

EVANIZE RODRIGUES CASTRO

**APORTES TECNOLÓGICOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE LINHAS
LATERAIS EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL**

Botucatu

2023

EVANIZE RODRIGUES CASTRO

**APORTES TECNOLÓGICOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE LINHAS
LATERAIS EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Campus
de Botucatu, para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Cury
Saad

Coorientadores: Prof. Dr. Luís Roberto
Almeida Gabriel Filho; Profa. Dra. Vanessa
Avansini Botta Pirani

Botucatu

2023

C355a

Castro, Evanize Rodrigues

Aportes tecnológicos para o dimensionamento de linhas laterais em sistemas de irrigação por aspersão convencional / Evanize Rodrigues Castro. -- Botucatu, 2023

69 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: João Carlos Cury Saad

Coorientador: Luís Roberto Almeida Gabriel Filho; Vanessa Avancini Botta Pirani

1. Sistemas pressurizados. 2. Laterais de aspersores. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: APORTES TECNOLÓGICOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE LINHAS LATERAIS EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL

AUTORA: EVANIZE RODRIGUES CASTRO

ORIENTADOR: JOÃO CARLOS CURY SAAD

COORDENADOR: LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

COORDENADORA: VANESSA AVANSINI BOTTA PIRANI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Agrícola, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD (Participação Virtual)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu UNESP

Prof. Dr. DANIEL DOS SANTOS VIAIS NETO (Participação Virtual)
Coordenadoria do Curso de Tecnologia em Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. DIEGO AUGUSTO DE CAMPOS MORAES (Participação Virtual)
Análise e Desenvolvimento de Sistemas / Faculdade Eduvale de Avaré

Prof. Dr. ANTHONY WELLINGTON ALMEIDA GOMES (Participação Virtual)
Agronomia / Universidade Federal do Agreste de Pernambuco

Prof.ª Dr.ª ANA PAULA RUSSO SCHIMIDT JEFERY (Participação Virtual)
Agronomia / Faculdade Eduvale de Avaré

Botucatu, 07 de março de 2023

AGRADECIMENTOS

A Deus, por seu amor incondicional.

A minha mãe, Silvana Silva Rodrigues, pelo amor, carinho, cuidado e por não medir esforços na conquista deste sonho.

Aos meus irmãos, Eduardo Tadeu Rodrigues Castro e Evandro Rodrigues Castro, minha cunhada Cássia Silva Matiolevitz e sobrinha Cecília Matiolevitz Castro, pelo amor, alegria e companheirismo.

Ao Prof. Dr. João Carlos Cury Saad, pela orientação, ensinamentos, paciência e exemplo de professor.

A Profa. Dra. Vanessa Avansini Botta e Prof. Dr. Luís Roberto de Almeida Gabriel Filho, pela assistência, aprendizado e contribuições nesta tese.

A Ana Cláudia Marassá, Arianne Tabari e Natália Ribeiro pela amizade, carinho e incentivo.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” FCA/UNESP e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – CAPES – Código de financiamento 001 – Número do Processo 88882.433014/2019-01.

RESUMO

A disposição das linhas laterais em sistemas de irrigação por aspersão convencional é de suma importância, pois assegura a uniformidade de aplicação de água e influência no dimensionamento das demais linhas do sistema de irrigação. A complexidade do dimensionamento das linhas laterais aumenta em terrenos em desnível, sendo necessário o uso de recurso e técnicas para a escolha do esquema operacional e configuração da rede hidráulica mais viável. Este trabalho teve como objetivo principal fornecer subsídios para o dimensionamento criterioso de linhas laterais de sistemas de irrigação por aspersão convencional fixo. Para isso foram desenvolvidos dois capítulos. O primeiro capítulo adaptou um método que dimensiona linhas emparelhadas (duas tubulações que se estendem em direção oposta de uma linha de derivação) para sistemas de irrigação por aspersão convencional, aplicável em campo com desnível uniforme. Utilizando este resultado e com apoio da linguagem de programação *Visual Basic for Applications*, uma planilha dinâmica foi desenvolvida. Neste capítulo também foram determinados limites dos valores dos parâmetros que satisfazem a solução do método, permitindo a análise prévia da viabilidade do dimensionamento da linha lateral de forma pareada e, verificando, a necessidade de a carga de pressão mínima não pertencer a uma das extremidades da linha lateral. No segundo capítulo foi desenvolvido um procedimento que aumenta potencialmente o comprimento da linha lateral de aspersores convencional com o uso de aspersores de bocais distintos. O método orienta a escolha de bocais compatíveis de aspersores convencional e define o ponto ótimo de transição entre modelos, respeitando o critério de máxima variação de vazão. As simulações teóricas geraram resultados promissores, com aumento do comprimento da linha lateral na ordem de 30% em comparação com linhas laterais que utilizam apenas um destes aspersores. Um estudo de caso foi validado em campo e mostrou-se eficaz, aumentando dois aspersores, que corresponde a 24 metros a mais no comprimento na linha lateral, apresentado classificação excelente na avaliação da uniformidade de distribuição de água.

Palavras-chave: sistemas pressurizados; redes de distribuição de água; aspersores.

ABSTRACT

Proper design of lateral lines in conventional sprinkler irrigation systems is essential, as it ensures uniformity of water application and influences the sizing of other lines in the irrigation system. The design complexity of the lateral lines increases in sloping terrain, requiring the use of resources and techniques to choose the most viable operational scheme and configuration of the hydraulic network. The main objective of this work was to provide subsidies for the practical design of lateral lines of solid-set sprinkler irrigation systems. For this, two chapters were developed. The first chapter adapted a methodology for paired lines design (two pipes that extend in the opposite direction of a branch line) applied to conventional sprinkler irrigation systems under uniform slopes. A dynamic worksheet was developed using this result and with the support of the Visual Basic for Applications programming language. The values limits of the parameters that satisfy the solution of the method were also determined, allowing the preliminary analysis of the feasibility of the lateral line design in a paired way and verifying the need for the minimum pressure load not to belong to one of the extremities of the line. In the second chapter, a procedure was developed that potentially increases the lateral line length using sprinklers with different nozzles. The method guides the choice of compatible nozzles for conventional sprinklers and defines the optimal transition point between models, respecting the criterion of maximum flow variation. Theoretical simulations generated promising results, with an increase in the lateral line length of 30% compared to lateral lines that use only one sprinkler model. A case study was validated in the field and proved effective, increasing two sprinklers, which correspond to 24 meters more in length on the lateral line, showing an excellent distribution uniformity.

Keywords: pressurized systems; water distribution networks; sprinklers.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO GERAL.....	13
	CAPÍTULO 1 - PAIRED: A spreadsheet for the design of paired sprinkler laterals on uniformly sloping.....	15
1.1	INTRODUCTION.....	16
1.2	Development of the dynamic spreadsheet – PAIRED.....	17
1.3	PAIRED – Application.....	24
1.4	CONCLUSIONS.....	29
	APPENDIX I. PAIRED code.....	30
	APPENDIX II. Determination and analysis of the real root of the Keller and Bliesner (1990) cubic equation.....	34
	REFERENCES.....	40
	CAPÍTULO 2 - Otimização do comprimento da linha lateral utilizando aspersores com diferentes bocais.....	43
2.1	INTRODUÇÃO.....	44
2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	45
2.2.1	Determinação do ponto ótimo de troca de aspersores.....	47
2.2.2	Estudo de caso.....	50
2.2.2.1	<i>Caso 1</i>	50
2.2.2.2	<i>Caso 2</i>	51
2.2.3	Validação em campo.....	51
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
2.3.1	Estudo de caso 1: simulação pelo aplicativo.....	52
2.3.2	Estudo de Caso 2: Simulação pelo aplicativo.....	56
2.3.3	Resultados da validação em campo.....	57
2.4	CONCLUSÕES.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	APÊNDICE A – Rotina desenvolvida no software MatLab.....	61
	APÊNDICE B – Fluxograma da rotina de programação.....	64
	APÊNDICE C – Sub-rotina NS.....	65
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
	REFERÊNCIAS.....	69

INTRODUÇÃO GERAL

O fornecimento de água via irrigação tem por objetivo atender as necessidades hídricas dos cultivos em localidades onde a lâmina de água fornecida pela precipitação natural não é suficiente ou apresenta distribuição irregular ao longo do ciclo.

A irrigação pode ser realizada por diferentes métodos, como superfície, aspersão e localizada, sendo que cada um apresenta componentes específicos para sua instalação. A escolha do método dependerá das características da cultura, tipo de solo, relevo e clima da região, além da disponibilidade de recursos hídricos (quantidade e qualidade).

Frizzzone, Resende e Freitas (2011) definiram a irrigação por aspersão como a aplicação de água ao solo resultante “(...) da fragmentação de um jato de água lançado sob pressão à atmosfera, por meio de orifícios ou bocais de aspersores”.

Os sistemas de irrigação por aspersão convencional fixo são estratégicos para a agricultura irrigada, pois aumenta a produção de culturas de elevado valor econômico e são utilizados quando a mão-de-obra é escassa e/ou cara (FRIEDMAN, 2022).

Segundo Carvalho et al. (2020), este método é o mais utilizado, com 48% da área irrigada brasileira. E, cada vez mais, eles estão concentrados em pequenas áreas, dimensionados por técnicos que atuam na extensão rural ou em revendas de produtos agrícolas em geral, quando não definidos pelos próprios agricultores irrigantes (SAAD, 2021).

No dimensionamento, o sistema de irrigação deve ser disposto no terreno de forma a estabilizar as pressões, reduzir a potência do conjunto moto bomba e aproveitar a declividade do terreno para ganho de pressão (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006); MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). Com um projeto adequado, altos valores de uniformidade de aplicação de água em condições de campo são obtidos.

A maior atenção em uma rede hidráulica de irrigação pressurizada são as linhas laterais, que contêm os aspersores. Há um grande potencial de melhoria dos projetos aplicáveis à hidráulica das laterais, sendo que o desenvolvimento de procedimentos matemáticos e a geração de aplicativos com fundamentação conceitual são caminhos para viabilizar esta evolução (SANCHEZ; ZERIHUN, 2017). Desta forma, a tese teve

como objetivo geral desenvolver subsídios para o dimensionamento de linhas laterais de sistemas de irrigação por aspersão convencional.

Já os objetivos específicos foram:

- Adaptar o procedimento de Keller e Biesner (1990) para dimensionamento de linhas pareadas em sistemas de irrigação por aspersão convencional.
- Avaliar o potencial aumento do comprimento da linha lateral com o uso de aspersores com bocais diferentes na mesma linha lateral, definindo o ponto ótimo de transição entre os modelos de aspersores.

Para atingir estes propósitos, foram desenvolvidos dois capítulos nesta tese, sendo o primeiro intitulado “PAIRED: A spreadsheet for the design of paired sprinkler lateral on uniformly sloping”, apresenta uma planilha dinâmica que dimensiona linhas pareadas de aspersores utilizando uma adaptação do método de Keller e Bliesner (1990). E o segundo capítulo intitulado “Otimização dom comprimento da linha lateral utilizando aspersores com diferentes bocais”, que apresenta procedimento para orientar a escolha dos bocais compatíveis para o uso na mesma linha lateral de aspersores convencional, e, também definir o ponto ótimo de transição entre os modelos.

CAPÍTULO 1

PAIRED: A spreadsheet for the design of paired sprinkler laterals on uniformly sloping fields¹

ABSTRACT

Modern sprinkler irrigation system feasibility requires projects considering water and energy conservation, which are limited and expensive resources. Hand-move and solid-set sprinkler irrigation systems are widely applied in areas with variable shapes and slopes. However, they are not always adequately designed due to the lack of subsidies and applications that help designers. An alternative widely used in drip irrigation that can be adapted to sprinkler irrigation systems is paired laterals; this is two distribution pipes extending in opposite directions from a common manifold line, resulting in longer lengths, higher uniformity, and an increase in water use efficiency. The objective of this research was to adapt a procedure of literature for designing paired laterals of drip irrigation systems on uniformly sloping fields to the condition of the turbulent hydraulic regime that characterizes sprinkler irrigation, and to develop a dynamic spreadsheet to facilitate its application. Therefore, the deduction of the real root of the third-degree polynomial was performed. The solution obtained allowed the development of the dynamic spreadsheet called PAIRED, as it was an explicit equation, and without it, numerical methods would be essential. PAIRED was developed in a simple and didactic way, providing a precise and user-friendly tool. When applied in a case study, PAIRED generated uphill and downhill laterals of a conventional sprinkler irrigation system on a uniformly sloping field, with identical results to those obtained using numerical methods.

¹ Capítulo redigido de acordo com as normas do periódico Journal of Irrigation and Drainage Engineering

1.1 INTRODUCTION

Irrigated agriculture is essential for satisfying the growing global demand of food, fiber and energy (Hamidov and Helming 2020). Modern sprinkler irrigation system viability requires water and energy conservation, resources that are increasingly limited and expensive (Robles et al. 2017).

The irrigated area in Brazil in 2019 was 5.3 Mha, and the forecast is an increase of 4.2 Mha by 2040 (ANA 2021), and according to Carvalho et al. (2020) by that sprinkler irrigation systems being the second most used after surface irrigation (Carvalho et al. 2020).

Hand-move and solid-set sprinkler systems are widely used in areas with variable shapes and slopes, allowing many possibilities for configuring the hydraulic network. Designers do not always adequately explore these design scenarios to produce good irrigation practices, partly due to the lack of technical subsidies and software (Saad 2021). An option widely used in drip and microsprinkler irrigation, which can be applied in conventional sprinkler irrigation systems, is the adoption of paired laterals, defined as two distribution pipes extending in opposite directions from a common manifold, using the same pipe diameter (Baiamonte et al. 2015). The paired laterals provide more uniform pressure to all laterals in the system, increasing the water use efficiency (Baiamonte 2018) and maximizing the lateral length so that the initial investment cost can be reduced (Baiamonte et al. 2015; Baiamonte 2017; Monserrat et al. 2018).

In the case of horizontal laterals, the length of the paired laterals is equal because the hydraulic conditions are the same. However, for sloped laterals, the length of the uphill line must be smaller than that of the downhill line, with the same pipe diameter (Monserrat et al., 2018).

In the design of paired laterals, it is essential to determine the best manifold position (BMP) in drip irrigation systems (Baiamonte 2017) and the best submain position (BSP) in sprinkler irrigation systems. Keller and Bliesner (1990) defined BMP as the manifold location

determining the same minimum pressure in uphill and downhill laterals. The proposed method consists of determining the real root of a polynomial of degree three, which must, obligatorily, belong to a predefined interval, with coefficients depending on the hydraulic parameters of the lateral line.

Paired laterals can be advantageously adopted in sprinkler irrigation, especially in hand-move and solid-set systems. However, modifying the equation established by Keller and Bliesner (1990) is necessary because it considers the Blasius resistance equation (Baiamonte 2017). Sprinkler irrigation systems require a resistance equation for turbulent flow.

