

MÉTODO PARA PROJETAR LINHAS LATERAIS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PAREADAS EM TERRENOS COM INCLINAÇÃO UNIFORME

Leonardo Leite de Melo¹, Verônica Gaspar Martins Leite de Melo², José Antônio Frizzone³,
Antonio Pires de Camargo

RESUMO: Neste estudo, desenvolveu-se um método aproximado para projetar linhas laterais de irrigação por gotejamento pareadas em terrenos com declive uniforme, que satisfazem uma uniformidade de aplicação de água requerida, usando a abordagem da linha do gradiente de energia, com base na definição da posição ótima da linha de derivação (BSP). O princípio é que se igualem as pressões mínimas na linha lateral em aclave e em declive. A aplicabilidade das equações desenvolvidas é para um perfil do tipo II-a ($0 < |declividade|/|perda\ de\ carga| < 1$), pois, a carga máxima de pressão da lateral em declive é única e ocorre no início da lateral, compatível com o perfil de carga de pressão do trecho em aclave. Quando o diâmetro (D), o comprimento (L) e a vazão de projeto do emissor (q) são conhecidas é possível determinar o BSP. Foram desenvolvidas aplicações em projeto de linhas laterais de irrigação por gotejamento, pareadas, em terrenos com declive uniforme. A aplicação do método mostrou-se eficiente e de fácil convergência.

PALAVRAS-CHAVE: Uniformidade de aplicação; laterais inclinadas; dimensionamento ótimo.

METHOD FOR DESIGN OF PAIRED DRIP LATERALS ON UNIFORMLY SLOPING FIELDS

ABSTRACT: This study proposed an analytical approach for designing paired laterals of drip irrigation systems, installed on uniform slopes, that complies with an application uniformity criterion. The method is based on the energy gradient line and uses the concept of the Best

¹ Aluno de Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas – ESALQ/USP. E-mail: leoleitemelo@usp.br

² Aluna de Mestrado em Engenharia de Sistema Agrícolas – ESALQ/USP. E-mail: veronica.martins@usp.br

³ Professor Titular do Departamento de Engenharia Biossistemas – ESALQ/USP. E-mail: frizzone@usp.br

⁴ Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP. E-mail: antonio.camargo@feagri.unicamp.br

Manifold Position (BMP). The minimum pressure head of the lateral uphill must be equal to the minimum pressure head of the lateral downhill. The proposed equations are valid for pressure profiles type I and II-a, in which the maximum pressure head occurs only at the lateral inlet. The BSP can be determined when the following variables are known: lateral diameter, length and emitter nominal discharge. Example applications of paired drip laterals installed on uniform slopes are presented. The method has shown to be effective and presented easy convergence of results.

KEYWORDS: Uniformity application; Sloped laterals; Optimal design.

INTRODUÇÃO

Os métodos mais comuns de projeto de linhas laterais de irrigação por gotejamento são o do gradiente da linha de energia (Wu & Yue, 1993) e os métodos tradicionais de cálculo passo-a-passo. O método do gradiente da linha de energia (EGL) foi desenvolvido com base em três pressupostos: a vazão dos emissores ao longo da lateral é uniforme, a distribuição da vazão ao longo da lateral é contínua e a vazão no final da lateral é nula.

A maioria das linhas laterais de irrigação por gotejamento está pareada para equilibrar as diferenças em elevações e as perdas de pressão nos trechos em aclave e em declive (Keller & Bliesner, 1990). Além disso, usando pares de laterais nos quais dois trechos de laterais se estendem em direções opostas de uma linha de derivação comum, para um diâmetro fixo da lateral pode-se permitir que o comprimento da lateral seja maximizado. Um componente importante para projetar laterais pareadas é determinar a melhor posição da linha de derivação (BSP). Desse modo com base em diferentes definições de BSP, vários métodos se propõem para projetar laterais pareadas (Keller & Bliesner, 1990; Jiang & Kang, 2010; Ju et al., 2015; Baiamonte, 2016; Monserrat et al., 2018). As metodologias propostas até o momento foram baseadas em procedimentos matemáticos complexos que dificultam o uso por engenheiros projetistas e fazem certas suposições serem restritivas, como uma variação de pressão fixa, limitando sua aplicação. Além disso, outros modelos apresentam dificuldade de convergência da solução, como o modelo apresentado por Jiang e Kang (2010).

