ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO CUSTO DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO GEOMÉTRICA

FÁTIMA CONCEIÇÃO REZENDE

Orientador: PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

Dissertação apresentada à Escola
Superior de Agricultura "Luiz de
Queiroz" da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título
de Mestre em Irrigação e Drena-
gem

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Julho - 1991

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Rezende, Fátima Conceição

R467a Análise da sensibilidade do custo da irrigação por
sulcos utilizando programação geométrica. Piracicaba,
1991.

67p. ilustr.

Diss.(Mestre) - ESALQ

Bibliografia.

1. Irrigação por sulco - Custo - Programação geométrica
2. Irrigação por sulco - Sistema - Otimização 3. Programação geométrica I. Escola Superior de Agricultura
Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631,7

ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO CUSTO DA IRRIGAÇÃO
POR SULCOS UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO GEOMÉTRICA

FÁTIMA CONCEIÇÃO REZENDE

Aprovada em: 18.09.1991

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Antonio Frizzone ESALQ/USP

Prof. Dr. Tarlei Arriel Botrel ESALQ/USP

Prof. Dr. José Renato Zanini UNESP/JABOTICABAL

PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE
Orientador

*A meus pais José Augusto e Conceição,
e a meus irmãos Tadeu, Claret, Jane,
Marília e José Augusto*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela fé e esperança concedidos em todos os momentos de minha vida.

Ao Prof. Dr. José Antonio Frizzone pela orientação, apoio e amizade recebidos na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Edmar José Scaloppi pelas valiosas orientações que nortearam minha vida profissional.

Aos professores Dr. Tarlei Arriel Botrel (USP/Piracicaba), Dr. Marcos Nereu Arenales (USP/São Carlos), e Edmundo Sérgio Spoto (U.E. Maringá) pela valiosa orientação e colaboração relacionada ao desenvolvimento matemático e computacional.

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural, pela acolhida e amizade concedidas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de estudos para realização do curso de Mestrado.

Ao Centro Nacional de Engenharia Agrícola e aos funcionários, em especial ao Eng^o Agr. Alberto Colombo, pelo apoio concedido na realização do curso de Mestrado.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o êxito deste trabalho.

S U M Á R I O

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix.
LISTA DE TABELAS	x.
RESUMO	vi.
SUMMARY	vii.
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Características do processo de irrigação por superfície	3
2.2. Problemas de Otimização	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1. Determinação dos Dados	16
3.2. Características Matemáticas	19
3.3. Técnica de Otimização	23
3.4. Função Objetivo e Restrições	25
3.5. Aplicação do Modelo	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1. Efeito da variação de n_l sobre L , T_l e G_o ...	41
4.2. Efeito da variação de n_v , n_f e n_{fs} sobre G_o .	45
4.3. Efeito da variação de Q_f sobre G_o	49
4.4. Sensibilidade do modelo à variação do custo da água	53
4.5. Sensibilidade do modelo à variação do custo da mão-de-obra	54
4.6. Sensibilidade do modelo à variação do custo de construção de estruturas hidráulicas	56

	Página
5. CONCLUSÕES	61
6. RECOMENDAÇÃO	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Balanço volumétrico em sulcos.	21
2	Esquema caracterizando alguns parâmetros de dimensionamento.	31
3	Variação de T_i em função de Q_f e n_i	44
4	Custo do projeto em função do número de sulcos irrigados por conjunto e da vazão aplicada, para $n_i = 4$	48
5	Custo do projeto em função da vazão aplicada ao sulco.	51
6	Custo do projeto em função do custo da água. ...	55
7	Custo do projeto em função do custo da mão-de-obra.	58
8	Custo do projeto em função do custo da construção de estruturas hidráulicas.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Características físicas do solo.	16
2	Teor médio de água no solo.	19
3	Dados utilizados para otimizar o sistema.	32
4	Valores obtidos para as variáveis e para a função objetivo, para $n_l = 5$	37
5	Valores obtidos para as variáveis e para a função objetivo, para $n_l = 4$	38
6	Valores obtidos para as variáveis e para a função objetivo, para $n_l = 3$	39
7	Valores obtidos para as variáveis e para a função objetivo, para $n_l = 2$	40
8	Variação de T_i em função de n_l e L	41
9	Custo do projeto em função de L e T_i para $Q_f = 0,85$ l/s e $n_v = 8$	42
10	Variação de T_i e G_o em função de Q_f	43
11	Custo do projeto em função de n_v , para $Q_f = 0,75$ l/s.	45
12	Custo do projeto em função de n_v , para $Q_f = 0,85$ l/s.	46