The adaptation of the procedure by Keller and Bliesner (1990) for the design of paired sprinkler laterals is a convenient novelty, especially if there is also the development of a dynamic spreadsheet with a friendly interface that allows its wide diffusion and adoption.

The objective of this research was to adapt the procedure of Keller and Bliesner (1990) for defining the BSP in paired laterals in sprinkler irrigation systems, applicable to uniform slope fields, and developing a dynamic spreadsheet to facilitate its application.

1.2 Development of the dynamic spreadsheet - PAIRED

The dynamic spreadsheet - PAIRED was developed in the Visual Basic for Applications (VBA) programming language using the Microsoft Excel 2013.lnk Windows spreadsheet editor, the code could be seen in the Appendix I.

The PAIRED algorithm is represented in a flowchart (Figure 1), and each process is described in a "Step" with its respective number. The "Report" prints the output data.

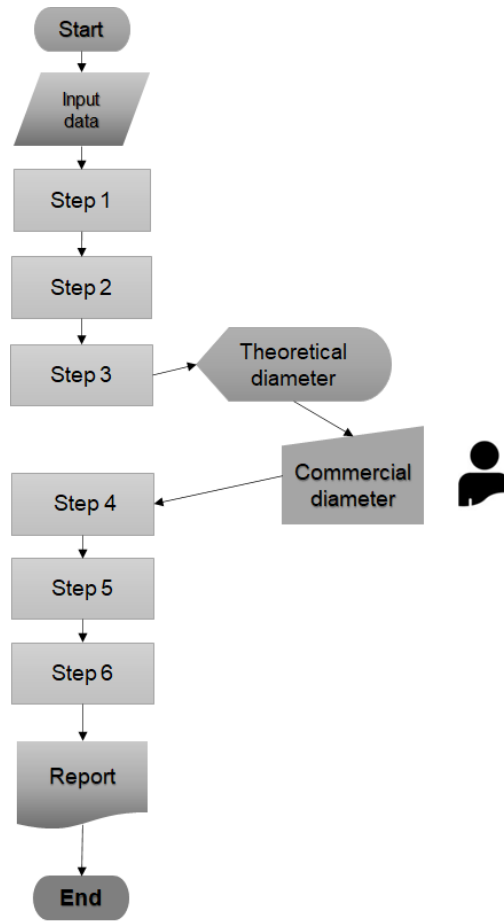


Fig. 1. Flowchart

Step 1: Total length and number of sprinklers

In the design of paired laterals, the total length (L_T) is the sum of the uphill lateral (L_A) and downhill lateral (L_D). In some cases, adjusting the actual length of the area in the direction of the lateral line is necessary to obtain an integer number of sprinklers. L_T is obtained from Equation 1:

$$L_T = \left(\text{round} \left(\frac{L_M}{S_L} \right) \right) \quad (1)$$

where L_M = maximum paired lateral length according to the system configuration and the field dimensions, m; S_L = spacing of sprinkler, m.

The number of sprinklers on the total lateral line (N) is obtained by the Equation 2:

$$N = \frac{L_T}{S_L} \quad (2)$$

Step 2: Determination of lateral line diameter

Both uphill and downhill laterals must have the same diameter adopted in leveled laterals. In this way, the diameter is determined considering the paired laterals in level and having the same length.

For the length L of the lateral line, in level, which corresponds to half of L_T , and using the 10% flow variation criterion (Saad 2021), the total head loss is calculated by Equation 3.

$$hf_L = 0.22(H_{av} + H_h) \quad (3)$$

where hf_L = head loss in the lateral line with sprinklers (m); H_{av} = working pressure of the sprinkler (m); and H_h = riser height (m).

The lateral line flow rate (Q_L) is given by Equation 4:

$$Q_L = (0.5N)q \quad (4)$$

where q = sprinkler flow rate (m^3s^{-1}).

Theoretical diameter

Equation 5 calculates the lateral diameter and is valid for $3 \times 10^3 \leq R \leq 3 \times 10^8$ and $2 \times 10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 2 \times 10^{-2}$, with an error of $\pm 2\%$ and $1 \times 10^{-8} \text{m}^2\text{s}^{-1} \leq \vartheta \leq 1 \times 10^{-3} \text{m}^2\text{s}^{-1}$, where ϑ is the kinematic viscosity of water (Swamee and Jain, 1976).

$$D = 0.66 \left[\varepsilon^{1.25} \left(\frac{L Q^2}{hf g} \right)^{4.75} + \vartheta Q^{9.4} \left(\frac{L}{hf g} \right)^{5.2} \right]^{0.04} \quad (5)$$

where hf = head loss due to pipe friction (m); Q = flow rate in the pipe (m^3s^{-1}); L = pipe length (m); g = acceleration due to gravity (ms^{-2}); D = pipe diameter (m); ε = absolute roughness of pipe (m). Equation 5 results from the combination of the Darcy-Weisbach equation (Equation 6), which has a wide range of applications and high accuracy (Minhoni et al. 2020), with an

explicit equation proposed by Swamee and Jain (1976) to calculate the friction coefficient (f) (Equation 7). It is recommended for range $1 \times 10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 1 \times 10^{-2}$ and $5 \times 10^{-3} \leq R \leq 1 \times 10^8$, with errors lower than $\pm 1\%$ in relation to the implicit Colebrook-White Equation.

$$hf = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 D^5 g} \quad (6)$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{\varepsilon}{3.7D}\right) + \frac{5.74}{R^{0.9}} \right]^2} \quad (7)$$

and R = Reynolds number, calculated by Equation (8).

$$R = \frac{4Q}{\pi \theta D} \quad (8)$$

Once hf_L is calculated based on the criterion of a maximum flow variation of 10% in the lateral line (Equation 3), the head loss (hf) is obtained by:

$$hf_L = hf \cdot Fa \quad (9)$$

The correction factor for multiple outputs (Fa), developed by Scaloppi (1988), is valid for any distance between the beginning of the pipe and the first exit and is calculated by the Equation 10:

$$Fa = \frac{NF+x-1}{N+x-1} \quad (10)$$

where x = ratio of the distance of the first sprinkler from the pipe inlet to the regular sprinkler spacing and F as the Christiansen's correction factor (1942) for multiple outlets.

Equation (11), considers that the distance from the first sprinkler is equal to the regular distance between the other sprinklers, given by:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{(m-1)^2}{2N} \quad (11)$$

where m = speed exponent in the head loss equation, and for the Darcy-Weisbach equation, $m = 2$; and N = number of outlets (sprinklers) in the lateral line.

Commercial diameter

Once the theoretical diameter is calculated by Equation 5, the obtained value must be adjusted to the nearest commercial diameter. It is up to the user to select and insert the commercial diameter in the dynamic spreadsheet.

Step 3: Determination of the best submain position (BSP)

Keller and Bliesner (1990) developed graphical and numerical solution methods to find the best position of the manifold (BMP) based on the condition of the minimum pressure head of the uphill lateral being the same as that of the downhill lateral. According to the authors, it is sufficient to determine the Equation 12 root that satisfies the condition $y \in \mathbb{R}$ such that $0.5 \leq y \leq 1$.

$$\frac{S_0 L_T}{hf_T} \left[1 - \left(\frac{Fa S_0 L_T}{hf_T} \right)^{0.57} \right] + \left(\frac{Fa S_0 L_T}{hf_T} \right)^{1.57} = y^{2.75} - (1 - y)^{2.75} \quad (12)$$

where: S_0 = ground slope (mm^{-1}); L_T = total length of the lateral line (m), the sum of uphill and downhill laterals; hf_T = total head loss of the pipe with multiple outlets (m) with the total length (L_T) and inlet flow equal to the sum of the uphill and downhill laterals; Fa = Scaloppi correction factor for multiple outlets; and y = fraction of the total length L_T equivalent to the downhill lateral.

Adapting the Equation 12 for use in conventional sprinkler irrigation, considering the Darcy-Weisbach equation to calculate the friction losses, with the flow rate exponent equal to 2; thus, $m = 2$, and the expression takes the following form:

$$\frac{S_0 L_T}{hf_T} \left[1 - \left(\frac{Fa S_0 L_T}{hf_T} \right)^{0.5} \right] + \left(\frac{Fa S_0 L_T}{hf_T} \right)^{1.5} = y^3 - (1 - y)^3 \quad (13)$$

Equation 13 can be solved using numerical methods. However, this research found an explicit solution, and it was applied in the proposed dynamic spreadsheet - PAIRED. As deduced in Appendix II, the real root of the Keller and Bliesner (1990) polynomial is given by:

$$y_1 = \frac{1}{2} - \frac{1}{4^{1/3}} \left(a + 1 - \left(\frac{1}{4} + (a + 1)^2 \right)^{1/2} \right)^{1/3} - \frac{1}{4^{1/3}} \quad (14)$$

with

$$a = - \left\{ (1/Fa)(S_0/S_f) - (1/Fa)[(S_0/S_f)]^{1.5} + [(S_0/S_f)]^{1.5} + 1 \right\}. \quad (15)$$

Summarizing, considering the length L_T , the corresponding number of sprinklers N and the lateral line diameter D obtained for level ground, for $m = 2$ and $x = S_p/S_L$, where S_p is the space between the inlet and the first sprinkler, Fa is calculated by Equation 10. The total flow (Q_T) is obtained by multiplying N by q . The total head loss, hf_T , is determined by Equation (9). Substituting these values in Equation 13 the coefficients of the polynomial equation of Keller and Bliesner (1990) could be obtained, for which the numerical solution (y_1) is given by Equation (14).

Once y_1 is found, the downhill lateral length (L_D) is determined by Equation 16. The number of sprinklers (N_D) and inlet discharge (Q_D) of the downhill lateral are calculated by Equation 17 and Equation 18, respectively.

$$L_D = y_1 L \quad (16)$$

$$N_D = \frac{L_D}{S_L} \quad (17)$$

$$Q_D = N_D(q) \quad (18)$$

The length (L_A), the number of sprinklers (N_A), and the inlet flow (Q_A) of the uphill lateral are determined by Equations 19, 20 and 21, respectively:

$$L_A = L - L_D \quad (19)$$

$$N_A = \frac{L_A}{S_L} \quad (20)$$

$$Q_A = N_A \cdot q \quad (21)$$

Step 4: Obtaining the pressure head at the inlet (H_0) of the paired laterals

The lateral inlet pressure (H_0) is the same for the uphill and downhill laterals. However, it must be calculated (Scaloppi and Allen, 1993) for the uphill lateral using Equation 22, considering D , L_A , N_A , and Q_A .

$$H_{av} = H_0 - 0.75hf_L - \frac{S_0L}{2} \quad (22)$$

Step 5: Calculation of minimum pressure, pressure head variation, and sprinkler discharge variation to the uphill lateral

The minimum pressure on the uphill lateral is equal to the pressure at the end of the pipe (H_{min}), calculated by Equation 23. The maximum pressure in this line is equal to the inlet pressure H_0 . Thus, the pressure variation that occurs on the uphill side is determined by Equation 24.

$$H_{min} = H_{av} - 0.25hf_L - \frac{S_0L}{2} \quad (23)$$

$$\Delta h = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max}} \quad (24)$$

where H_{max} = maximum pressure head (m).

The flow variation in the uphill lateral is obtained using Equations 25 and 26.

$$\frac{q_{max}}{q_{min}} = \sqrt{\frac{H_{max}}{H_{min}}} \quad (25)$$

$$\Delta q = \frac{q_{max} - q_{min}}{q_{max}} \quad (26)$$

where q_{max} = maximum flow rate in the lateral (m^3s^{-1}) and q_{min} = minimum flow rate in the lateral line (m^3s^{-1}).

Step 6: Calculation of minimum pressure, pressure head variation, and sprinkler discharge variation to the downhill lateral

In the case of the downhill lateral, the maximum and the minimum pressure may have different positions according to the slope gradient and the total head loss. Therefore, the pressure is calculated in each outlet using Equations 27 and 28, allowing us to identify the highest and lowest values (maximum head and minimum pressure, respectively).

$$H_s = H_o - hf_s - S_o L \quad (27)$$

$$hf_s = hf_L \left[1 - \left(1 - \frac{s}{L} \right)^{m+1} \right] \quad (28)$$

where hf_s = head loss from the beginning of the pipeline to the distance s (m), which can be estimated by Equation 28 developed by Scaloppi and Allen (1993), and H_s = pressure head at a distance s from the lateral inlet (m).

Similar to the uphill lateral, the variation in sprinkler discharge is calculated for the downhill lateral.

1.3 PAIRED - Application

With the results obtained previously, the dynamic worksheet PAIRED was developed in Microsoft Excel®. Figure 3 shows the input data required and the generated output data.

<u>IN</u>	<u>OUT</u>
• Ground slope (%) • Length of the field in direction of the lateral line (m) • Sprinkler discharge (m³/h) • Working pressure head of the sprinkler (m) • Riser height (m) • Distance from mainline to first sprinkler (m) • Spacing of sprinklers along the laterals (m) • Absolute roughness of pipe (mm)	For uphill and downhill lateral: • Lateral length (m) • Number of sprinklers • Lateral line discharge (m³/h) • Lateral inlet pressure (m) • Minimum pressure (m) • Pressure head variation (%) • Variation of sprinkler discharge (%)

Fig. 3. Worksheet input and output data

A case study described by Saad (2021) was used to exemplify the PAIRED application's use and proceed with the validation. It is necessary to design the uphill and downhill laterals for the following data: sprinklers are equally spaced at 18 m, and the first sprinkler is localized 9 m from the main pipe. The lateral line is of PVC ($\varepsilon = 0.00334$ mm). The L_M is 440 m, with a constant slope of 1.8% in the lateral line direction. The average sprinkler discharge is $2.106 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, and the average pressure is 25.5 m, with a riser height of 1.0 m.

Figure 4 shows the general screen of the PAIRED dynamic spreadsheet, containing the input data on the left and the output data on the right. After insertion of input data in the spreadsheet (Figure 5), the user must click on the buttons "Adjust the total length of the lateral line", "Calculate the number of sprinklers on the lateral line," and "Calculate diameter", in this order (Figure 6).