Este trabalho utiliza o conceito da linha do gradiente de energia com o objetivo de desenvolver equações simples para a determinação do BSP, em que o diâmetro (D), o comprimento (L) e a vazão de projeto do emissor (q) são conhecidas. São desenvolvidas

aplicações em projeto de linhas laterais de irrigação por gotejamento, pareadas, em terrenos com declive uniforme.

MATERIAL E MÉTODOS

O equacionamento matemático foi desenvolvido sob as seguintes suposições: (i) a carga de velocidade na linha lateral pode ser desprezada; (ii) a linha lateral tem um número infinito de emissores; (iii) o escoamento é turbulento hidraulicamente liso em todo o comprimento da linha lateral. O BSP foi definido como o comprimento do trecho da lateral em declive, localizado no centro de um espaçamento do emissor. Com frequência se apresenta uma situação como se mostra na Figura 1, em que a linha lateral é formada por dois ramais, um de cada lado da linha de derivação. Neste caso, deve-se determinar o ponto ótimo da linha lateral em que se deve conectar a linha de derivação (BSP). Quando o terreno é horizontal, o ponto ótimo está no centro da lateral. Quando o terreno possui um gradiente de declive (S_o), o ponto ótimo está mais próximo do extremo mais alto. A localização ótima é calculada com a condição de que se igualem as cargas de pressões mínimas em ambos os ramais da lateral.

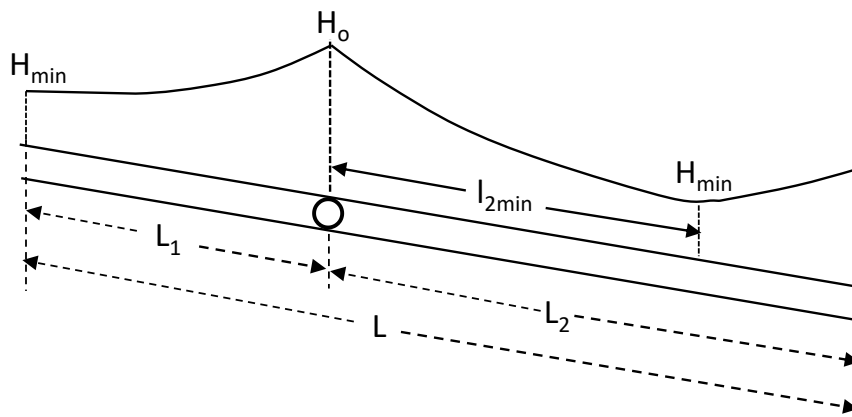


Figura 1. Diagrama esquemático para determinar a melhor posição da linha de derivação (BSP) em sistemas de microirrigação com linhas laterais pareadas operando em terrenos com declive uniforme.

Para expressar a perda de carga na linha lateral é utilizada a equação de Darcy-Weisbach combinada com a equação da continuidade para tubos de seção circular (Swamee & Swamee, 2007) e considera-se o fator de redução de perda de carga devido às múltiplas saídas laterais de água e o efeito das perda localizada de carga nos emissores da lateral (Eq. 1).

$$h_f = \frac{8}{\pi^2 g} f \frac{Q^2}{D^5} L F \lambda \quad (1)$$

em que: h_f – perda de carga total ao longo da linha lateral, m; f – fator de atrito, adimensional; Q – vazão de entrada na linha lateral, $m^3 s^{-1}$; D – diâmetro interno da linha lateral, m; L – comprimento da linha lateral, m; F – fator de redução de perda de carga, adimensional; λ – fator que contabiliza a perda localizada de carga, adimensional; g – aceleração da gravidade, $m s^{-2}$; π – relação entre o comprimento da circunferência e seu diâmetro ($= 3,14\dots$)

Para escoamento turbulento hidraulicamente liso, com número de Reynolds (R) entre 4000 e 10^5 , o fator f geralmente é calculado pela equação de Blasius (Eq. 2), especificamente obtidas para tubos de polietileno de pequenos diâmetros (Bernuth & Wilson, 1989; Provenzano & Pumo, 2004; Melo et al., 2019).

