 e Tabela 2), as equações de Flammant ou Universal de perda de carga com o f de Blasius (preferencialmente) podem ser selecionadas, restando ao usuário entrar com um valor específico de diâmetro. Salienta-se também que o procedimento de cálculo para o fator de múltiplas saídas (fator de Christiansen) nas simulações é simplificado para $1/(m+1)$, conforme implícito na eq. (6).

Tabela 2. Resultados das simulações contemplando linhas laterais em declive de 2,5%

H_{var} (%)	Tipo de perfil de pressão selecionado	Método numérico de resolução	Intervalo ou valor inicial (m)	Máximo comprimento da linha lateral (m)	Número de iterações	Atende à condição de ocorrência?
8,6	Tipo II-c	S	1 - 100	60,5960	4	Não
8,6	Tipo II-c	S	1 - 250	233,4283	5	Não
8,6	Tipo II-c	S	1 - 1000	Erro de método	-	-
8,6	Tipo II-c	NR	1	Erro de método	-	-
8,6	Tipo II-c	NR	100	233,4283	21	Não
8,6	Tipo II-c	B	0 - 1000	233,4284	22	Não
21,0	Tipo II-c	B	0 - 1000	275,1376	24	Sim
21,0	Tipo II-c	S	0 - 1000	275,1376	21	Sim
21,0	Tipo II-c	NR	1	275,1376	27	Sim
8,6	Tipo III	B	0 -1000	Não converge	1000	-
8,6	Tipo III	B	0 - 400	47,3743	19	Sim
8,6	Tipo III	S	0 - 400	47,3743	5	Sim
8,6	Tipo III	S	0 - 1000	47,3743	5	Sim
8,6	Tipo III	NR	1	47,3743	3	Sim
8,6	Tipo III	NR	150	Não converge	1000	-
8,6	Tipo III	NR	500	242,9676	6	Não

Legenda dos métodos: B – Bissecção; S – Secante; NR – Newton-Raphson.

Tal fator só resultaria em grandes diferenças no comprimento da lateral (ou ainda na convergência das equações) na medida em que esta viesse a apresentar um número de emissores abaixo de 20.

Quando essa situação de ordem prática ocorrer, sugere-se contorná-la assumindo-se gradativamente, na simulação, um maior valor de pressão de entrada na lateral, ou em último caso, aumentar levemente o valor de vrq_p (o que implica em ser menos rigoroso no critério de uniformidade).

Finalmente, calculado o valor de L, o comprimento relativo do ponto de inserção de cada emissor em relação ao início da lateral (CR_i) pode ser encontrado através da eq. (26), agora sob a forma finitesimal, e posteriormente substituído na eq. (1), para se obter a eq. (27):

$$CR_i = \frac{i \cdot Se}{L} \qquad (26)$$

$$H_i = H - \left[1 - (1 - CR_i)^{m+1}\right] \cdot Hf' + CR_i \cdot \Delta Z \qquad (27)$$

Como convenção para a eq. (27): i) para situações de declive (tubulação "morro abaixo"), ΔZ é positivo; ii) para situações de aclive (tubulação "morro acima"), ΔZ é negativo; e iii) para situações de nível, ΔZ é zero. Por conseguinte, calcula-se:

$$q_i = CC \cdot H_i^x \qquad (28)$$

$$q_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} q_i \qquad (29)$$

em que q_i é a vazão (L h^{-1}) dimensionada para o i-ésimo emissor; q_m é a vazão média de dimensionamento; e n é o número de emissores ($n = L / Se$).

Estando de acordo com Favetta e Botrel (2001), a uniformidade de emissão (UE, %) para efeitos de dimensionamento pode ser então obtida:

$$UE = 100 \cdot \left(1 - 1{,}27 \cdot Se^{-0,5} \cdot CVF\right) \cdot \frac{q_{25}}{q_m} \qquad (30)$$

em que *CVF* é o coeficiente de variação de fabricação do emissor, q_{25} é a média das 25% menores vazões.

Torna-se conveniente averiguar que a uniformidade de emissão de projeto seja aceita em função da aderência dos dados de vazão simulados [eq. (28)] aos dados reais obtidos, no campo, quando da implantação do projeto e também de períodos subseqüentes; bastando para tanto que haja a condição de uniformidade de inclinação do terreno, conforme as premissas teóricas conceitualizadas. Uma das principais limitações dos modelos propostos por Gillespie et al. (1979) e Wu et al. (1982) e, conseqüentemente, também pelo programa MÁXIMO L, é a de ter que assumir a declividade como sendo uniforme ao longo da lateral, questão que pode ser relativamente aceitável para algumas situações reais de campo, dependendo da região onde será implantado o projeto. Uma outra é a de ter que assumir que o comprimento equivalente (*Le*) é constante ao longo da lateral.

Trabalhos futuros podem ser feitos no sentido de agregar ao software MÁXIMO L a possibilidade de se calcular as linhas laterais diante de situações não uniformes de inclinação de terreno e de *Le* variando de acordo com o fator de atrito e da vazão, bem como de relacionar o dimensionamento hidráulico à determinação de um coeficiente de fabricação ótimo dos emissores, de acordo com a abordagem do "dimensionamento estatístico" (ANYOJI e WU, 1987; WU, 1996).

CONCLUSÕES

De acordo com a abordagem hidráulica, a classificação do perfil de pressão em declive (Tipo II-a, II-c e III.) não é determinada *a priori*, mas sim após a execução de simulações, as quais podem ser adequadamente obtidas a partir do software MAXIMO L. Um mesmo valor de declividade pode ser considerado tanto fraco quanto muito forte, dependendo dos dados de entrada como o critério de uniformidade preconizado, a pressão de entrada, ou ainda as características da tubulação. As opções de métodos numéricos disponibilizadas pelo programa MÁXIMO L são indispensáveis, tais como a verificação das condições de ocorrência, quando se deseja simular o máximo comprimento de linhas laterais para situações cuja declividade do terreno é uniforme.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANYOJI, H.; WU.I.P. Statistical approach for drip lateral design. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.30, n.1, p.187-192, 1987.

BHATNAGAR, P.R.; SRIVASTAVA, R.C. Gravity-fed drip irrigation system for hilly terraces of the northwest Himalayas. **Irrigation Science**, Berlin, v.21, p.151-157, 2003.

BURDEN, R.L.; FAIURES, J.D. **Numerical Analysis**. (8.ed.) New York: Brooks Cole, 2004. 847p

DETOMINI, E.R. Programa computacional MÁXIMO L V.1.0: dimensionamento de linhas laterais em irrigação localizada (**Manual do usuário**). Piracicaba: Divisão de Biblioteca e Documentação da ESALQ/USP. 2006. 48p.

FAVETTA, G.M.; BOTREL, T.A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação de equações. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.2, p.427-430, 2001.

GILLESPIE, A.; PHILLIPS, A.L.; WU, I.P. Drip irrigation design equations. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.105, n.3, p.247-257, 1979.

WU, I.P. An assessment of hydraulic design in micro-irrigation systems. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.32, n.3, p.275-284, 1996.

WU, I.P.; SARUWATARI, C.A.; GITLIN, H.M. Design of drip irrigation lateral length on uniform slopes. **Irrigation Science**, Berlin, v.4, n.2, p.117-135, 1982.