INPUT DATA		CALCULATE DATA		CALCULATE DATA		
				UPHILL	DOWNHILL	
Ground slope (%)	1.8	ADJUST TOTAL LENGTH OF LATERAL LINE	432 m	Lateral length (m)	135	279
Length of the field in direction of the lateral line (m)	440			Number of sprinklers	8	16
Sprinkler discharge (m³/h)	2.106	CALCULATE NUMBER OF SPRINKLERS ON THE TOTAL LATERAL LINE	24	Lateral line discharge (m³/h)	16.85	33.7
Working pressure head of the sprinkler (m)	25.5			Lateral inlet pressure (m)	28.4	28.4
Riser height (m)	1	CALCULATE DIAMETER	61.99 mm	Minimum pressure (m)	25.05	25.13
Distance from mainline to first sprinkler (m)	9	Insert commercial diameter	70.4 mm	Pressure head variation (%)	11.9	11.59
Spacing of sprinkler along the laterals (m)	18			Variation of sprinkler discharge (%)	6.1	5.98
Absolute roughness of pipe (mm)	0.00334					

Fig. 4. Dynamic spreadsheet

INPUT DATA	
Ground slope (%)	1.8
Length of the field in direction of the lateral line (m)	440
Sprinkler discharge (m ³ /h)	2.106
Working pressure head of the sprinkler (m)	25.5
Riser height (m)	1
Distance from mainline to first sprinkler (m)	9
Spacing of sprinkler along the laterals (m)	18
Absolute roughness of pipe (mm)	0.00334

Fig. 5. Input data

ADJUST TOTAL LENGTH OF LATERAL LINE	432 m
CALCULATE NUMBER OF SPRINKLERS ON THE TOTAL LATERAL LINE	24
CALCULATE DIAMETER	61.99 mm

Fig. 6. Determination of the theoretical diameter

Next is the interactive part of the process when the user must select and insert the commercial diameter (Figure 7) closest to the previously calculated theoretical diameter.

Insert commercial diameter	70.4 mm
----------------------------	---------

Fig. 7. Insert the commercial diameter

Afterward, click on the button "Calculate data" (Figure 8) to obtain the output data of the uphill and downhill laterals: Length (m); Number of sprinklers; Lateral line discharge (m^3h^{-1}); Lateral inlet pressure (m); Minimum pressure (m); Pressure head variation (%); and Variation of sprinkler discharge (%).

CALCULATE DATA		
	UPHILL	DOWNHILL
Lateral length (m)	135	279
Number of sprinklers	8	16
Lateral line discharge (m^3/h)	16.85	33.7
Lateral inlet pressure (m)	28.4	28.4
Minimum pressure (m)	25.05	25.13
Pressure head variation (%)	11.9	11.59
Variation of sprinkler discharge (%)	6.1	5.98

Fig. 8. Output data

For a total length (L_T) of 432 m and a uniform slope of 1.8%, the procedure defined the downhill lateral with 135 m and 8 sprinklers, while the downhill lateral features 279 m and 16 sprinklers.

The premise of the procedure developed by Keller and Bliesner (1990) for the design of paired laterals was that the minimum pressure head would be the same on the uphill and downhill laterals, which was verified because the values were 25.05 m and 25.13 m, respectively.

The maximum variation in sprinkler discharge on the uphill side was 11.9%, and that on the downhill side was 11.6%. This small variation is due to the necessary adjustment to have an integer number of sprinklers in the paired laterals.

The comparison between the results obtained with the PAIRED Spreadsheet and the procedure with the numerical method solution (Table 1) indicates very similar performances, diverging in the uphill lateral of 0.1%, both for the pressure head variation and for the sprinkler

discharge variation. In the downhill lateral direction, the procedures showed differences of 0.4% for Δq and 0.7% for Δh .

Table 1. Comparison between paired laterals obtained using the numeric method (Saad 2021) and the PAIRED spreadsheet.

Item	Saad (2021)	PAIRED
Uphill lateral		
Length (m)	135	135
H_0 (m)	28.4	28.4
H_{min} (m)	25	25.1
ΔH (%)	12	11.9
Δq (%)	6.2	6.1
Downhill lateral		
Length (m)	279	279
H_0 (m)	28.4	28.4
H_{min} (m)	24.9	25.1
ΔH (%)	12.3	11.6
Δq (%)	6.4	6.0

Note: H_0 = pressure at the lateral line inlet; H_{min} = lateral minimum pressure; ΔH = pressure variation; Δq = sprinkler flow rate variation.

The pressure profiles for the uphill and downhill laterals (Figure 9) indicate the effectiveness of the PAIRED application in defining the sprinkler paired laterals in a slope condition, with pressure values were very close to those obtained by Saad (2021).

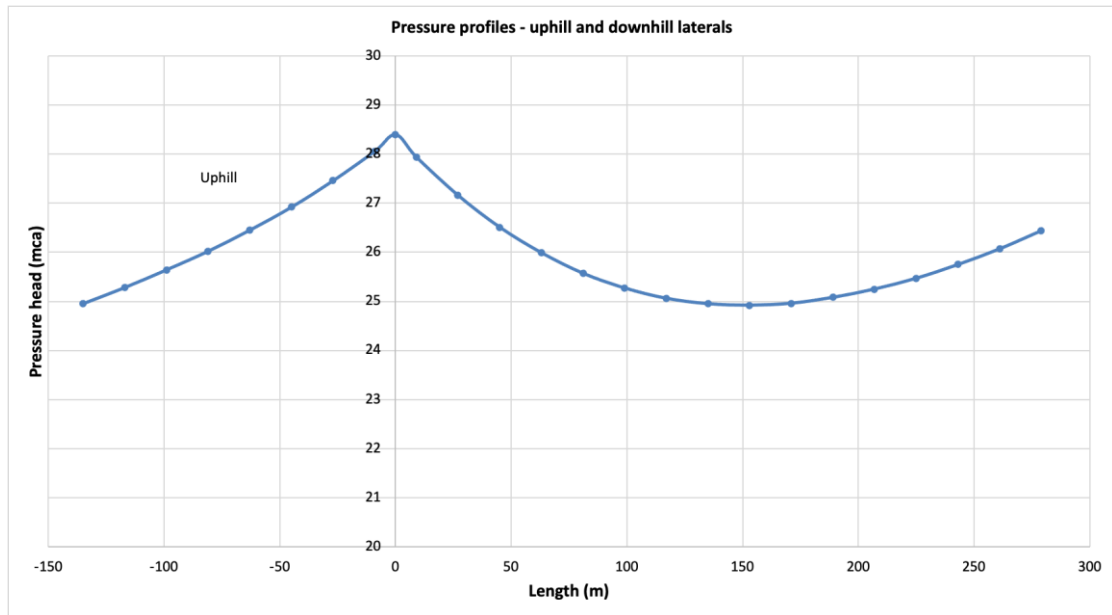


Fig. 9. Pressure profiles for the uphill lateral (left) and the downhill lateral (right) of the paired laterals obtained by PAIRED

1.4 CONCLUSIONS

The real root of the Keller and Bliesner (1990) polynomial equation was obtained and facilitated the development of the dynamic worksheet PAIRED. Since it is an explicit equation and, without it, the use of numerical methods would not be necessary.

The limits of the values of the hydraulic parameters that satisfy the solution proposed by Keller and Bliesner (1990) allowed the preliminary analysis of the design viability of paired laterals. The result verified the need for the minimum pressure head not to belong to one of the ends of the lateral line.

The PAIRED dynamic spreadsheet was a user-friendly tool that provided precision results, allowing paired sprinkler laterals to be designed in uniformly sloping fields.

APPENDIX I. PAIRED code

```
Static Function Log10(X)
  Log10 = Log(X) / Log(10#)
End Function
```

```
Sub ajuste()
  Dim L1 As Double
  L1 = Range("B9").Value
  Dim SL As Double
  SL = Range("B19").Value
  L2 = L1 / SL
  L = Round(L2, 0) * SL
  Range("K6").Value = L
End Sub
```

```
Sub aspersores()
  Dim L As Double
  L = Range("K6").Value
  Dim SL As Double
  SL = Range("B19").Value
  N = L / SL
  Range("K11").Value = N
End Sub
```

```
Sub diametro()
  Dim So1 As Double
  So1 = Range("B6").Value
  Dim L1 As Double
  L1 = Range("K6").Value
  Dim q1 As Double
  q1 = Range("B11").Value
  Dim Hserv1 As Double
  Hserv1 = Range("B13").Value
  Dim SL As Double
  SL = Range("B19").Value
  Dim E1 As Double
  E1 = Range("B21").Value
  Dim Sp As Double
  Sp = Range("B17").Value
  Dim Ah As Double
  Ah = Range("B15").Value
  Dim v As Double
  v = 1.01 * (10 ^ -6)
  Dim g As Double
  g = 9.81
  Dim N1 As Double
  N1 = Range("K11").Value
  So = So1 / 100
  q = q1 / 3600
```

```

Hserv = Hserv1 + Ah
E = E1 * 0.001
L = (L1 / 2) - Sp
N = N1 / 2
hfl = 0.22 * Hserv
X = Sp / SL
f = 1 / 3 + 1 / (2 * N) + 1 / (6 * (N ^ 2))
Fa = (N * f + X - 1) / (N + X - 1)
hf = hfl / Fa
Qv = N * q
D1 = 0.66 * (((E ^ 1.25) * (((L * (Qv ^ 2)) / (hf * g)) ^ 4.75) + v * (Qv ^ 9.4) * ((L / (hf * g)) ^
5.2)) ^ 0.04)
D = Round(D1, 5)
D1 = 1000 * D
Range("K16").Value = D1
End Sub

```

```

Sub LateraisEmNivel()
    Dim N As Double
    N = Range("K11").Value
    Dim SL As Double
    SL = Range("B19").Value
    Dim L1 As Double
    L1 = Range("K6").Value
    L = L1 - SL
    Dim q1 As Double
    q1 = Range("B11").Value
    q = q1 / 3600
    Qv = N * q
    Dim Dc As Double
    Dc = Range("K19").Value
    D = Dc * 0.001
    Dim E1 As Double
    E1 = Range("B21").Value
    E = E1 * 0.001
    Dim Sp As Double
    Sp = Range("B17").Value
    Dim So1 As Double
    So1 = Range("B6").Value
    So = So1 / 100
    Dim Hserv1 As Double
    Hserv1 = Range("B13").Value
    Dim Ah As Double
    Ah = Range("B15").Value
    Hserv = Hserv1 + Ah
    X = 1
    f = 1 / 3 + 1 / (2 * N) + 1 / (6 * (N ^ 2))
    Fa = (N * f + X - 1) / (N + X - 1)
    'Fa = Round(Fa, 4)
    Re = 1.26 * (10 ^ 6) * (Qv / D)

```

```

'Re = Round(Re, 3)
fs = 0.25 / ((Log10((E / (3.7 * D)) + (5.74 / (Re ^ 0.9)))) ^ 2)
'fs = Round(fs, 4)
hf = (8 * fs * L * (Qv ^ 2)) / ((3.14 ^ 2) * (D ^ 5) * 9.80665)
'hf = Round(hf, 3)
hfl = hf * Fa
'Keller e Bliesner
SF = hf / L
SF = Round(SF, 4)
x2 = So / SF
x3 = 1 / Fa
x4 = 1 / (4 ^ (1 / 3))
a = (x3 * x2) - (x3 * (x2 ^ 1.5)) + (x2 ^ 1.5)
a0 = -(1 + a)
x1 = (0.25 + (a0 + 1) ^ 2) ^ 0.5
k = -(a0 + 1 - x1) ^ (1 / 3)
y = 0.5 + x4 * k - x4 * ((a0 + 1 + x1) ^ (1 / 3))
y = Round(y, 3)
LD = y * L
LD = Round(LD)
Range("P6").Value = LD
ND = Round(LD / SL)
Range("P7").Value = ND
LA = L - LD
Range("O6").Value = LA
NA = Round(LA / SL)
Range("O7").Value = NA
QA = NA * q
QA1 = QA * 3600
QA2 = Round(QA1, 2)
Range("O8").Value = QA2
QD = ND * q
QD1 = QD * 3600
QD2 = Round(QD1, 2)
Range("P8").Value = QD2
X = 0.5
f = 1 / 3 + 1 / (2 * NA) + 1 / (6 * (NA ^ 2))
Fa = (NA * f + X - 1) / (NA + X - 1)
Re = 1.26 * (10 ^ 6) * (QA / D)
f = 0.25 / ((Log10((E / (3.7 * D)) + (5.74 / (Re ^ 0.9)))) ^ 2)
hf = (8 * f * LA * (QA ^ 2)) / ((3.14 ^ 2) * (D ^ 5) * 9.80665)
hfl = hf * Fa
Ho = Hserv + 0.75 * hfl + (LA * So) / 2
Range("O9").Value = Round(Ho, 1)
Range("P9").Value = Round(Ho, 1)
Hmin = Hserv - 0.25 * hfl - 0.5 * So * LA
deltaH = (Ho - Hmin) / Ho
deltaq = 1 - (1 / ((Ho / Hmin) ^ 0.5))
Range("O10").Value = Round(Hmin, 2)
Range("O11").Value = Round(100 * deltaH, 1)

```

```

Range("O12").Value = Round(100 * deltaq, 1)
Range("BA1").Value = 0
Range("BB1").Value = 0
Range("BC1").Value = Ho
Range("BA2").Value = Sp
For i = 2 To NA
    k = i + 1
    Cells(k, 53) = Sp + (i - 1) * SL
Next i
For j = 1 To NA
    k = j + 1
    Cells(k, 54) = hfl * (1 - ((1 - (Cells(k, 53) / LA)) ^ 3))
    Cells(k, 55) = Ho - Cells(k, 54) - So * Cells(k, 53)
Next j
f = 1 / 3 + 1 / (2 * ND) + 1 / (6 * (ND ^ 2))
Fa = (ND * f + X - 1) / (ND + X - 1)
Re = 1.26 * (10 ^ 6) * (QD / D)
f = 0.25 / ((Log10((E / (3.7 * D)) + (5.74 / (Re ^ 0.9)))) ^ 2)
hf = (8 * f * LD * (QD ^ 2)) / ((3.14 ^ 2) * (D ^ 5) * 9.80665)
hfl = hf * Fa
Range("BE1").Value = 0
Range("BF1").Value = 0
Range("BG1").Value = Ho
Range("BE2").Value = Sp
For i = 2 To ND
    t = i + 1
    Cells(t, 57) = Sp + (i - 1) * SL
Next i
For j = 1 To ND
    k = j + 1
    Cells(k, 58) = hfl * (1 - ((1 - (Cells(k, 57) / LD)) ^ 3))
    Cells(k, 59) = Ho - Cells(k, 58) + So * Cells(k, 57)
Next j
Hmin = Application.WorksheetFunction.Min(Range("BG1:BG2000"))
Hmax = Application.WorksheetFunction.Max(Range("BG1:BG2000"))
deltaH = (Hmax - Hmin) / Hmax
deltaq = 1 - (1 / ((Hmax / Hmin) ^ 0.5))
Range("P10").Value = Round(Hmin, 2)
Range("P11").Value = Round(100 * deltaH, 2)
Range("P12").Value = Round(100 * deltaq, 2)
End Sub

```

**APPENDIX II. Determination and analysis of the real root of the Keller and Bliesner
(1990) cubic equation**

Spiegel et al. (2012) presented an explicit formula for solving the cubic equation of the type $y^3 + a_2y^2 + a_1y + a_0 = 0$ stated below.