$$f = \frac{a}{R^b} \quad 2$$

em que, na equação de Blasius $a = 0,3164$ e $b = 0,25$ para tubos lisos rígidos. Para tubos de polietileno não colapsáveis de diâmetros nominais 16, 20 e 25 e $2000 < R < 36000$, Bagarello et al. (1995) propuseram $a = 0,302$. Para tubos de polietileno colapsáveis, com espessuras de paredes de 150, 200 e 250 μm , estudos de Provenzano et al. (2016) indicaram $a = 0,285$. Ambos os estudos assumem $b = 0,25$. Ensaio laboratoriais realizados por Melo et al. (2019) indicaram $a = 0,3442$ para tubo gotejador colapsável, Turbo Tape®, com labirintos contínuos soldados à parede interna do tubo.

O número de Reynolds é expresso pela Eq. 3:

$$R = \frac{4 Q}{\pi v D} \quad 3$$

sendo v o coeficiente de viscosidade cinemática da água ($m^2 s^{-1}$), que é função da temperatura.

Substituindo as Eq. 2 e 3 na Eq.1, obtém-se:

$$h_f = \frac{8 (4)^{-b}}{\pi^{(2-b)}} \left(\frac{a}{g}\right) v^b \frac{Q^{(2-b)}}{D^{(5-b)}} L F \lambda \quad 4$$

Considerando-se que a linha lateral tem N emissores espaçados de uma distância S (m) ($N = L/S$) e que a vazão de cada emissor ao longo da lateral é constante (q , $m^3 s^{-1}$) tem-se $Q = qL/S$. Segundo Pinto et al. (2014) e Melo et al. (2019), para uma tubulação com distribuição da vazão em marcha, o fator de redução de perda de carga pode ser aproximado por $F = 1/(3 - b)$. Assumindo S , D e q constantes, a equação (4) pode ser reescrita na forma da Eq. 5 (Wu & Gitlin, 1975) :

$$h_f = k_1 L^{(3-b)} \quad 5$$

$$J = k_1 L^{(2-b)} \quad 6$$

$$k_1 = \frac{0,8155 (4)^{-b} a v^b \lambda q^{(2-b)}}{(3-b) \pi^{(2-b)} S^{(2-b)} D^{(5-b)}} \quad 7$$

sendo J a perda de carga unitária ($m m^{-1}$) e λ calculado pela Eq.8 (Monserrat et al., 2018):

$$\lambda = 1 + \frac{Le}{S} \quad 8$$

em que Le (m) é o comprimento equivalente corresponde à perda localizada de carga no emissor. Se o emissor não causar perda localizada de carga $\lambda = 1$. Caso contrário, $\lambda > 1$.

Para $b = 0,25$, obtém-se:

$$k_1 = 2,8311 \times 10^{-2} \frac{a v^{0,25} \lambda q^{1,75}}{S^{1,75} D^{4,75}} \quad 9$$

Para o desenvolvimento que segue neste trabalho deve-se analisar as características hidráulicas típicas de cada tipo de perfil de carga de pressão que ocorre ao longo da lateral, dependente das diferentes inclinações uniformes da linha lateral e suas relações com a perda de carga. Existem três tipos gerais de perfis de pressão ao longo de uma linha lateral (Tipo I, Tipo II e Tipo III). Para o perfil tipo II existem três tipos particulares (Tipo II-a, Tipo II-b e Tipo II-c). Esses tipos de perfis foram classificados por Gillespie et al. 1979 e Wu et al. 1983.

O método que se desenvolve neste artigo é aplicável ao perfil de pressão tipo II-a (declive suave). Este perfil de pressão ocorre quando a perda de carga e o gradiente de declive atende à condição $0 < |S_o|/|J| < 1$. O ganho de energia total pelo declive uniforme no final da linha é menor que a dissipação da energia total por perda de carga, de modo que a carga de pressão no final da lateral (H_{final}) ainda é menor que a pressão de operação na entrada (H_o). A carga de pressão máxima está na entrada da linha ($H_{max} = H_o$) e a carga de pressão mínima localiza-se em algum ponto no trecho correspondente à segunda metade da lateral.