Tabela		Página
13	Valores para cada termo da função objetivo em relação a n_v e n_{fs}	47
14	Variação do custo do projeto em função de Q_f . ..	49
15	Valores para cada termo da função objetivo em função de n_l , T_i e Q_f , para $n_v = 8$	52
16	Valores para cada termo da função objetivo em função de n_l , T_i e Q_f , para $n_v = 7$	52
17	Custo do projeto em função da variação do custo da água, para $Q_f = 0,85$ l/s, $n_l = 2$ e $n_v = 8$. ..	53
18	Custo do projeto em função da variação do custo da mão-de-obra, para $Q_f = 0,85$ l/s, $n_l = 2$ e $n_v = 8$	56
19	Custo do projeto em função da variação do custo de construção, para $Q_f = 0,85$ l/s, $n_l = 2$ e $n_v = 8$	57
20	Dados de eficiência e perdas.	60

ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO CUSTO DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO GEOMÉTRICA

Autora: FÁTIMA CONCEIÇÃO REZENDE

Orientador: PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

RESUMO

A programação geométrica posinomial é um procedimento de dimensionamento para sistemas de irrigação por sulcos, baseado naquele recomendado pelo Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos, foram combinados para otimizar o sistema visando um custo mínimo. Os custos envolvidos no projeto estão relacionados à mão-de-obra, água e construção de estruturas de derivação de água. As variáveis de decisão utilizadas foram a vazão aplicada, tempo de aplicação, comprimento das parcelas, número de parcelas, número de conjuntos e número de parcelas por conjunto.

Os resultados obtidos revelaram que o menor custo do projeto é obtido para maior comprimento de sulcos e maior número de sulcos irrigados simultaneamente. O coeficiente de custo da função objetivo que mais afetou o valor do projeto é aquele relacionado ao custo da água, seguido do custo de construção de obras hidráulicas. O custo de mão-de-obra apresentou pequeno efeito no custo do projeto.

COST ANALYSIS SENSIBILITY OF FURROW IRRIGATION UTILIZING GEOMETRIC PROGRAMMING

Author: FÁTIMA CONCEIÇÃO REZENDE

Adviser: PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

SUMMARY

The geometric posynomial programming and a measurement procedure for furrow irrigation systems, based on that recommended by the United States Soil Conservation Service, were combined in order to optimize the system viewing minimum cost. The cost involved in this project regards hand-labor, water and construction of water delivery structures. The variables of decision used were discharge rate, time of use, length of rows, number of rows, number of sets and number of row per set.

The results showed that the least project cost is obtained with greater furrow length and larger amount of furrows simultaneously irrigated. The coefficient of cost of the objective function that mostly affected the project value is the one related to water cost, followed by the production cost of hydraulic projects. The hand-labor cost presented little effect on the project cost.

1. INTRODUÇÃO

O principal objetivo em qualquer projeto de irrigação é aplicar a lâmina requerida a um custo mínimo. Vários fatores afetam a performance do sistema e, conseqüentemente, o custo.

No caso de sistemas de irrigação por sulcos, as variáveis que afetam a performance da irrigação são: vazão aplicada, dimensões e declividade do campo, coeficiente de rugosidade hidráulica, forma do sulco e características de infiltração do solo. As variáveis operacionais a serem determinadas no projeto são o tempo de aplicação, a vazão aplicada, comprimento e espaçamento entre sulcos e a lâmina requerida. As características de infiltração do solo, coeficiente de rugosidade hidráulica e forma do sulco são parâmetros que variam de local para local.