Let y_1, y_2 and y_3 be the roots of the cubic equation.

$$P = \frac{3a_1 - a_2^2}{9}, \quad (29)$$

$$M = \frac{9a_1a_2 - 27a_0 - 2a_2^3}{54}, \quad (30)$$

$$S = (M + \sqrt{P^3 + M^2})^{1/3} \quad (31)$$

$$T = (M - \sqrt{P^3 + M^2})^{1/3}, \quad (32)$$

where $ST = -P$.

The solution to the cubic equation is given by:

$$y_1 = S + T - \frac{a_2}{3}, \quad (33)$$

If a_0, a_1 and a_2 are real and $G = P^3 + M^2$ is the discriminant, then

- i. one root is real and two are complex conjugates if $G > 0$;
- ii. all roots are real and at least two are equal if $G = 0$; and
- iii. all roots are real and unequal and $G < 0$.

Keller and Bliesner polynomial discriminant analysis (1990)

Initially, it was demonstrated that the discriminant of Equation 13 has only one real root, using the solution of the cubic Equation presented by Spiegel et al. (2012).

Equation 13 must be in the form $y^3 + a_2y^2 + a_1y + a_0 = 0$ to apply the solution of the cubic equation presented by Spiegel et al. (2012). In this way, with the term $(1 - y)^3$ expanded and replaced in Equation 13, we obtain Equation 34 by performing algebraic manipulations.

$$2y^3 - 3y^2 + 3y - \left\{ 1 + \frac{S_0 L_T}{h f_T} \left[1 - \left(\frac{F a S_0 L_T}{h f_T} \right)^{0.5} \right] + \left(\frac{F a S_0 L_T}{h f_T} \right)^{1.5} \right\} = 0 \quad (34)$$

Let $S_f = h_f/L_T$ be the head loss gradient (mm^{-1}). By Equation 9, $h f_T = h f(Fa) \Rightarrow h f = h f_T/Fa$. Therefore, $S_f = h f_T/(L_T Fa)$. Consequently, $1/S_f = (L_T Fa)/h f_T$ and $1/S_f Fa = L_T/h f_T$. Replacing this result in Equation 34, we obtain Equation 35.

$$2y^3 - 3y^2 + 3y - \left\{ 1 + \frac{S_0}{S_f Fa} \left[1 - \left(\frac{S_0}{S_f} \right)^{0.5} \right] + \left(\frac{S_0}{S_f} \right)^{1.5} \right\} = 0 \quad (35)$$

$$\Rightarrow 2y^3 - 3y^2 + 3y - \left[\frac{1}{Fa} \frac{S_0}{S_f} - \frac{1}{Fa} \left(\frac{S_0}{S_f} \right)^{1.5} + \left(\frac{S_0}{S_f} \right)^{1.5} + 1 \right] = 0 \quad (36)$$

Denoting $a = -\left\{ (1/Fa)(S_0/S_f) - (1/Fa)[(S_0/S_f)]^{1.5} + [(S_0/S_f)]^{1.5} + 1 \right\}$ in

Equation 36 and dividing both sides by 2 gives Equation 37.

$$y^3 - \frac{3}{2}y^2 + \frac{3}{2}y + \frac{a}{2} = 0 \quad (37)$$

Denoting $a_0 = a/2$, $a_1 = 3/2$ and $a_2 = -3/2$ and using Equations 14, 15, and 16, $P = 1/4$ and $M = -(1/4) \cdot (a + 1)$. The discriminant of Equation 13 is given by Equation 38.

$$G = P^3 + M^2 = \left(\frac{1}{4} \right)^3 + \frac{1}{16} (a + 1)^2 \quad (38)$$

Determination of the real root of the polynomial

The root equation that satisfied the conditions of the Keller and Bliesner (1990) method was determined and analyzed to obtain the actual intervals of the hydraulic parameters.

According to Spiegel et al. (2012), the real root of the cubic equation $y^3 + a_2 y^2 + a_1 y + a_0 = 0$ is given by Equation 18. Replacing $a_2 = -3/2$ obtains Equation 39.

$$y_1 = S + T - \frac{a_2}{3} = S + T - \frac{1}{3} \left(-\frac{3}{2} \right) = S + T + \frac{1}{2}. \quad (39)$$

Using P and M , previously obtained and by Equations 16 and 17, Equations 40 and 41 were defined as:

$$S = \left(-\frac{1}{4}(a+1) + \sqrt{\left(\frac{1}{4}\right)^3 + \left(-\frac{1}{4}(a+1)\right)^2} \right)^{1/3} \quad (40)$$

$$T = \left(-\frac{1}{4}(a_0+1) - \sqrt{\left(\frac{1}{4}\right)^3 + \left(-\frac{1}{4}(a_0+1)\right)^2} \right)^{1/3} \quad (41)$$

Developing Equations 40 and 41 resulted in Equations 42 and 43.

$$S = -\frac{1}{4^{1/3}} \left(a_0 + 1 - \left(\frac{1}{4} + (a_0 + 1)^2 \right)^{1/2} \right)^{1/3} \quad (42)$$

$$T = -\frac{1}{4^{1/3}} \left(a_0 + 1 + \left(\frac{1}{4} + (a_0 + 1)^2 \right)^{1/2} \right)^{1/3} \quad (43)$$

Replacing Equations 42 and 43 in Equation 39, the real root of the Keller and Bliesner (1990) polynomial was obtained:

$$y_1 = \frac{1}{2} - \frac{1}{4^{1/3}} \left(a + 1 - \left(\frac{1}{4} + (a + 1)^2 \right)^{1/2} \right)^{1/3} - \frac{1}{4^{1/3}} \left(a + 1 + \left(\frac{1}{4} + (a + 1)^2 \right)^{1/2} \right)^{1/3} \quad (44)$$

Analysis of the parameters of the Keller and Bliesner polynomial (1990)

Equation 13 has a single real root, given by Equation 44. This solution is valid for all real numbers for the real interval $[0, 5, 1]$. Consider the polynomial $P(y)$ derived from Equation 37.

$$P(y) = y^3 - \frac{3}{2}y^2 + \frac{3}{2}y + \frac{a}{2} \quad (45)$$

The polynomial $P(y)$ is increasing $\forall a \in \mathbb{R}$. In fact, since $P(y)$ is a polynomial function, $P(y)$ is continuous and differentiable at $\mathbb{R}$. Deriving $P(y)$ obtains $P'(y) = 3y^2 - 3y + 3/2$. Analyzing the signal, $P'(y)$ must be $> 0, \forall y \in \mathbb{R}$.

Using the Theorem 1, $P(y)$ is increasing $\forall y \in \mathbb{R}$. In particular, $P(y)$ is rising $\forall a_0 \in \mathbb{R}$.

Theorem 1. Let f be a continuous function on a closed interval $[a, b]$ and differentiable on the open interval (a, b) ; thus:

- i. If $f'(x) > 0$ for all $x \in (a, b)$, then f is increasing in (a, b) .
- ii. If $f'(x) < 0$ for all $x \in (a, b)$, then f is decreasing in (a, b) .

Notice that:

For $a = -2$, obtain $P_1(y) = y^3 - 3/2 y^2 + 3/2 y - 2/2$ and $P_1(y) = 0 \Leftrightarrow y = 0.5$.

For $a = -1$, obtain $P_2(y) = y^3 - 3/2 y^2 + 3/2 y - 0.5$ and $P_2(y) = 0 \Leftrightarrow y = 1$.

Therefore, if $a \in [-1, -2]$, then $y \in [0.5, 1]$ since $P(y)$ is increasing.

Denote $x = S_0/S_f$, and obtain $a = -[1/Fa + (1 - 1/Fa)x^{1.5} + 1]$. The numeral value of Fa for a pipe with multiple outlets and $m = 2$ is equal to 0.34 (Scaloppi, 1988). Therefore, $a = -[1/0.34 + (1 - 1/0.34)x^{1.5} + 1]$.

For $-2 \leq a \leq -1$, inequation is obtained:

$$-2 \leq -\left[\frac{1}{0.34} + \left(1 - \frac{1}{0.34}\right)x^{1.5} + 1\right] \leq -1 \quad (1)$$

Inequation (1) was solved using the Wolfram Research (2022) tool, and the solution found was $\left\{x \in \mathbb{R}/0 \leq x \leq 1 \text{ or } \left(17(83 + \sqrt{2533})\right)/2178 \leq x \leq 2500/1089\right\}$, which is equivalent to, approximately, the range $[0, 1] \cup [1.0407, 2.2957]$.

When a lateral line is laid on a uniform slope, the pressure profile along the lateral line results from the head loss and slope gain or loss (Wu et al., 1983). There are five pressure profiles in three general types (I for leveled and uphill laterals and II and III for downslope laterals). Therefore, for downslope lateral lines, there are four profiles (Figure 2) and two types (II and III). Pressure profiles are identified by the ratio $\Delta H'/\Delta H$, where $\Delta H'$ is the total energy gain by a uniform downslope at the end of the line (m) and ΔH is the total energy drop by friction at the end of the line (m).

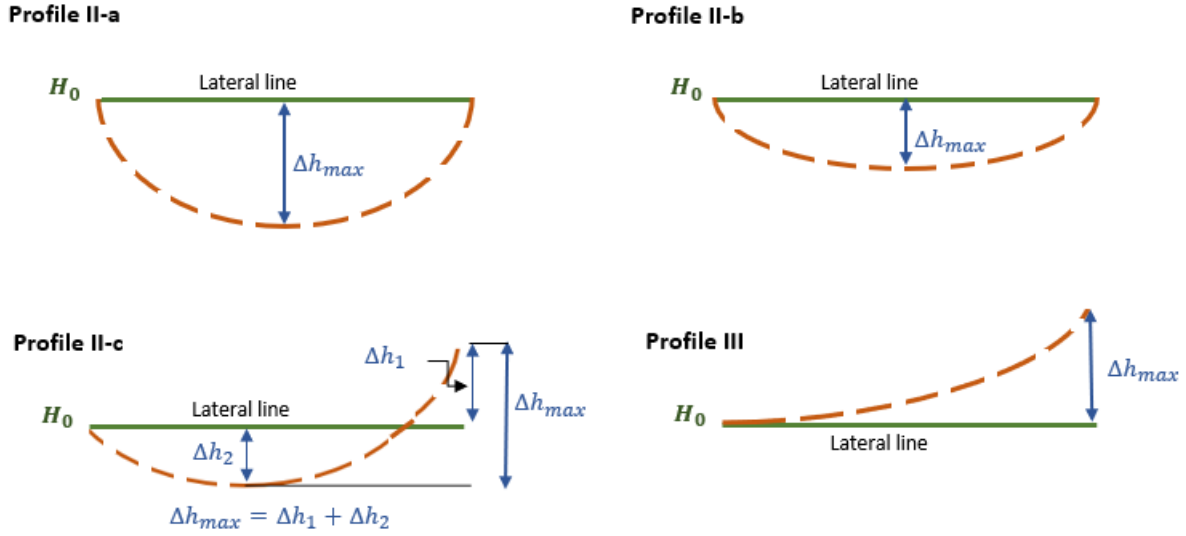


Fig. 2. Pressure distribution profiles (Wu et al., 1983)

The classification conditions of slope pressure profiles for application in sprinkler irrigation systems were revised. Profile II was classified into three sub profiles according to the ratio $\Delta H'/\Delta H$:

Profile II-a: $0 < \Delta H'/\Delta H < 1$, the pressure at the end of the line is less than the inlet pressure (H_0).

Profile II-b: $\Delta H'/\Delta H = 1$, the pressure at the end of the line is equal to H_0 .

Profile II-c: $1 < \Delta H'/\Delta H < 3$, the pressure at the end of the line is higher than H_0 .

The limits of each subprofile proposed for sprinkler lateral lines come from $(m + 1)$, where $m = 2$, that is, it is the exponent of the flow in the Darcy-Weisbach head loss equation.

Profile III occurs when the energy gain per slope is greater than the loss of pressure due to friction in any part of the lateral line. This way: $\Delta H'/\Delta H \geq 3$.

The pressure distribution profiles can be seen in Figure 2. Δh_{max} is the maximum pressure variation.

By definition, $\Delta H' = S_0 L_T$ and $\Delta H = hf$. Thus, $\Delta H' / \Delta H = S_0 L_T / hf = S_0 / S_f = p$.

However, $p \in [0,1] \cup [1.0407, 2.2957]$, then, $H' / H \in [0,1] \cup [1.0407, 2.2957]$. Therefore, in conventional sprinkler irrigation systems under a uniform slope, lateral lines can be paired if the minimum pressure is not at one end of the lateral line, i.e., when pressure distribution profiles II-a, II-b, or II-c occur.

Furthermore, in profile II-c, the laterals will be paired only when the H' / H ratio is greater than $\left(17(83 + \sqrt{2533})\right) / 2178 \cong 1.0407$ and lower than $2500 / 1089 \cong 2.2957$. In the value interval of $]1, (17(83 + \sqrt{2533}))[\cup](2500 / 1089), 3[$, it is not possible to determine a root that satisfies the condition imposed by the equation developed by Keller and Bliesner (1990).

REFERENCES

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada/Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. - 2. ed. -- Brasília: ANA, 2021. 130 p.: il. ISBN: 978-65-88101-10-0

Baiamonte, G., G. Provenzano, G., and G. Rallo. 2015. "Analytical Approach Determining the Optimal Length of Paired Drip Laterals in Uniformly Sloped Fields". *J. Irrig. Drain. Eng.*, 141(1), 04014042. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000768](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000768).

Baiamonte, G. 2017. "Design of concave and convex paired sloped drip laterals". *Agric. Water Manag.* 191, 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.015>.

Baiamonte, G. 2018. "Advances in designing drip irrigation laterals". *Agric. Water Manag.* 199, 157-174. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.015>.

Carvalho, D. F., R. C. F. Martins, J. J. S. Santos, G. C. Teles, M. A. D. Gentile, M. A. D., and M. S. Oliveira. 2020. "Evolution and current scenario of irrigated area in Brazil: Systematic data analysis". *Rev. Bras. de Eng. Agr. e Amb.*, 24(8), 505-511. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n8p505-511>.

Christiansen, J. E. 1942. *Irrigation by Sprinkling*. California Agricultural Experiment Station Bulletin 670, University of California, Davis, California.

Hamidov, A., and K. Helming. 2020. "Sustainability considerations in water–energy–food nexus research in irrigated agriculture". *Sustainability*, 12(15), 6274. <https://doi.org/10.3390/su12156274>.

Keller, J., and R. D. Bliesner. 1990. *Sprinkler and trickle irrigation*. New York, USA: Van Nostrand Reinhold.

Minhoni, R. T. A., F. F. S. Pereira, T. B. G. Silva, E. R. Castro, and J. C. C. Saad. 2020. "The performance of explicit formulas for determining the Darcy-Weisbach friction factor". *Eng. Agr.*, 40(2), 258-265. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p258-265/2020>.

Montserrat, J., J. Barragan, and L. Cots. 2018. "Design of paired laterals on uniformly sloping fields". *J. Irrig. Drain. Eng.* 144(6), 0401808. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001308](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001308).