A carga de pressão em um ponto qualquer ao longo da linha (H_l), ou distribuição de pressão em uma linha lateral de comprimento L^* qualquer, é dada pela Eq. 10:

$$H_l = H_o - \left[1 - \left(1 - \frac{l}{L^*} \right)^{m+1} \right] h_{f(L)} - S_o L^* \quad 10$$

sendo, H_l – carga de pressão em uma distância l qualquer em relação ao início da lateral; H_o – carga de pressão na entrada da lateral; L^* – comprimento da lateral; $h_{f(L^*)}$ – perda de carga ao longo do comprimento L^* ; S_o – gradiente de declive da linha lateral; para lateral em nível $S_o = 0$, para lateral em aclave $S_o > 0$ e, para lateral em declive, $S_o < 0$; m – expoente da vazão na equação de perda de carga utilizada.

Considere L_1 o trecho da linha lateral em aclave, L_2 o trecho em declive e L o comprimento total da linha lateral, isto é, $L = L_1 + L_2$. Para o trecho da linha lateral em

acive, com comprimento L_1 , a carga de pressão mínima ocorre no final da linha e pode ser calculada pela Eq. 11 ou 12:

$$(H_{\min})_{L_1} = H_o - k_1 L_1^{(3-b)} - S_o L_1 \quad 11$$

sendo S_o o gradiente de acive ($m \cdot m^{-1}$) e $L_1 = L - L_2$. Assim:

$$(H_{\min})_{L_1} = H_o - k_1 (L - L_2)^{(3-b)} - S_o (L - L_2) \quad 12$$

No trecho da linha lateral em declive, o local de ocorrência da carga mínima de pressão ($l_{2\min}$) é obtida igualando à zero a derivada da equação de distribuição de pressão em L_2 . A razão $l_{2\min}/L_2$ pode ser calculada pela Eq. 13:

$$\frac{l_{2\min}}{L_2} = 1 - \left[\frac{S_o}{(3-b)k_1 L_2^{(2-b)}} \right]^{1/(2-b)} \quad 13$$

$$l_{2\min} = L_2 - \frac{S}{q} \left(\frac{\pi^{(2-b)} S_o D^{(5-b)}}{0,8155(4)^{-b} a v^b \lambda} \right)^{1/(2-b)} \quad 14$$

Para $b = 0,25$ obtém-se as Eq. 15, 16 e 17:

$$l_{2\min} = L_2 - 4,301 \frac{S S_o^{0,5714} D^{2,7143} a^{-0,5714} \lambda^{-0,5714} v^{-0,1429}}{q} \quad 15$$

A carga de pressão mínima para o trecho da lateral em declive (L_2) será:

$$(H_{\min})_{L_2} = H_o - h_{f(L_2)} \left[1 - \left(1 - \frac{l_{2\min}}{L_2} \right)^{2,75} \right] + S_o l_{\min} \quad 16$$

sendo que o segundo termo do segundo membro da Eq. 14 é a perda de carga que ocorre desde o início do trecho L_2 até o ponto em que ocorre a carga de pressão mínima, isto é, na distância $l_{2\min}$. Então:

$$(H_{\min})_{L_2} = H_o - k_1 L_2^{2,75} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{l_{2\min}}{L_2} \right]^{2,75} \right\} + S_o (L_2 - A) \quad 17$$

$$A = 4,301 \frac{S S_o^{0,5714} D^{2,7143} a^{-0,5714} \lambda^{-0,5714} v^{-0,1429}}{q} \quad 18$$

Pela condição inicial, deve-se verificar $(H_{\min})_{L_1} = (H_{\min})_{L_2}$. Para $b = 0,25$ obtém-se:

$$H_o - k_1 (L - L_2)^{2,75} - S_o (L - L_2) = H_o - k_1 L_2^{2,75} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{l_{2\min}}{L_2} \right]^{2,75} \right\} + S_o (L_2 - A) \quad 19$$