Para otimizar um sistema de irrigação, estas variáveis devem ser consideradas, bem como um sistema de restrição que geralmente está relacionado ao tempo de aplicação, vazão aplicada e dimensões do campo. Existem várias soluções para as variáveis que satisfazem os requisitos do projeto, mas com diferentes custos. Entre as soluções

possíveis, existirá uma que resulta num custo mínimo e que, ao mesmo tempo, satisfaz todo o sistema de restrição.

Otimizar um sistema de irrigação por sulcos era, até recentemente, uma tarefa difícil, uma vez que não existiam equações matemáticas que representassem uma relação entre os parâmetros a serem otimizados e o sistema de variáveis. Em 1980, o Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos apresentou um procedimento para dimensionamento de sistemas de irrigação por sulcos que relaciona os parâmetros de projeto.

A programação geométrica, aplicada a problemas não lineares, foi desenvolvida na década de 60, sendo descreditada pelos pesquisadores de programação matemática. Entretanto, com o seu desenvolvimento, hoje é uma técnica amplamente usada na solução de problemas de engenharia. Utilizando as relações matemáticas disponíveis e a teoria da programação geométrica é possível, por exemplo, otimizar um sistema de irrigação por sulcos.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo para otimizar os parâmetros de um sistema de irrigação por sulcos, de forma a minimizar os custos operacionais do sistema, utilizando a técnica da programação geométrica posinomial, considerando as variáveis de projeto e um conjunto de restrições. Foi analisada a sensibilidade da função de custo do projeto em relação às variações dos parâmetros envolvidos no dimensionamento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Características do Processo da Irrigação por Superfície

Os sistemas de irrigação por superfície, ou sistemas por gravidade, cuja aplicação de água ocorre através da superfície do solo, prevalecem na maior proporção da área irrigada em todo o mundo. Dos 25 milhões de hectares irrigados nos Estados Unidos, dois terços dessa área são irrigados por sistemas de irrigação por superfície (BASSET *et alii*, 1983). No Brasil, o percentual da área irrigada por sistemas de superfície é de 47,5 % na região Sudeste, 61 % na região Centro-Oeste e 95 % na região Sul (AZEVEDO *et alii*, 1990). No Estado de São Paulo, 98,2 % da área potencialmente irrigável apresenta condições para irrigação através de sistemas por superfície (D.A.E.E., 1973).

Vários fatores concorrem para justificar esta acentuada predominância, entre os quais podem ser citados o menor custo operacional e de manutenção (FINKEL & NIR, 1979), a adaptação a uma grande variabilidade de solos e cultura, possibilidade de utilização de água contendo apreciáveis quantidades de sólidos em suspensão ou poluídas, não

interferem no tratamento fitossanitário da cultura e a operação é pouco afetada pelo vento (SCALOPPI, 1986). A água distribuída na área utilizando a energia gravitacional, reduz ou mesmo elimina a necessidade de energia nas instalações de recalque, contribuindo para reduzir o custo operacional.

As principais desvantagens apresentadas por estes sistemas referem-se à dependência da topografia, são inadequados para solos pouco permeáveis, à variabilidade das características de infiltração do solo e reduzidos níveis de eficiência de aplicação de água (SCALOPPI, 1986).

A operação inadequada e o desconhecimento das potencialidades dos sistemas por superfície, tem como resultado reduzidos níveis de eficiência. Os resultados obtidos por MUSIK *et alii* (1973) & SCHNEIDER *et alii* (1976) revelaram que quando são adequadamente dimensionados e operados podem apresentar um desempenho comparável a qualquer outro sistema de irrigação.