Robles, O., E. Playán, J. Cavero, and N. Zapata. 2017. "Assessing low-pressure solid-set sprinkler irrigation in maize". *Agric. Water Manag.* 191, 37-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.001>.

Saad, J. C. C. 2021. *Subsídios para o dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional*. Sec 8 in “Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: técnica e cultura”, 133-169. Piracicaba, Brasil: ESALQ – USP.

Scaloppi, E. J. 1988. "Adjusted F factor for multiple outlet pipes". *J. Irrig. Drain. Eng.*, 114, 169-174. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1988\)114:1\(169\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1988)114:1(169)).

Scaloppi, E. J., and R. G. Allen. 1993. "Hydraulics of irrigation laterals: comparative analysis". *J. Irrig. Drain. Eng.*, 110(1), 91-115. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:1\(91\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:1(91)).

Spiegel, M. R., S. Lipschutz, and J. Liu. 2012. *Manual de fórmulas e tabelas matemáticas: coleção Schaum*. 3. ed. São Paulo, BR: Bookman.

Swamee, P. K., and A. K. Jain. 1976. "Explicit equations for pipe flow problems". *J. Hydraul. Eng.*, 102(5), 657-664. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004542>.

Wolfram Research, INC. 2022. "Mathematica Online". Version 13.1. Accessed April 10, 2022. <https://www.wolfram.com/mathematica>.

Wu, I. P., C. A. Saruwatari, and H. M. Gitlin. 1983. "Design of drip irrigation lateral length on uniform slopes". *Irrig. Sci.*, 4(2), 117-135. <https://doi.org/10.1007/BF00273380>.

CAPÍTULO 2

Otimização do comprimento da linha lateral utilizando aspersores com diferentes bocais

RESUMO

Em irrigação pressurizada, o comprimento da linha lateral é limitado pela sua variação de vazão ou variação de pressão. Por exemplo, em uma lateral em nível, a pressão máxima ocorre na entrada da linha. A partir disso, ocorre a perda de carga e a pressão vai diminuindo até o ponto em que temos os 10% de variação de vazão, valor definido para projetos de sistemas de irrigação. É esse ponto que determina o comprimento máximo da linha lateral. Normalmente, é utilizado em irrigação por aspersão convencional um único tipo de aspersor em toda linha lateral. É possível que aspersores forneçam aproximadamente a mesma vazão em cargas de pressão diferentes, desde que tenham bocais distintos. Neste trabalho foi desenvolvido um procedimento que combina modelos de aspersores com bocais distintos, criteriosamente selecionados, na mesma linha lateral, resultando no aumento do comprimento desta linha e respeitando o critério de máxima variação de vazão. Uma simulação teórica do procedimento foi validada em campo e mostrou ser eficiente, aumentando dois aspersores no comprimento na linha lateral, que corresponde a 24 metros, e manteve a variação de vazão menor que 10%.

Palavras-chave: hidráulica; dimensionamento; variação de vazão.

ABSTRACT

In pressurized irrigation, the length of the lateral line is limited by its flow rate or pressure variation. For example, on a level side, the maximum pressure occurs at the entrance to the line. After that, there is a head loss and the pressure decreases to the point where we have a 10% flow variation, a value defined for irrigation system projects. It is this point that determines the maximum length of the lateral line. Usually, in conventional sprinkler irrigation systems, a single type of sprinkler is used throughout the lateral line. It is possible for sprinklers to provide approximately the same flow at different pressure loads, provided they have different nozzles. In this work, a procedure was developed that combines models of sprinklers with different

nozzles, carefully selected, on the same lateral line, evolving in increasing the length of this line and respecting the flow rate variation. A theoretical simulation of the procedure was validated in the field and proved to be efficient, increasing two sprinklers, which correspond to 24 meters, more in length on the lateral line, keeping the flow rate variation below 10%.

Keywords: hydraulics; design; flow variation.

2.1 INTRODUÇÃO

A irrigação por aspersão convencional é utilizada por pequenos agricultores para o cultivo de batatas, hortaliças, em grandes centros urbanos. Dentre os métodos de irrigação, é um dos mais eficientes, pois possibilita o controle de fluxo de água, podendo ser utilizados em terrenos com declínios (TESTEZLAF, 2017; LI; REN, 2022; YAN et al., 2020; SOLGI et al., 2022).

No dimensionamento das linhas laterais, o seu comprimento é limitado pela sua variação de vazão ou variação de pressão (KELLER; KARMELI, 1974; BAIAMONTE et al., 2021). Por exemplo, em uma linha lateral em nível, a pressão máxima ocorre na entrada da linha. A partir disso, ocorre a perda de carga e a pressão vai diminuindo até o ponto em que a variação de vazão é 10%. Este ponto é o comprimento máximo da linha lateral, que normalmente utiliza-se um único tipo de aspersor.

O gradiente de energia da linha é empregado com frequência para a projeção de linhas laterais. O procedimento assume que a vazão do aspersor seja uniforme e sua distribuição contínua ao longo da linha lateral, para a variação de pressão menor que 20% (WU; GITLIN, 1975; BAIAMONTE, 2020).

A vazão do aspersor é diretamente proporcional à raiz da carga de pressão e ao diâmetro do bocal ao quadrado. É possível que aspersores forneçam aproximadamente a mesma vazão em cargas de pressão diferentes, desde que tenham bocais distintos. A combinação de aspersores com bocais distintos, criteriosamente selecionados, na mesma linha lateral pode resultar no aumento do comprimento da linha lateral, respeitando o critério de máxima variação de vazão menor ou igual a 10%.

O objetivo deste trabalho foi determinar um procedimento para orientar a escolha dos bocais compatíveis para uso na mesma linha lateral de aspersores convencional, e, também definir o ponto ótimo de transição entre modelos.

Para validar o método, foi instalado em campo uma linha lateral de aspersores, com bocais distintos, com a configuração ótima obtida pelo método desenvolvido, coletando as devidas medições de carga de pressão e de vazão ao longo da linha.

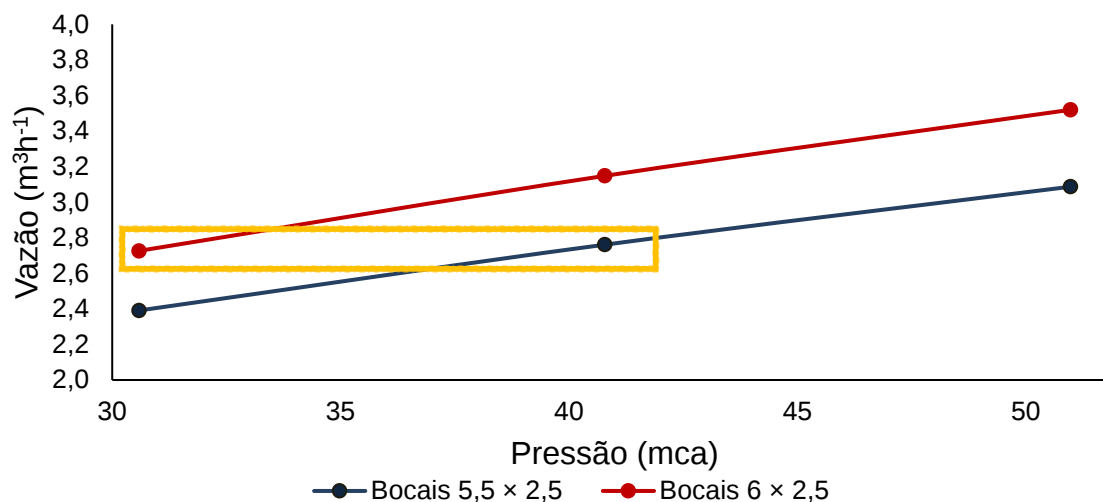
2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Linhas laterais mais longas implicam em menor custo inicial dos sistemas de irrigação por aspersão portátil e semiportátil. No entanto, para que se tenha uniformidade de aplicação de água, o comprimento da tubulação é limitado pelo critério que estabelece que a variação de vazão entre aspersores deva ser menor que 10%. Uma vez que o expoente da pressão (x) na relação vazão e pressão do aspersor é 0,5, tal critério equivale a uma variação de pressão menor que aproximadamente 20%.

A hipótese desta pesquisa foi: ao se utilizar dois conjuntos distintos de aspersores, criteriosamente selecionados, em diferentes trechos da mesma tubulação, é possível aumentar o comprimento da linha lateral em nível respeitando o critério de que a variação de vazão entre aspersores seja menor que 10%.

A premissa inicial é selecionar aspersores com conjuntos de bocais que forneçam vazões semelhantes com pressões que difiram de, no máximo, 10 mca e que estejam dentro da mesma faixa de operação recomendada pelo fabricante (Figura 1).

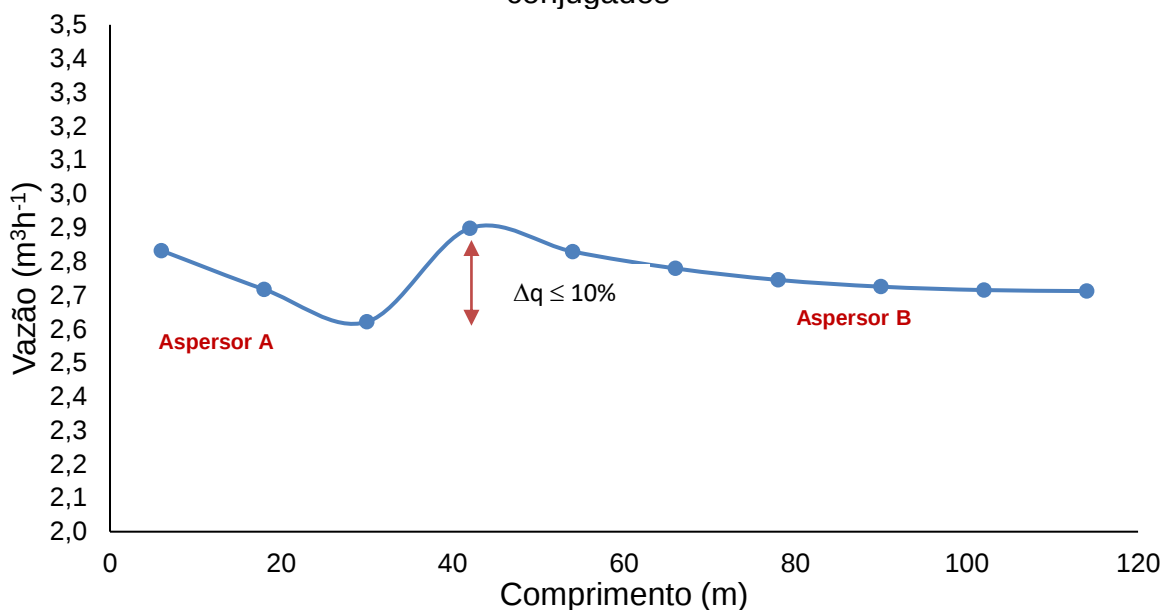
Figura 1 - Curvas da vazão do aspersor (m^3s^{-1}) em função da pressão (mca) para dois aspersores com conjuntos de bocais distintos e a correspondência de vazão entre eles



Fonte: Elaborada pela autora.

A linha lateral proposta (Figura 2) opera em nível e terá no trecho inicial aspersores de menores bocais, justamente onde ocorrem os maiores valores de pressão na tubulação. No segundo trecho, a lateral terá aspersores com maiores bocais, uma vez que as pressões são menores. Desta maneira é possível manter a variação de vazão menor que 10% por uma extensão maior do que em uma linha lateral com todos os aspersores idênticos.

Figura 2 - Perfil de distribuição de vazão do emissor em linha lateral com aspersores conjugados



Fonte: Elaborada pela autora.

A hipótese formulada está fundamentada na equação para o cálculo da vazão q , em m^3s^{-1} no aspersor (Equação 1), pois é uma combinação da carga de pressão a que está submetido e da área da seção de escoamento, proporcional aos diâmetros dos bocais. Desta forma, para se manter a vazão relativamente uniforme, no trecho inicial combina-se maiores pressões com aspersores de menores bocais, enquanto no segundo trecho associa-se menores pressões com aspersores de maiores bocais.

$$q = 0.012522 \sqrt{H} C_d \sum_{n=1}^N (d_n^2) \quad (1)$$

em que H é a carga de pressão na i -ésima saída (mca), C_d o coeficiente de descarga, n o número de bocais de um único aspersor e d_n o diâmetro interno do bocal n (mm).

Denotando por $C_i = 0.012522 C_d \sum_{n=1}^N (d_n^2)$ o coeficiente com valores constantes na Equação (1), este é calculado através das informações contidas no catálogo do aspersor e para cada aspersor selecionado para o procedimento.

Uma vez escolhidos os aspersores a serem utilizados, deve-se definir o ponto adequado de troca, que é fundamental para se ter o máximo comprimento possível sem que a variação de vazão entre aspersores ultrapasse o limite de 10%.

2.2.1 Determinação do ponto ótimo de troca de aspersores

O ponto ótimo de troca de aspersores foi definido com o auxílio de uma rotina de programação elaborada no *software* de alta performance *Matrix Laboratory* (MaTLaB), versão R2022b (Apêndice A). O fluxograma das etapas da rotina de programação é apresentado no Apêndice B.

A Figura 3, exibe os dados de entrada da rotina, sendo identificados como *Aspersor B* e *Aspersor A*, o primeiro e o segundo aspersor utilizado no processo, nesta ordem.

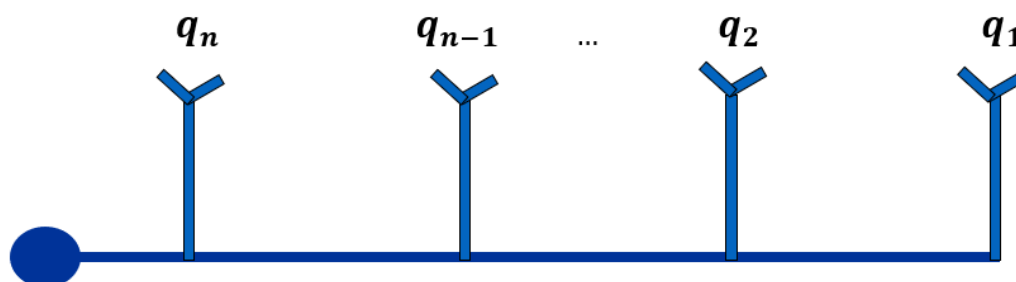
Figura 3 – Dados de entrada

<i>Tubulação</i>	IN <i>Aspersor A</i>	<i>Aspersor B</i>
-Diâmetro (mm)	-Diâmetro do bocal 1 (mm)	-Diâmetro do bocal 1 (mm)
-Rugosidade absoluta (mm)	-Diâmetro do bocal 2 (mm)	-Diâmetro do bocal 2 (mm)
-Espaçamento entre aspersores (m)	-Coeficiente da equação de vazão	-Coeficiente da equação de vazão

Fonte: Elaborada pela autora.