Reorganizando os termos da Eq.19 e simplificando, obtém-se:

$$k_1 (L - L_2)^{2,75} + S_o (L - A) = k_1 L_2^{2,75} \left[1 - \left(\frac{A}{L_2} \right)^{2,75} \right] \quad 20$$

$$L_2 = \left[(L - L_2)^{2,75} + \frac{S_o}{k_1} (L - A) + A^{2,75} \right]^{1/2,75} \quad 21$$

Para calcular comprimento L_2 conhecendo-se S , D , a , H_o , S_o e q , seguem-se os seguintes passos: (a) calcule k_1 pela Eq.9; (b) Calcule J pela Eq. 6; (c) Calcule $|S_o|/|J|$ e certifique-se que o perfil de pressão é do tipo II-a ($0 < |S_o|/|J| < 1$); (d) determine A pela Eq. 18; (e) determine L_2 pela Eq. 21; (f) determine $L_1 = L - L_2$; (g) determine o local de ocorrência da carga de pressão mínima no trecho L_2 utilizando a Eq. 15; (h) determine a carga de pressão mínima em L_2 utilizando a Eq. 16; (i) determine a variação da carga de pressão e de vazão na linha pelas Eq. 21 e 22. (j) se H_{var} e q_{var} calculados forem maiores que os valores admissíveis para o projeto, reduza L e reinicie os cálculos. Em projetos de irrigação por gotejamento é comum utilizar valores máximos de q_{var} de 10% a 20%. A relação entre q_{var} e H_{var} é dada pela Eq. 22.

$$q_{var} = 1 - (1 - H_{var})^x \quad 22$$

em que x é o expoente de fluxo do emissor.

$$H_{var} = \frac{H_o - H_{min}}{H_o} \quad 23$$

Para a aplicação do método será utilizada a fita gotejadora Turbo Tape®, fabricada pela NaanDanJain, que é um tubo colapsável com labirintos contínuos soldados na parede interna. Essa fita gotejadora, com emissores espaçado de 0,10 m, operando à temperatura de 23 °C, possui relação vazão-pressão dos emissores $q = 1,05 \times 10^{-7} H^{0,457}$ (Araújo, 2019), sendo q expresso em $m^3 s^{-1}$ e H em m. O diâmetro interno é 16,01 mm e o parâmetro a da equação de Blasius é 0,3442 para $b = 0,25$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicam-se as equações desenvolvidas em um perfil do tipo II-a ($0 < |S_o|/|J| < 1$), pois a carga máxima de pressão da lateral em declive é única e ocorre no início, compatível com o trecho em aclave. Quando $|S_o|/|J| \geq m + 1$, a Eq. 14 não tem solução porque é obtida por derivação da equação do perfil da carga de pressão.

Deseja-se calcular o BSP para uma linha lateral com comprimento total de 150 m, com declive de 2%, operando com carga de pressão de entrada de 8 m, considerando que à 23 °C a viscosidade cinemática da água é $0,93252 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ e a vazão média do emissor é $2,7158 \times 10^{-7} m^3 s^{-1}$.

Para a solução inicia-se calculando k_1 pela Eq. 9. Assumido $\lambda = 1$:

$$k_1 = 2,8311 \times 10^{-2} \frac{0,3442 (0,93252 \times 10^{-6})^{0,25} (2,7158 \times 10^{-7})^{1,75}}{0,1^{1,75} \times 0,01601^{4,75}} = 1,8606 \times 10^{-5}$$

A perda de carga unitária (Eq. 6), considerando $L = 150$ m, será:

$$J = 1,8606 \times 10^{-5} 150^{1,75} = 0,1196 \text{ m m}^{-1}$$

O perfil da carga pressão que ocorre nessa lateral é tipo II-a, pois:

$$\frac{|S_o|}{|J|} = \frac{0,02}{0,1196} = 0,1672$$

Para Calcular L_2 (comprimento do trecho em declive) determina-se o parâmetro A (Eq. 18) e, posteriormente, o comprimento L_2 (Eq. 21):

$$A = 4,301 \frac{0,10 \times 0,02^{0,5714} \times 0,01601^{2,7143} \times 0,3442^{-0,5714} (0,93252 \times 10^{-6})^{-0,1429}}{2,7158 \times 10^{-7}} = 30,301$$

$$L_2 = \left[(150 - L_2)^{2,75} + \frac{0,02}{1,8606 \times 10^{-5}} (150 - 30,301) + 30,301^{2,75} \right]^{1/2,75}$$