Nos sistemas de irrigação por superfície, a aplicação de água ocorre pela infiltração através da superfície condutora. A lâmina infiltrada em cada ponto depende do tempo de oportunidade para infiltração, o qual é definido pela diferença entre o tempo de avanço e tempo de recesso da lâmina naquele ponto. A infiltração da água no solo representa o principal parâmetro envolvido no dimensionamento, operação e manejo dos sistemas por superfície. Deve ser ressaltado que nem sempre a área disponível para infiltração

coincide com a área superficial. Esta situação verifica-se em sulcos onde uma determinada área de infiltração é responsável pela reposição de água em uma área superficial superior àquela definida pelo perímetro molhado dos sulcos. Verifica-se, também, que o transporte e a reorientação das partículas do solo podem afetar a condição da superfície e modificar as características de infiltração.

Segundo REDDY & CLYMA (1981a) as variáveis que afetam a performance dos sistemas de irrigação por superfície são: vazão aplicada, declividade, dimensões do campo, rugosidade hidráulica superficial, forma do sulco e características de infiltração.

O objetivo final de qualquer sistema de irrigação é aplicar a quantidade de água requerida a um custo mínimo. Inúmeros fatores afetam o custo da irrigação. No entanto, somente alguns apresentam um certo grau de controle, entre os quais a vazão aplicada, o comprimento das parcelas, o espaçamento entre sulcos, o tempo de aplicação e, em alguns locais, a declividade. Estas variáveis podem ser ajustadas às condições de solo e planta, definindo a melhor alternativa econômica para um determinado sistema de produção (SCALOPPI, 1986). O espaçamento entre sulcos, geralmente é definido em função do espaçamento entre as linhas de plantio da cultura, que por sua vez é resultado da análise de produção. Dessa forma, constitui uma variável de pouca flexibilidade no dimensionamento do sistema de irrigação.

O comprimento das parcelas pode ser definido em função de alguns critérios, sendo aquele recomendado por CRIDDLE *et alii* (1956) o mais tradicional. Os autores recomendam que o comprimento da parcela deve ser aquele que corresponde a um tempo de avanço igual a $1/4$ do tempo de aplicação requerido. Este critério apresenta o inconveniente de obter parcelas muito curtas, dificultando as operações mecanizadas, aumentando o número de estruturas hidráulicas, o que aumenta a utilização de mão-de-obra e reduz a área efetivamente cultivada. O aumento do comprimento das parcelas pode reduzir a eficiência e a uniformidade de distribuição de água. Assim, é recomendável definir um comprimento que possa compatibilizar da melhor forma possível esses objetivos.

O uso de vazões elevadas, porém não erosivas, apresenta melhores níveis de uniformidade de distribuição de água. Porém, a quantidade de água infiltrada em todo o comprimento da parcela, após o término do avanço, pode ser inferior àquela requerida e conseqüentemente os níveis de eficiência de armazenamento são reduzidos. A fim de aumentar a quantidade de água infiltrada, é necessário prolongar a aplicação por mais algum tempo, o que implicará em um aumento das perdas por deflúvio no final da parcela. A redução da vazão de entrada a um nível que assegure a manutenção do fluxo em todo o comprimento da parcela, reduz as perdas por deflúvio. Esta alternativa exige um dimensionamento rigoroso para determinar o nível de redução da vazão e aumenta a ne-

cessidade de mão-de-obra. Se adotar vazões muito reduzidas resulta em um perfil de distribuição bem desuniforme, e no final da fase de avanço, pode ocorrer que em grande parte do comprimento da parcela a perda por percolação profunda seja significativa.

À medida que o tempo de aplicação aumenta, para satisfazer a quantidade de água requerida em maiores extensões da parcela, a eficiência de aplicação será reduzida e, ao mesmo tempo a eficiência de armazenamento será proporcionalmente aumentada. Desprezando qualquer consideração econômica, o tempo de aplicação deveria ser prolongado até que a razão de acréscimo do volume de água disponível no sistema radicular da cultura exceda àquela correspondente às perdas por percolação e deflúvio superficial. Esta é uma decisão que deve ser essencialmente econômica, baseada na relação benefício/custo decorrente da reposição da quantidade de água requerida em toda extensão da parcela (SCALOPPI, 1986).