O procedimento inicia-se pela última posição da linha lateral, extremidade a jusante, como identificado na Figura 4, com o aspersor de bocais com maior diâmetro, *Aspersor B*, operando com a menor pressão.

Figura 4 - Representação esquemática do procedimento



Fonte: Elaborada pela autora.

Em sistemas de irrigação pressurizados, a perda de energia (ou perda de carga) no interior de uma tubulação (h_f , em mca) pode ser calculada pela equação de Darcy-Weisbach, Equação (2).

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

em que f é o fator de atrito, L o comprimento da tubulação (m), Q a vazão da tubulação (m^3s^{-1}), D o diâmetro interno da tubulação (m) e g a aceleração da gravidade (ms^{-2}).

Para o cálculo de f foi utilizado a equação de Swamee e Jain (1976), Equação (3), que é recomendada para o regime de escoamento turbulento, satisfazendo as

faixas de $1 \times 10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 1 \times 10^{-2}$ e $5 \times 10^{-3} \leq Re \leq 1 \times 10^8$, sendo ε a rugosidade absoluta do tubo (m) e Re o número de Reynolds (adimensional).

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} \right) + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right]^2} \quad (3)$$

Com a viscosidade cinemática da água igual a $1,003 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$, na temperatura de 20°C (KESTIN; SOKOLOV, 1978), o parâmetro Re é determinado pela Equação (4).

$$Re = 1.26 \times 10^6 \frac{Q}{D} \quad (4)$$

No primeiro trecho da rotina de programação, a vazão considerada é a mesma vazão do *Aspersor B*, e, com este valor, é determinado a perda de carga ocorrida neste trecho pelas Equações (4), (3) e (2), respectivamente. Já a variação de vazão (Δq) entre aspersores (Equação 5) é igual a zero, na etapa inicial.

$$\Delta q = \frac{q_{max} - q_{min}}{q_{max}} \quad (5)$$

em que q_{max} é a vazão máxima na linha (m^3s^{-1}), q_{min} é a vazão mínima na linha lateral (m^3s^{-1}).

Para os demais trechos que utilizam o *Aspersor B*, a vazão, pressão e variação de vazão são calculados de acordo com a sub-rotina *NS*, descrita no Apêndice C, com coeficiente da equação de vazão do *Aspersor B* e os dados de vazão e pressão obtidos no primeiro trecho.

As ações de *NS* são executadas até que a variação de vazão seja maior que 10% e este será o ponto de troca do modelo de aspersor, isto é, muda-se o *Aspersor B* para o *Aspersor A*.

A rotina dá continuidade ao procedimento executando novamente *NS*, mas considerando agora o coeficiente da equação de vazão do *Aspersor A*. A segunda execução de *NS* ocorre até $\Delta q > 10\%$.

Em seguida, a pressão de entrada na linha lateral é calculada com a pressão do último aspersor da segunda execução de *NS* mais a perda de carga no trecho entre a saída da linha principal até o primeiro aspersor.

A vazão de entrada na linha lateral é igual a soma das vazões em todas as saídas, obtida através de acumulador inserido na rotina de programação.

Por fim, a linha lateral é reescrita no sentido inverso, ou seja, do ponto de derivação para o final da linha lateral, gerando um relatório que discrimina os dados para cada trecho da linha: carga de pressão (mca), vazão na linha lateral (m^3h^{-1}) e (m^3s^{-1}), perda de carga (mca), vazão do aspersor (m^3h^{-1}) e variação de vazão, em decimal.

2.2.2 Estudos de caso

2.2.2.1 Caso 1

Os aspersores selecionados para este trabalho são de plástico, marca NaanDanJain, modelo 5035SD 3/4", para sobre copa, de impacto e rotativo, com bocal duplo e coeficiente de uniformidade de distribuição entre 88% e 92%, para o espaçamento 12 m×12 m (NAANDANJAIN, 2022).

De acordo com o catálogo do fabricante, o Quadro 1 apresenta as informações de diâmetro interno do bocal (mm), pressão (bar), vazão (m^3h^{-1}) e a relação vazão-pressão dos aspersores com cores de bocal laranja e vermelho.

Quadro 1 – Diâmetro dos bocais, pressão, vazão e relação vazão – pressão para os aspersores 5035SD com bocais 5,5 mm × 2,5 mm e 6 mm × 2,5 mm

Bocal (mm)	Pressão (mca)	Vazão (m^3h^{-1})	Equação
5,5 × 2,5 Laranja	30,6	2,39	$q_{5,5} = 0,4323H^{0,5}$
	40,8	2,76	
	51,0	3,09	
6 × 2,5 Vermelho	30,6	2,70	$q_6 = 0,4929H^{0,5}$
	40,8	3,16	
	51,0	3,54	

Fonte: NaanDaanJain, 2022. q em m^3h^{-1} ; H em mca.

A tubulação utilizada possui diâmetro de 46,8 mm, rugosidade absoluta 0,003334 mm e os aspersores são espaçados a cada 12 m.

2.2.2.2 Caso 2

Os aspersores selecionados para este segundo estudo de caso são de plástico, marca Agropolo, modelos 2864-ERL e 2877-ERL, de impacto e rotativo, com bocal duplo e o espaçamento escolhido foi 18 m × 18 m (AGROPOLO, 2022).

De acordo com o catálogo do fabricante, o Quadro 2 apresenta as informações de diâmetro interno do bocal (mm), pressão (mca), vazão (m³h⁻¹) e relação vazão-pressão para ambos os modelos.

Quadro 2 – Diâmetro dos bocais, pressão, vazão e relação vazão – pressão, aspersores 2864-ERL e 2877-ERL

Bocal (mm)	Pressão (mca)	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Equação
6,2 × 4,6 2864-ERL	25	3,22	$q_{2864} = 0,6463 H^{0,5}$
	30	3,53	
	35	3,81	
	40	4,07	
	45	4,32	
7,1 × 4,6 2877-ERL	25	3,66	$q_{2877} = 0,7324 H^{0,5}$
	30	4,01	
	35	4,33	
	40	4,63	
	45	4,91	

Fonte: Agropolo, 2022. q em m³h⁻¹; H em mca.

A tubulação utilizada possui diâmetro interno de 70,4 mm, rugosidade absoluta 0,003334 mm e os aspersores são espaçados a cada 18 m na linha lateral.

2.2.3 Validação em campo

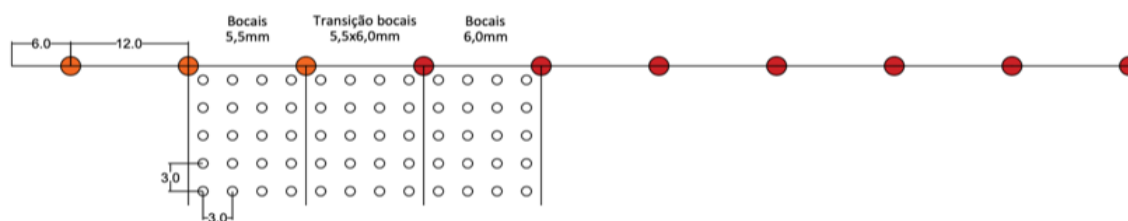
A linha lateral com aspersores conjugados definida no Estudo de Caso 1 foi instalada em campo, na condição em nível, para validar as equações hidráulicas do modelo proposto e resumido no fluxograma (Apêndice B).

O experimento foi realizado na área experimental da FCA – UNESP, Botucatu, SP, Brasil. Medições da pressão em vários pontos ao longo da lateral foram realizadas para traçar o perfil de distribuição.

O impacto da troca de bocais ao longo da linha lateral na uniformidade de distribuição de água foi avaliado com ensaio de distribuição de água entre os

aspersores representados no croqui da Figura 5. O primeiro aspersor dista 6 m do início da linha lateral e os demais aspersores estão espaçados a 12 m.

Figura 5 - Croqui dos ensaios dos aspersores adjacentes à troca de bocais



Fonte: Elaborada pela autora.

Para a coleta de água foram instalados pluviômetros equidistantes em torno dos aspersores a serem testados. Assim, a área ao redor dos aspersores foi dividida em subárea quadradas de 3 m × 3 m. Os coletores foram colocados no centro de cada subárea. O sistema foi ligado por uma hora, suficiente para obter um volume médio de água equivalente. Ao final do ensaio, foi anotada a lâmina de água depositada em cada coletar.

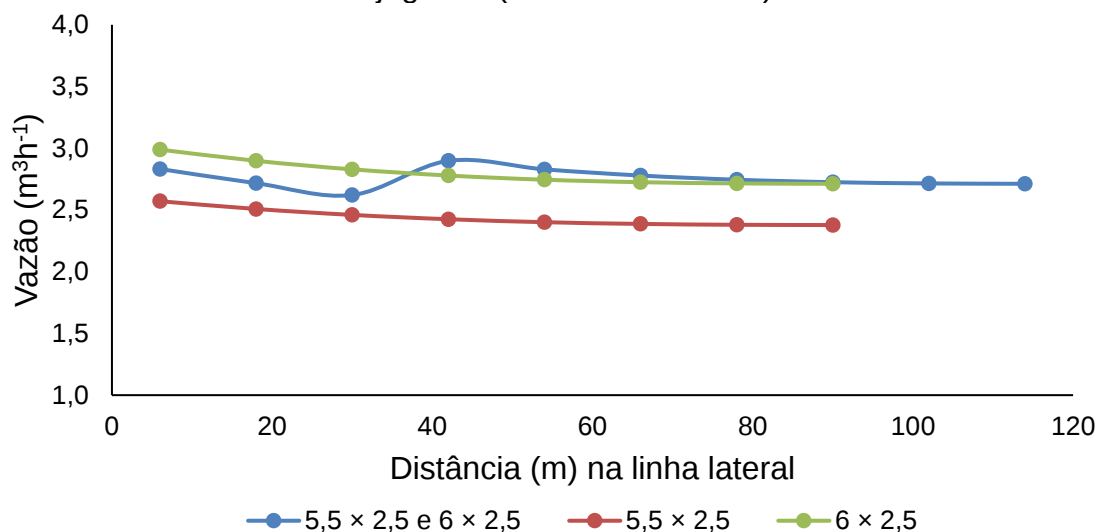
Os indicadores avaliados foram: coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), uniformidade de distribuição (DU) e coeficiente de uniformidade estatístico (CUE), descritos em Keller e Bliesner (1990).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Estudo de caso 1: simulação pelo aplicativo

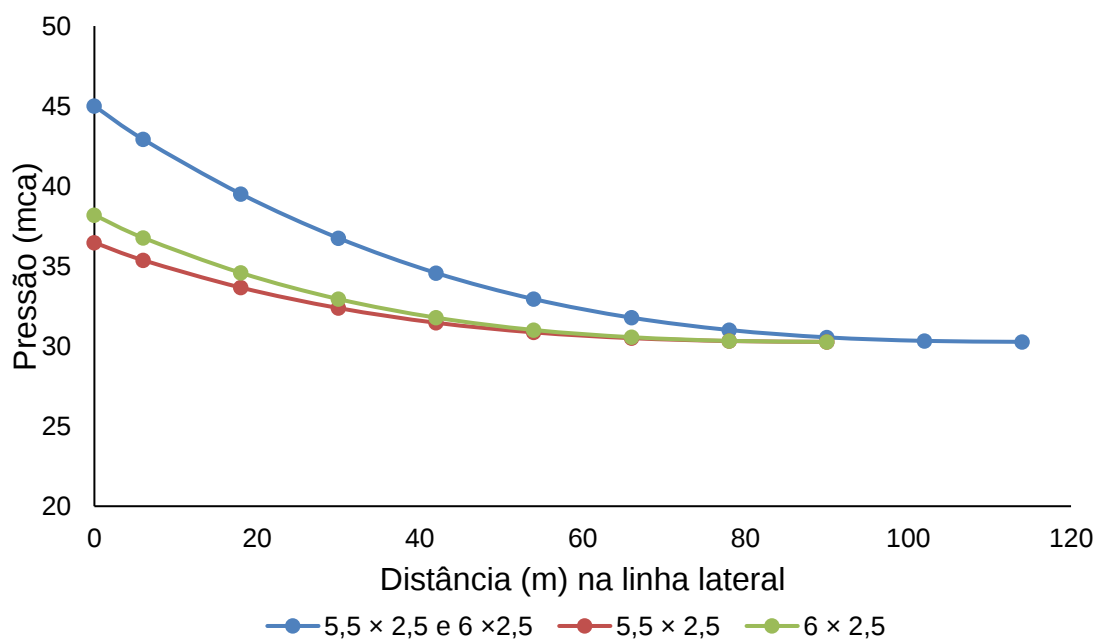
Os perfis de pressão e de vazão nos emissores da linha lateral com aspersores conjugados estão representados nas Figura 6 e Figura 7, respectivamente, indicando o comprimento de 114 m com 10 aspersores, sendo que os três primeiros têm bocais de 5,5 mm × 2,5 mm e os sete finais 6 mm × 2,5 mm.

Figura 6 – Perfil de distribuição de vazão ao longo da linha lateral com aspersores conjugados (Estudo de Caso 1)



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7 – Perfil de distribuição de pressão ao longo da linha lateral com aspersores conjugados (Estudo de Caso 1)



Fonte: Elaborada pela autora.