A solução se dá por iteração e resulta $L_2 = 88,2$ m (882 pontos de emissão) e $L_1 = 150 - 88,2 = 61,8$ m (618 pontos de emissão). Para o trecho em declive (L_2) a carga de pressão mínima ocorrerá à distância $l_{2\min}$ à partir da entrada, calculada pela Eq. 15:

$$l_{2\min} = 88,3 - 4,301 \frac{0,1 \times 0,02^{0,5714} \times 0,01601^{2,7143} \times 0,3442^{-0,5714} (0,93252 \times 10^{-6})^{-0,1429}}{2,7158 \times 10^{-7}} = 58,0 \text{ m}$$

A carga de pressão mínima na linha em declive, para a carga pressão de entrada de 8 m é calculada pela Eq. 17:

$$(H_{\min})_{L_2} = 8 - 1,8606 \times 10^{-5} \times 88,3^{2,75} \left[1 - \left(1 - \frac{58}{88,3} \right)^{2,75} \right] + 0,02 \times 58 = 5,2 \text{ m}$$

Para a linha em aclave a carga de pressão mínima é:

$$(H_{\min})_{L_1} = 8 - 1,8606 \times 10^{-5} \times 61,7^{2,75} - 0,02 \times 61,7 = 5,2 \text{ m}$$

A variação da carga de pressão nas linhas em aclave e em declive é:

$$H_{\text{var}} = \left(\frac{8 - 5,2}{8} \right) 100 = 35\%$$

O H_{var} calculado corresponde à seguinte variação de vazão pela aplicação da Eq. 24:

$$q_{\text{var}} = 1 - (1 - 0,35)^{0,457} = 0,1787 \text{ (17,87\%)}$$

O valor de q_{var} é uma medida da uniformidade de distribuição de água. O valor calculado, no caso 17,87%, deve ser comparado ao valor admissível para projeto. Se for maior que o valor admissível deve-se reduzir o comprimento total L até que se atinja o valor máximo admissível. Por exemplo, se o valor máximo admissível for 10% deve-se reduzir L . Na Figura 2 são apresentados os valores de q_{var} possíveis de serem obtidos para vários

comprimentos L da linha lateral. Para $S_o = 0,02 \text{ m m}^{-1}$, variações de vazão inferiores a 10 % só poderão ser obtidas para $54 \leq L \leq 122,6 \text{ m}$. Para L inferior a 54 m obtém-se $|S_o|/|J| \geq 1$ e o perfil de distribuição de carga de pressão deixa de pertencer ao tipo II-a, não sendo possível dimensionar linhas laterais pareadas. Neste caso, uma única linha lateral, alimentada por um extremo, deverá ser projetada. Na Tabela 1 observam-se os comprimentos dos trechos L_1 e L_2 para vários comprimentos L e os respectivos valores de q_{var} .

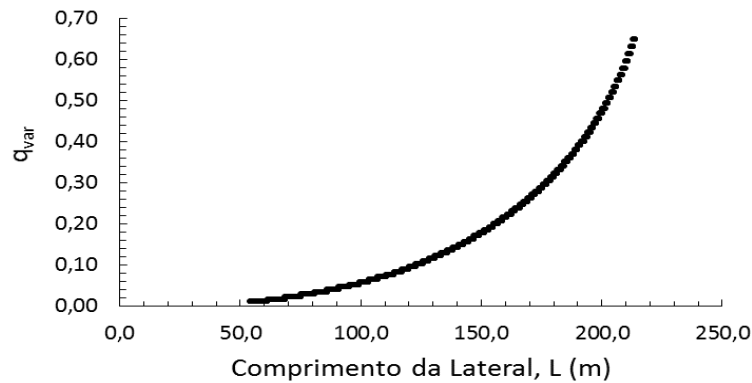


Figura 2. Variação de vazão (q_{var}) possível para vários comprimentos (L) da linha lateral, para $S_o = 0,02 \text{ m m}^{-1}$