A otimização de sistemas de irrigação por superfície tem-se baseado em termos de parâmetros isolados, definidos apenas em função da qualidade da irrigação, sem considerar os efeitos da uniformidade de aplicação na produção ou na economia do projeto. A Divisão de Irrigação e Drenagem da American Society of Civil Engineers - ASCE (1978), admitiu que a economia dos projetos de irrigação geralmente estabelece que o dimensionamento não proporcione uma irrigação adequada em toda a área. Uma vez que todos os sistemas

de irrigação apresentam um certo grau de desuniformidade de aplicação e que o aumento da eficiência está geralmente associado a um aumento de custos, a alternativa apresenta um suporte lógico pelos aspectos econômicos envolvidos.

HALL (1960) apresentou um procedimento simples para otimizar um sistema de irrigação por faixas, considerando somente a maximização da eficiência de aplicação. Um procedimento que otimiza a qualidade dos parâmetros de irrigação tais como escoamento superficial, perdas por percolação e eficiência de armazenamento em sistemas de irrigação por sulcos foi apresentado por KARMELI (1978). No entanto, o mesmo não permite a aplicação de um sistema de restrição. HOLZAPFEL *et alii* (1986) desenvolveram um trabalho que otimiza o comprimento da parcela de um sistema de irrigação por sulcos, com base na proporção entre o tempo de aplicação de água e o tempo em que a frente de avanço atinge o final da parcela e na perda por percolação admissível.

PERI *et alii* (1979) considerando a economia da irrigação, introduziram um conceito de lâmina ótima a ser aplicada através da qual a altura da lâmina deveria ser determinada em função do máximo retorno líquido para uma determinada irrigação. Foram consideradas dois casos:

- no primeiro, como se observa nos sistemas que operam sob pressão, a lâmina requerida e a distribuição de água em função do tempo de aplicação são conhecidos e assim a lâmina ótima ou o tempo de aplicação é determinado.

- no segundo caso, como geralmente acontece nos sistemas por superfície, a distribuição final da água aplicada e a lâmina média de aplicação são conhecidos, devendo ser determinado o intervalo entre irrigações ou a lâmina requerida.

O sistema de irrigação pode ser otimizado (máximo lucro) considerando a vazão e o tempo de irrigação como as variáveis de decisão do projeto. A lâmina média aplicada e a uniformidade de aplicação como uma função da vazão e tempo de aplicação podem ser relacionadas à produtividade através de uma função de produção. Valores elevados de vazão e tempo de aplicação fornecem altos índices de uniformidade, resultando em alta produtividade, mas o custo da água aplicada pode ser elevado. Inversamente, quando a vazão e o tempo de aplicação são pequenos, os custos são baixos, porém a produtividade é também reduzida. Portanto, vazão e tempo de aplicação podem ser otimizados com base numa combinação entre produtividade e custo da água.

A otimização de sistemas de irrigação por sulcos era limitado a solos homogêneos, até recentemente, por duas razões: primeiro, porque a variabilidade espacial da infiltração em sulcos não era quantificada e segundo porque não existia um modelo que computasse as variações espaciais da função de infiltração (WALLENDER & RAYEJ, 1987). RAYEJ & WALLENDER (1987) desenvolveram um modelo hidráulico do balanço volumétrico completo o qual pode adaptar as variáveis da função de infiltração ajustada aos dados de campo a in-

tervalos específicos ao longo dos sulcos. Este modelo pode ser usado em combinação com um algoritmo que otimiza o projeto da irrigação por sulcos para solos homogêneos e heterogêneos.

A heterogeneidade das propriedades do solo influencia a performance da irrigação. WALLENDER (1986) observou que as propriedades de infiltração do solo podem afetar a uniformidade mais do que a variabilidade do tempo de oportunidade para infiltração.