O desempenho da linha lateral com aspersores conjugados (laranja/ vermelho) foi avaliado comparando com a linha lateral constituída somente de aspersores com bocais 5,5 mm x 2,5 mm (laranja) e com a linha lateral com aspersores 6 mm x 2,5 mm (vermelho), conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Vazão (m^3h^{-1}) e pressão (mca) em função da distância na linha lateral

Distância (m)	Vazão do aspersor (m^3h^{-1})			Pressão (mca)		
	Linha laranja/ vermelha	Linha laranja	Linha vermelha	Linha laranja/ vermelha	Linha laranja	Linha vermelha
0	----	----	----	45	36,47	38,19
6	2,832	2,571	2,989	42,92	35,37	36,77
18	2,717	2,508	2,898	39,51	33,66	34,58
30	2,621	2,460	2,829	36,75	32,38	32,94
42	2,898	2,425	2,779	34,57	31,46	31,78
54	2,829	2,401	2,745	32,94	30,86	31,01
66	2,779	2,387	2,725	31,78	30,50	30,56
78	2,745	2,380	2,715	31,01	30,32	30,33
90	2,725	2,378	2,712	30,55	30,27	30,27
102	2,715	----	----	30,33	----	----
114	2,712	----	----	30,27	----	----
Variação (%)	9,6	7,5	9,3	32,7	14,4	17,7

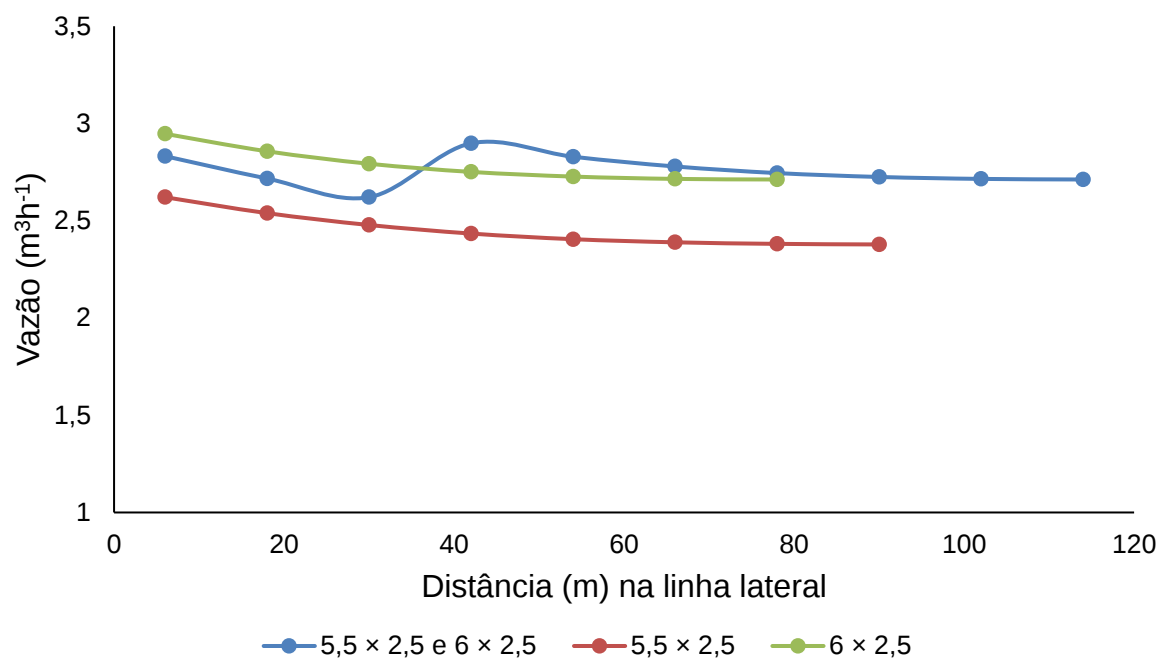
Fonte: Elaborada pela autora.

As três linhas laterais apresentaram variação de vazão abaixo de 10%, uma vez que este foi o critério de dimensionamento estabelecido. No entanto, a linha lateral com aspersores conjugados (laranja/ vermelho) resultou em variação de pressão de 32,7%, porém dentro da faixa de operação especificada pelo fabricante (30,6 mca a 51 mca).

A linha lateral apresentou os três primeiros aspersores com bocais de diâmetros de 5,5 mm × 2,5 mm (laranja) e, do quarto aspersor até o final, aspersores com bocais de 6 mm × 2,5 mm (vermelho), totalizando 10 aspersores e 114 m de comprimento total. Desta forma, a linha lateral com aspersores conjugados (linha laranja/vermelho) teve acréscimo de dois aspersores tanto em relação à linha laranja, quanto à linha vermelho, com incremento de 27% no comprimento total.

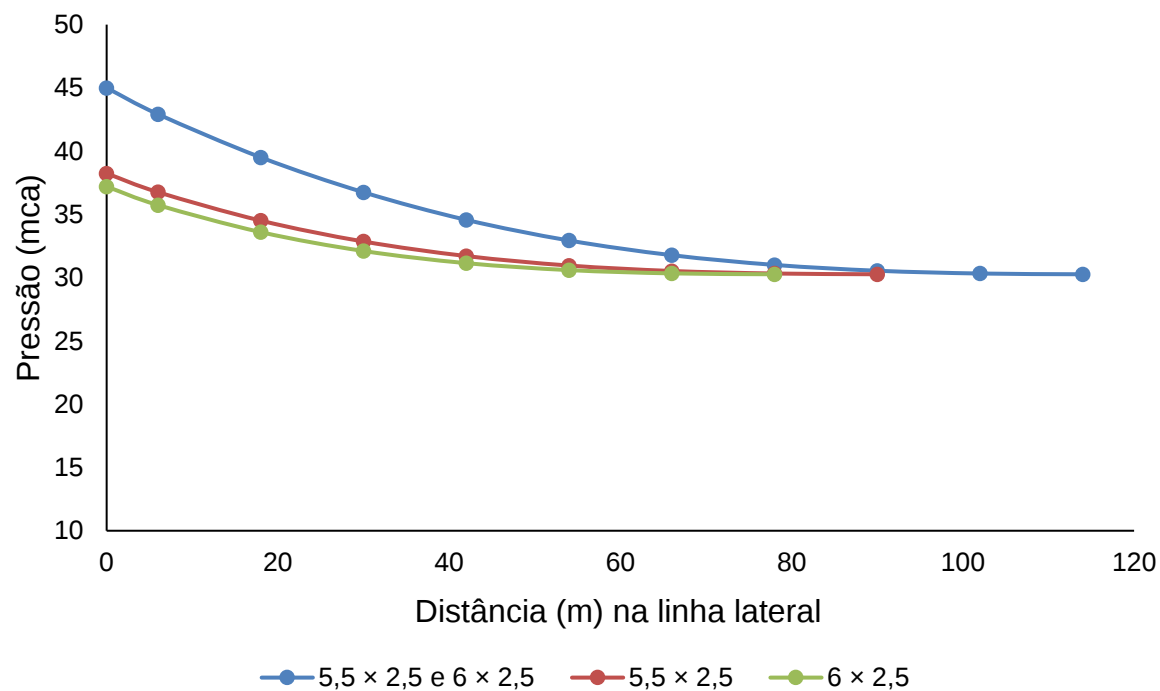
Os perfis de vazão e de pressão nos aspersores das linhas laterais avaliadas estão representados nas Figuras 8 e 9, respectivamente. O perfil de vazão da linha lateral com aspersores conjugados (Figura 8) evidencia o ponto de troca de modelo do aspersor (quarto aspersor), com aumento da vazão do emissor decorrente da troca por modelo com bocais maiores, apesar da pressão ser decrescente com a distância (Figura 9).

Figura 8 – Vazão do aspersor (m^3h^{-1}) em função do comprimento da linha lateral



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 9 – Pressão do aspersor (mca) em função do comprimento da linha lateral

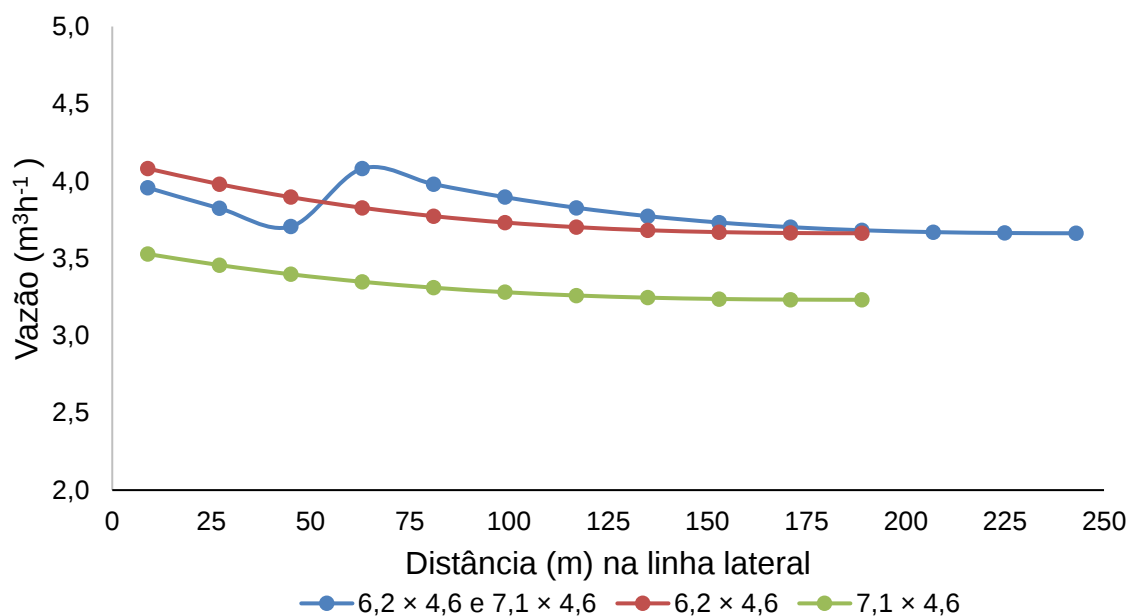


Fonte: Elaborada pela autora.

2.3.2 Estudo de Caso 2: Simulação pelo aplicativo

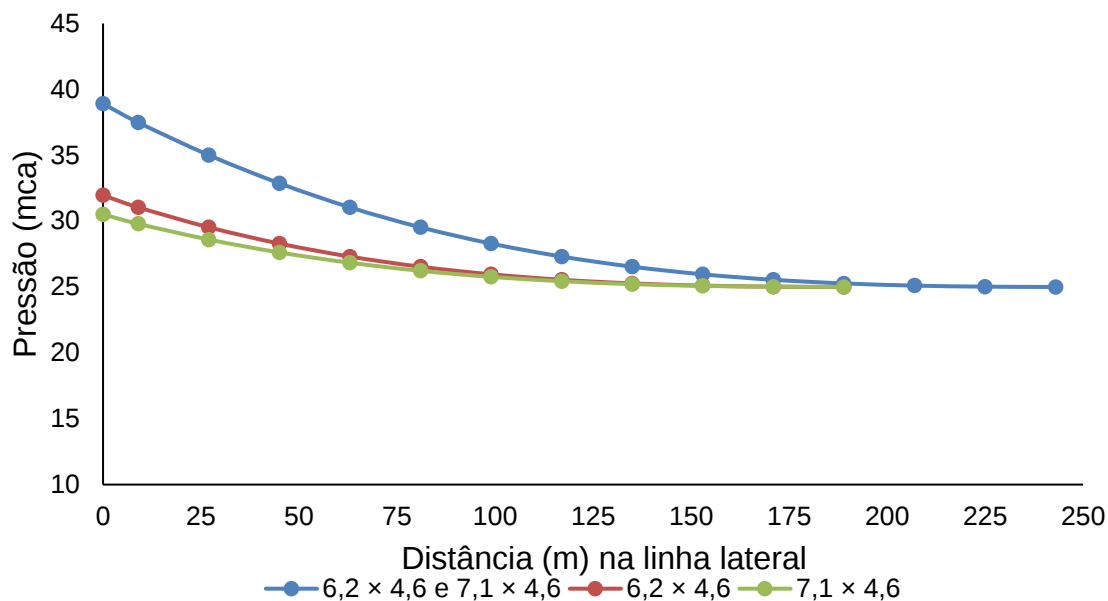
Os perfis de distribuição de vazão nos aspersores e pressão das linhas laterais avaliadas estão representados nas Figura 10 e 11, nesta ordem. A linha lateral com aspersores conjugados resultou no comprimento total de 243 m, com 14 emissores sendo que os três primeiros do modelo 2864 e onze do modelo 2877. O primeiro aspersor está a 9 m do início da lateral e todos os outros com espaçamento de 18 m.

Figura 10 - Perfis de distribuição da vazão ao longo das linhas laterais analisadas no Estudo de Caso 2



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 11- Perfis de distribuição da pressão ao longo das linhas laterais analisadas no Estudo de Caso 2



Fonte: Elaborada pela autora.

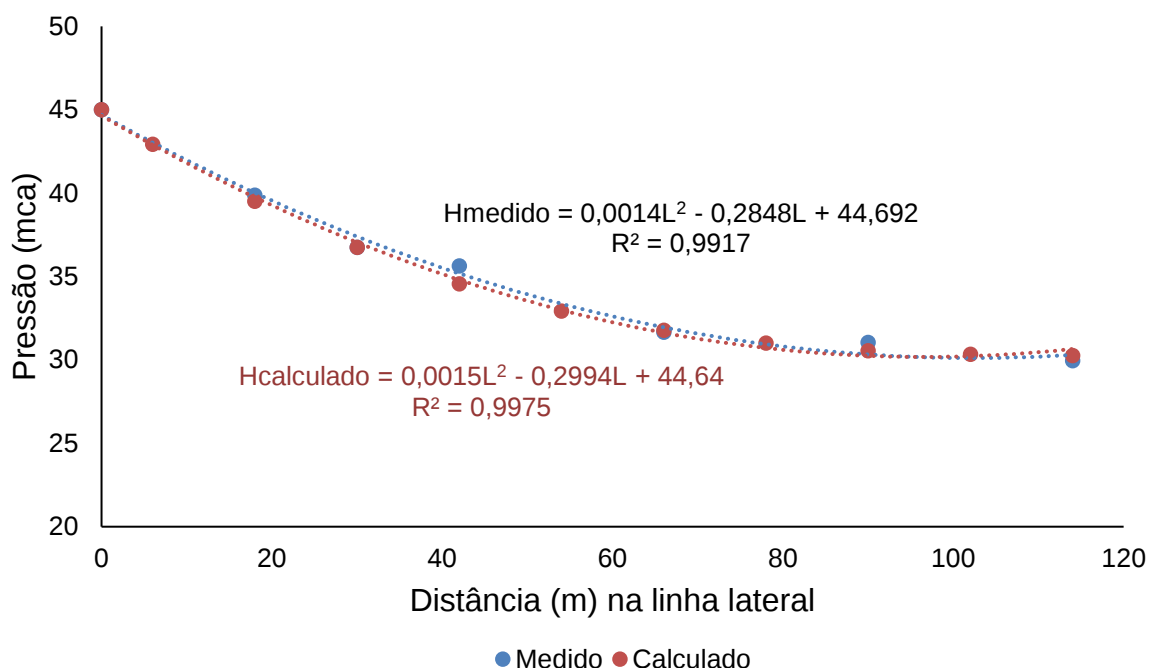
A linha lateral somente com aspersores modelo 2864 apresentou comprimento de 189 m, com 11 aspersores. Idêntica configuração foi obtida pela lateral somente com aspersores modelo 2877. Desta forma, a linha lateral com aspersores conjugados resultou em um incremento de comprimento de 29%, ou seja, equivalente a 3 aspersores a mais em relação às linhas laterais com um único modelo. Este resultado foi semelhante ao encontrado no Estudo de Caso 1 (incremento de 27%).

2.3.3 Resultados da validação em campo

A validação em campo consistiu em instalar em condições reais de campo a linha lateral com aspersores conjugados do Estudo de Caso 1, tendo 114 m de comprimento, em nível, com os três primeiros aspersores de bocais 5,5 mm x 2,5 mm e os sete aspersores restantes, com bocais 6 mm x 2,5 mm. O primeiro emissor a 6 m do início da linha lateral e os demais espaçados de 12 m. A carga de pressão e vazão na entrada da linha lateral foram, respectivamente, 45 mca e 27,56 m³h⁻¹.