Tabela 1. Valores dos comprimentos dos trechos L_1 e L_2 para vários comprimentos L e respectivos valores de q_{var} e H_{min} , para $S_o = 0,02 \text{ m m}^{-1}$

L (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	q_{var}	H_{min} (m)
122,7	46,6	76,1	0,1034	6,3
122,6	46,5	76,1	0,0967	6,4
120,0	45,0	75,0	0,0967	6,4
110,0	39,4	70,6	0,0716	6,8
100,0	33,7	66,3	0,0592	7,0
54,0	7,9	46,1	0,0115	7,8

CONCLUSÕES

O método desenvolvido para projetar linhas laterais de irrigação por gotejamento pareadas, em terrenos com declive uniforme, se mostrou eficiente e de fácil convergência para um perfil do tipo II-a ($0 < |\text{declividade}|/|\text{perda de carga}| < 1$). Desse modo, é possível determinar a posição ótima da linha de derivação – BSP com base no conhecimento do diâmetro (D), do comprimento (L) e da vazão de projeto do emissor (q).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGAREBLLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental study on flow resistance law for small diameter plastic pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.5, n.313, p.313-316, 1995.

BAIAMONTE, G. Simple relationships for the optimal design of paired drip laterals on uniform slopes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.14, n.1: 04015054, 2016.

BARRAGÁN, J.; WU, I. P. Simple pressure parameters for microirrigation design. *Biosystems Engineering*, v.90, n.4, p.463-475, 2005.

GILLESPIE, V.A.; PHILLIPS, A.L.; WU, I.P. Drip irrigation design equations. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, v.105, n.IR3, p.247-257, 1979.

JIANG, S.; KANG, Y. Simple method for the design of microirrigation paired lateras on sloped fields. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.136, n.4, p.271-275, 2010.

JU, X.L.; WECKLER, P.R.; WU, P.T.; ZHU, D.L.; WANG, X.K.; LI, Z. New simplified approach for hydraulics design of micro-irrigation paired laterals. *Transactions of the ASABE*, v.50, n.6, p.1521-1534, 2015.

KANG, Y.H.; NISHIYMADA, S.; KAWANO, H. A simple method of designing uniform-water-application drip irrigation system. *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, n.176, p.63-72, 1995.

KELLER, J., and BLIESNER, R. D. *Sprinkle and trickle irrigation*. AVI book, Van Nostrand Reinhold, New York. 1990.

MELO, V.G.M.L.; FRIZZONE, J.A.; CAMARGO, A.P.; BOMBARDELLI, W.W.A. Head loss in laser-perforated thin-walled polyethylene pipes for irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.23, n.5, p.317-323, 2019.

MONSERRAT, J.; BARRAGÁN, J.; COTS, L. Design of paired laterals on uniformly sloping fields. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.144, n.6: 04018008, 2018.

PINTO, M. F.; CAMARGO, A. P.; RETTORE NETTO, O.; FRIZZONE, J. A. Hydraulic characterization of porous pipes made of recycled automobile tires used in subsurface irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p.1095-1101, 2014.

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

PROVENZANO, G.; ALAGNA, V.; AUTOVINO, D.; JUAREZ, J.M.; RALLO, G. Analysis of geometrical relationships and friction losses in small-diameter lay-flat polyethylene pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.142, n2: 04015041, 2016.

SWAMEE, P.K; SWAMEE, N. Full range pipe-flow equations. *Journal of Hydraulics Research*, v.45, p.841-843, 2007.

VON BERNUTH, R. D.; WILSON, T. Friction factor for small diameter plastic pipe. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.115, p.183-192, 1989.

WU, I.P.; YUE, R. Drip lateral design using energy gradient line approach. *Transactions of the ASAE*, v.36, n.2, p.389-394, 1993.

WU, I.P.; GITLIN, H.M. Energy gradient line for drip irrigation laterals. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, v.101, n.IR4, p.323 – 326, 1975

WU, I.P.; SARAWATARI, C.A., GITLIN, H. M. Design of drip irrigation lateral length on uniform slopes. *Irrigation Science*, v.4, n.2, p.117–135, 1983.