O comprimento da parcela foi otimizado por WU & LIANG (1970) usando o critério de custo mínimo. Este critério foi utilizado por REDDY & CLYMA (1981a) para determinar a vazão ótima, tempo de irrigação, comprimento da parcela e número de irrigação por estação. Posteriormente os autores (REDDY & CLYMA, 1982) usaram a relação entre a produtividade e a performance do sistema para maximizar o lucro antes de minimizar os custos.

Para maximizar os lucros, quando se adota um sistema de irrigação, é necessário definir uma relação entre as variáveis de projeto do sistema e a produtividade da cultura. REDDY & CLYMA (1981b) relacionaram a eficiência de armazenamento de água e as variáveis do projeto usando um modelo hidráulico. A seguir, relacionaram a produtividade com a eficiência de armazenamento usando um modelo de função de produção e o modelo hidráulico. Estas duas relações foram combinadas com uma técnica de otimização para maximizar os

lucros de um sistema de irrigação por faixas de infiltração cultivadas com trigo.

Os fatores que dificultaram a otimização dos sistemas de irrigação por sulcos foram: primeiro, a inexistência de uma equação matemática que expressasse a relação entre as variáveis a serem otimizadas e as variáveis do sistema. O Soil Conservation Service (USDA, 1979) do Estados Unidos, desenvolveu um procedimento empírico para dimensionamento de sistemas de irrigação por sulcos baseado em dados de famílias de curva de infiltração. O segundo fator foi que a teoria da otimização matemática aplicada a problemas não lineares era limitada.

2.2. Problemas de Otimização

Os problemas que procuram maximizar ou minimizar uma função de uma ou mais variáveis, em que as variáveis estão sujeitas a determinadas restrições, são chamados de problemas de otimização ou problemas de programação.

Os problemas de otimização normalmente se encarregam de alocar recursos escassos na produção, de forma que os produtos obedeçam a certas especificações técnicas, observem certas restrições e, finalmente, maximiza ou minimiza uma função objetivo como lucro ou custo.

Conforme FRITZSCHE (1978), em geral, os problemas de programação tem a seguinte formulação: determinar os valores de n variáveis $x_1, \dots, x_n$ que satisfazem as m equações

$$g_i(x_1, \dots, x_n) \begin{cases} \geq \\ = \\ \leq \end{cases} b_i \quad e \quad i = 1, \dots, m \quad [2.1]$$

e que maximizam ou minimizam a função

$$g_o = f(x_1, \dots, x_n) \quad [2.2]$$

A relação [2.1] é chamada de restrição e [2.2] de função objetivo; $g_i(x_1, \dots, x_n)$ são funções e b_i são constantes. Um ponto x que satisfaz [2.1] e [2.2] é chamado de ponto ótimo. As relações $\geq$, $=$, $\leq$ valem para uma determinada restrição i , porém podem variar de restrição para restrição. Os valores de m e n são independentes, ou seja, m pode ser menor, igual ou maior que n . Quando m é igual a zero, tem-se o caso de programação irrestrita.

Os problemas de programação linear são bem mais simples do que os de programação não-linear. De acordo com CHIANG (1982), a programação não-linear difere da programação linear em pelo menos cinco aspectos, sendo alguns dos quais relacionados entre si, ou seja:

- o campo de escolha abrange toda a região possível, não somente o conjunto de seus pontos extremos.
- o número de restrições que são exatamente satisfeitas (e as condições de não-negatividade) pode ser igual ao número de variáveis de escolhas.
- um deslocamento contínuo em uma direção uniforme pode não conduzir a valores continuamente crescentes (ou decrescentes) da função-objetivo.
- a região possível pode não ser um conjunto convexo.
- um ótimo local pode não ser um ótimo global.

Em função dessas diferenças, os métodos de solução apropriados à programação linear tornam-se inaplicáveis ao contexto não-linear.