As equações hidráulicas selecionadas para compor o procedimento de cálculo que define a linha lateral com aspersores conjugados (Figura 2) mostraram-se precisas, pois os perfis de pressão da lateral simulada e da instalada em campo foram muito semelhantes (Figura 12).

Figura 12 – Distribuição da carga de pressão (mca) na linha lateral em nível, medida e calculada



Fonte: Elaborada pela autora.

O ensaio de distribuição de água (Figura 5) para estimativa da uniformidade de aplicação de água na linha lateral com aspersores conjugados resultou na Tabela 2. A avaliação dos aspersores adjacentes com bocais idênticos está descrita no Teste 1. No Teste 2 avalia-se a distribuição dos aspersores adjacentes tendo bocais 6 mm × 2,5 mm. O Teste 3 situa-se na transição da troca de modelos de aspersores e avalia a distribuição de água da combinação do aspersor de bocais 5,5 mm × 2,5 mm com o aspersor de bocais 6 mm × 2,5 mm.

Tabela 2 – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) e Uniformidade de Distribuição (DU) para os Testes 1, 2 e 3

Teste	Aspersores com bocais em mm	CUC (%)	CUE (%)	DU (%)
1	5,5 × 2,5	95,3	94,1	94,5
2	6 × 2,5	96,8	96,3	96,0
3	5,5 × 2,5 com 6 × 2,5	96,1	95,3	94,6

Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados apontam que os três indicadores de desempenho, CUC, DU e CUE, apresentaram valores classificados como excelente, em todas as configurações. Tais resultados validam a utilização de linhas laterais com aspersores conjugados, em termos de uniformidade de distribuição de água.

2.4 CONCLUSÕES

O procedimento desenvolvido combina modelos de aspersores com bocais distintos, criteriosamente selecionados, na mesma linha lateral, resultando no aumento do comprimento da ordem de 30%, em comparação com linhas laterais que utilizam apenas um destes aspersores.

O estudo de caso utilizando os aspersores da marca Agropolo atingiu 61 metros de acréscimo no comprimento da linha lateral, resultando em mais três aspersores na linha e mantendo a variação de vazão menor que 10%.

A simulação teórica do procedimento foi validada em campo e mostrou-se eficaz, aumentando dois aspersores, que corresponde a 24 metros a mais no comprimento na linha lateral, e apresentou classificação excelente na avaliação da uniformidade de distribuição de água.

REFERÊNCIAS

- AGROPOLO. **Aspersores NY30**, 2023. Disponível em: <https://www.agropolo.com.br/ny-30>. Acesso em: 15 jan. 2023.
- BAIAMONTE, G. Linking the kinetic energy fraction and equivalent length method for trickle irrigation design under local losses. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 146, n. 8, p. 04020024, 2020.
- BAIAMONTE, G.; PROVENZANO, G.; IOVINO, M.; ELFAHL, M. Hydraulic design of the center-Pivot irrigation system for gradually decreasing sprinkler spacing. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 147, n. 7, p. 04021027, 2021.
- TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. Campinas: Feagri - Faculdade de Engenharia Agrícola, 2017.
- KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 17, n. 4, p. 678-684, 1974.
- KESTIN, J.; SOKOLOV, M.; WAKEHAM W. A. Viscosity of liquid water in the range - 8 °C to 150 °C. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, Washington, v. 7, n. 3, p. 941-948, 1978.
- NAANDANJAIN. **Aspersores sobrecopa**. 2022. Disponível em: <https://naandanjain.com.br/aspersores-sobrecopa/5022-sd/>. Acesso em: 04 out. 2022.
- LI, P.; REN, L. Assessing the feasibility of sprinkler irrigation schemes at the regional scale using a distributed agro-hydrological model. **Journal of hydrology**, Amsterdam, v. 610, p. 127917, 2022.
- SOLGI, S.; AHMADI, S. H.; SEPASKHAH, A. R.; EDALAT, M. Wheat yield modeling under water-saving irrigation and climatic scenarios in transition from surface to sprinkler irrigation systems. **Journal of hydrology**, Amsterdam, v. 612, Part. A, p. 128053, 2022.
- SWAMEE, P. K.; JAIN, A. K. Explicit equations for pipe flow problems. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 102, n. HY5, p. 657-664, 1976.
- 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, 1983.
- YAN, H.; HUI, X.; LI, M.; XU, Y. Development in sprinkler irrigation technology in China. **Irrigation and Drainage**, v. 69, n. S2, p. 75-87, 2020x

APÊNDICE A – Rotina desenvolvida no *software* MatLab

%DADOS DE ENTRADA

%tubulação

D=46.8;

E=0.000003334;

SL=12;

D = D / 1000;

%Bocal vermelho

d11=6;

d12=2.5;

Hserv1=30.2603343845144;

q1=2.7;

C1 =0.4929;

%Bocal laranja

d21=5.5;

d22=2.5;

C2=0.4323;

%Primeiro aspersor

$p0 = (1.26 * (10^6))/D;$

$p1 = E / (3.7 * D);$

$p2 = 8 * SL;$

$p3 = ((3.1416^2) * (D^5) * 9.81);$

$p4=p2/p3;$

n=100;

A=zeros(n);

RESULT=zeros(n);

A(1,1)=Hserv1;

A(2,1)=q1;

$A(3,1) = q1 / 3600;$

```

A(4,1) = p0 * A(3,1);
A(5,1) = 0.25 / ((log10(p1 + (5.74 / (A(4,1) ^ 0.9)))) ^ 2);
A(6,1)= p4 * (A(5,1) * (A(3,1) ^ 2));
A(8,1)= C1*(Hserv1^0.5);

%Demais aspersores
i=2;
int=0;
A(9,1)=0;
while int < 0.1
k = i - 1;
A(1, i) = A(1, k) + A(6, k);
A(2, i) = A(2, k) + C1 * (A(1, i) ^ 0.5);
A(3, i) = A(2, i) / 3600;
A(4, i) = p0 * A(3, i);
A(5, i) = 0.25 / ((log10(p1 + (5.74 / (A(4, i) ^ 0.9)))) ^ 2);
A(6, i) = p4 * (A(5, i) * (A(3, i) ^ 2));
A(8,i) = C1*(A(1,i)^0.5);
gran=max(A(8,:));peq=min(A(8,1:i));
A(9,i)=(gran-peq)/gran;
int = A(9, i);
i=i+1;
end
A(:,i-1)=0;

j=i-2;
int=0;
while int < 0.1
k = j - 1;
A(1, j) = A(1, k) + A(6, k); %pressão
A(2, j) = A(2, k) + C2 * (A(1, j) ^ 0.5); %vazão m3/h
A(3, j) = A(2, j) / 3600; %vazão m3/s
A(4, j) = p0 * A(3, j); %Reynolds
A(5, j) = 0.25 / ((log10(p1 + (5.74 / (A(4, j) ^ 0.9)))) ^ 2); %fator de atrito

```

```
A(6, j) = p4 * (A(5, j) * (A(3, j) ^ 2)); %perda de carga Darcy
```

```
A(8,j) = C2*(A(1,j)^0.5); %vazão calculada
```

```
gran=max(A(8,:));peq=min(A(8,1:j));
```

```
A(9,j)=(gran-peq)/gran; %variação de vazão
```

```
int = A(9, j);
```

```
j=j+1;
```

```
end
```

```
A(:,j-1)=0;
```

```
k=j-2;
```

```
for v=1:9
```

```
for i=1:k
```

```
    j=k-(i-1);
```

```
    RESULT(v,i+1)=A(v,j);
```

```
end
```

```
end
```

```
RESULT(6,2)=(8*(SL/2)*RESULT(5,2)*(RESULT(3,2)^2))/p3;
```

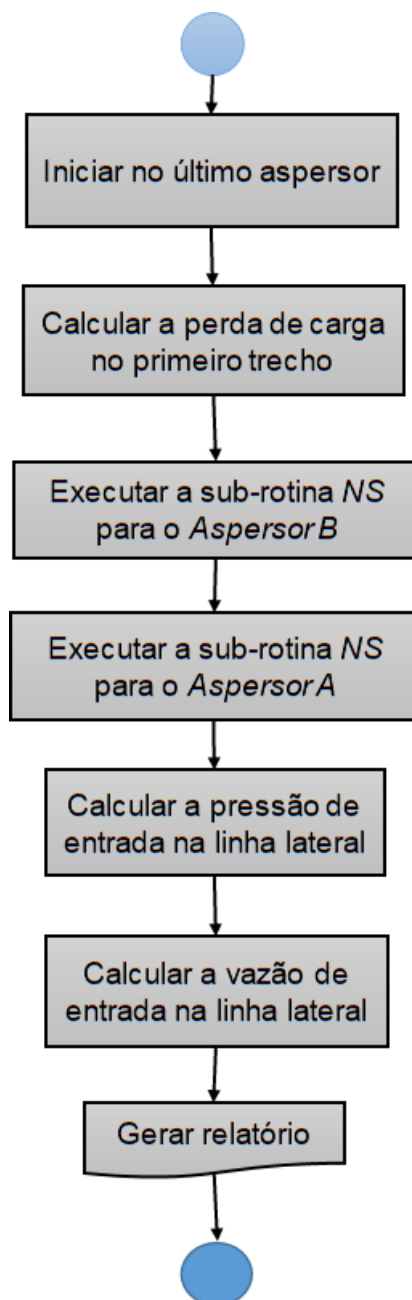
```
RESULT(1,1)=RESULT(1,2)+RESULT(6,2);
```

```
RESULT(2,1)=RESULT(2,2);
```

APÊNDICE B – Fluxograma da rotina de programação

O fluxograma apresentado a seguir representa a rotina de programação para a determinação do ponto ótimo de troca de aspersores em linhas laterais com aspersores conjugados.

Figura 13 – Rotina de programação para a determinação do ponto ótimo



Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE C – Sub-rotina NS

A sub-rotina NS irá determinar a quantidade de aspersores que serão utilizados para um único modelo considerado. O procedimento consiste em executar um *loop do while*, isto é, uma instrução de fluxo de controle que efetua um bloco de códigos que é repetido até uma condição ser satisfeita. Neste caso a condição imposta é: a variação de vazão entre aspersores não deve ser superior a 10%.

O procedimento inicia com $\Delta q = 0$ e para repetição são realizados os seguintes passos:

Passo 1 - Calcule a pressão do aspersor atual somando a pressão do aspersor anterior com perda de carga ocorrida no trecho anterior;

Passo 2 - Calcule a vazão do aspersor atual pela Equação (1), utilizando a vazão do aspersor anterior e a pressão do *Passo 1*;

Passo 3 - Calcule as Equações (4), (3) e (2);

Passo 4 - Determine:

$$\text{vazão do aspersor} = C * \sqrt{(\text{pressão atual})},$$

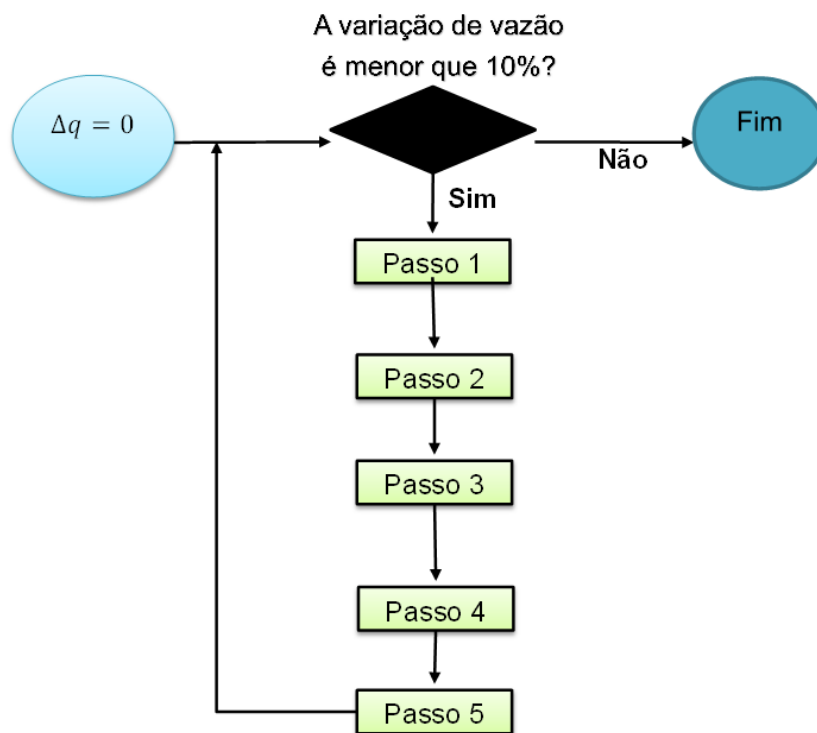
em que C é o coeficiente da equação de vazão do modelo de aspersor utilizado;

Passo 5 - Calcule a Equação (5) com o maior e menor valor de vazão do aspersor obtido até agora.

- *Passo 6* - Realize o teste: Se a variação de vazão for menor ou igual que 10%, continue.

O procedimento descrito acima é representado fluxograma da Figura 13. Observe que, ao final de cada repetição, é obtido os dados vazão e pressão para cada saída da linha lateral construída.

Figura 14 – Fluxograma da sub-rotina NS



Fonte: Elaborado pela autora.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os limites dos valores dos parâmetros hidráulicos que satisfazem a solução proposta por Keller e Bliesner (1990), capítulo 1, permitiram uma análise prévia da viabilidade de dimensionar a linha lateral de forma pareada. Este resultado será implementado na rotina de programação da planilha dinâmica PAIRED, tornando-a mais robusta.

O procedimento desenvolvido no capítulo 2 mostrou-se eficaz, aumentando o comprimento da linha lateral de aspersores conjugados na ordem de 30%. O próximo passo é desenvolver um aplicativo com interface gráfica no *Software* MatLab para o aumento da disseminação do procedimento desenvolvido.

REFERÊNCIAS

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

CARVALHO, D. F.; MARTINS, R. C. F.; SANTOS, J. J. S.; TELES, G. C.; GENTILE, M. A. D.; OLIVEIRA, M. S. Evolution and current scenario of irrigated area in Brazil: Systematic data analysis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 24, n. 8, p. 505-511, 2020.

FRIEDMAN, S. P. Irrigation methods. *In*: FRIEDMAN, S. P. **Reference Module in Earth System and Environmental Sciences**. New York: Elsevir, 2022.

FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L. **Irrigação por aspersão**. Maringá: EDUEM, 2011.

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

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2009.

SAAD, J. C. C. Subsídios para o dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional. *In*: PAOLINELLI, A.; DOURADO NETO, D.; MANTOVANI, E. C. **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: Técnica e cultura**. Piracicaba: ESALQ – USP, 2021, cap. 8, p. 133-154.

SANCHEZ, C. A.; ZERIHUN, D. Irrigation lateral hydraulics with the gradient method. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 143, n. 8, p. 04017023-2, 2017.