A programação geométrica foi desenvolvida na década de 60 e tornou-se uma importante ferramenta para solucionar problemas de programação não-linear, os quais ocorrem com muita frequência em engenharia, onde o custo deve ser minimizado e as relações entre variáveis são frequentes na forma de potência. O desenvolvimento matemático da programação geométrica consiste na utilização da desigualdade entre a média aritmética-geométrica (CONVERSE, 1977).

$$\sum \delta_i u_i \geq \prod u_i^{\delta_i}$$

média aritmética $\geq$ média geométrica

e δ_i e u_i não negativos e $\sum \delta_i = 1$.

Para minimizar uma função não-linear em que todos os termos são produtos com coeficientes positivos, deve-se maximizar a correspondente média geométrica dessa função (MCMILLAN, 1970).

A técnica da programação geométrica assegura uma solução fácil para problemas irrestritos, sempre que o grau de dificuldade for igual a zero. O grau de dificuldade (GD) é definido como:

$$GD = n^{\circ} \text{ de termos} - (n^{\circ} \text{ de variáveis} + 1).$$

Segundo SPOTO (1988), na programação geométrica a função objetivo e as restrições são definidas por funções do tipo:

$$g(x) = \sum_{i=1}^I C_i \prod_{m=1}^M x_m^{\varepsilon_{im}}$$

onde I é o número de termos e M o número de variáveis da função $g(x)$. Os coeficientes C_i e os expoentes ε_{im} são números reais e as variáveis $x_1, x_2, \dots, x_m$ são positivas.

A função $g(x)$ é posinomial quando todos os C_i forem positivos, em caso contrário a função é signomial ou geométrica generalizada.

O termo $\mu_i(x)$ é denominado de monômio:

$$\mu_i(x) = C_i \prod_{m=1}^M x_m^{\varepsilon_{im}}$$

O trabalho desenvolvido por DUFFIN *et alii* (1967), agora um clássico em programação geométrica, é restrito a problemas com coeficientes positivos e, embora abranja um grande número de problemas na engenharia, a mesma foi generalizada para problemas com coeficientes negativos por PASSY & WILDE (1966)¹.

SPOTO (1988), trabalhou com a programação geométrica e seu estudo foi desenvolvido separando os casos de Programação Geométrica Posinomial - PGP, quando todos os coeficientes da função são positivos e Programação Geométrica Generalizada ou Signomial - PGG, quando a função apresenta coeficientes negativos.

¹PASSY, U. & WILDE, D.J. Generalized Polynomial Optimization Stanford Chemical Engineering Report, August. 1966.

A programação geométrica aplica-se à otimização de projetos de irrigação, uma vez que os mesmos não apresentam uma linearidade. KARMELI & ORON (1979) utilizaram a PGG para minimizar os custos de sistemas de irrigação pressurizados (aspersão e gotejamento). REDDY & CLYMA (1981a) utilizaram esta mesma técnica para minimizar os custos de um sistema de irrigação por sulcos. Posteriormente a mesma técnica foi adotada para maximizar os lucros em sistemas de irrigação por faixas em nível e com gradiente (REDDY & CLYMA, 1981b).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Determinação dos Dados

Os dados utilizados neste trabalho, para um estudo de caso, foram obtidos no Campo Experimental de Irrigação por superfície, existente na Fazenda Ipanema, município de Iperó - SP, base física do Centro Nacional de Engenharia Agrícola - CENEA/MA.

A Tabela 1 apresenta as características físicas do solo.

Tabela 1. Características físicas do solo.

Prof. (cm)	CC %	PMP %	P (g/cm ³)	An. Granulométrica 0-40 cm
0-10	23,6	17,6	1,2	
10-20	22,3	18,9	1,4	argila: 54,8 %
20-30	23,0	19,8	1,4	silte : 13,3 %
30-40	24,2	20,5	1,3	areia : 31,9 %

CC - capacidade de campo (base peso)

PMP - ponto de murcha (base peso)

P - peso específico aparente

Para a determinação da curva de infiltração foram selecionados três sulcos paralelos e adjacentes, sendo que os dois extremos tiveram efeito de bordadura. Os sulcos foram abertos utilizando sulcadores tracionados mecanicamente, assegurando uma satisfatória uniformidade de forma e dimensão em toda sua extensão. O comprimento adotado foi de 180,0 m e o espaçamento entre sulcos foi de 0,80 m. A declividade média no sentido do escoamento foi de 0,86 %. A vazão derivada aos sulcos, mantida constante durante todo o período de aplicação de água, foi de 0,85 l/s.

Foram definidas estações de medição, a partir do ponto de derivação de água, a cada 10,0 m, até o final dos sulcos, a fim de determinar alguns elementos da seção de escoamento, a cada incremento de avanço da frente de molhamento.

Através de um perfilômetro, efetuou-se a determinação dos elementos geométricos da seção transversal do sulco em cada estação. Conforme REZENDE & SCALOPPI (1985), com estes dados estabeleceu-se uma relação entre altura da lâmina medida no centro geométrico da seção transversal e a largura da superfície do fluxo correspondente. Através de regressão obteve-se uma equação da forma:

$$B = C y^m \quad [3.1]$$

sendo B a largura da superfície do fluxo, y a altura da lâmina líquida, C e m coeficiente e expoente empíricos, respectivamente.

A área da seção transversal de escoamento, A_y , foi obtida por integração da equação [3.1], resultanto em:

$$A_y = \frac{C}{m+1} y^{m+1} \quad [3.2]$$

Os dados de avanço da frente de molhamento, para cada vazão analisada, foram definidos pelo modelo simplificado (SCALOPPI, 1983) sendo o valor de r_z (fator de forma) calculado para cada intervalo de tempo. Posteriormente, os dados de tempo e distância de avanço foram ajustados por uma expressão da forma:

$$s = f t_s^h \quad [3.3]$$

sendo s a distância de avanço correspondente ao tempo t ; f e h as constantes empíricas. Os parâmetros f e h apresentaram, para cada vazão adotada, diferentes valores.

A equação de infiltração foi obtida usando um procedimento de balanço volumétrico cujo desenvolvimento teórico tem por base o princípio da conservação de massa aplicado à irrigação por sulcos durante a fase de avanço. Para sua determinação utilizou-se a metodologia descrita por GILLEY (1968) e SCALOPPI (1986).

O perímetro molhado foi obtido por integração numérica a partir da equação que caracteriza a seção transversal do sulco, cujo desenvolvimento foi apresentado por SCALOPPI (1983).

Foi determinado o teor médio de água no solo através de amostras gravimétricas, antes do teste e 24 horas após o mesmo. Os dados obtidos estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Teor médio de água no solo.

Profundidade (cm)	Antes do teste %	Após o teste %
0-20	24,6	27,5
20-40	26,1	27,6
40-60	28,0	29,2

3.2. Características Matemáticas

Antes de otimizar qualquer problema, as relações matemáticas entre o sistema de variáveis do projeto, a função a ser otimizada e as restrições devem estar disponíveis e satisfazer os requisitos.

As relações adotadas neste trabalho foram definidas com base no procedimento recomendado pelo Soil Conservation Service (USDA, 1979) dos Estados Unidos, sem, no entanto, adotar os coeficientes e expoentes empíricos definidos pelas famílias de curva de infiltração, uma vez que as mesmas não se adaptam às condições brasileiras conforme foi observado por SOUZA & AUGUSTO (1984) e REZENDE *et alii* (1987)¹. Estes valores foram definidos através de teste realizado em campo.

Na Figura 1 são definidos os parâmetros para um balanço volumétrico em sulcos de irrigação e as equações são definidas a seguir.

¹REZENDE, F.C.; SCALOPPI, E.J. & COLOMBO, A. Avaliação de critérios para dimensionamento de sistemas de irrigação por sulcos. Apresentados no XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Jundiaí, 1987. (não publicado).

FIG. 01

Figura 1. Balanço volumétrico em sulcos.

- AB - comprimento do sulco
- ACDGA - volume total aplicado
- ABEHA - volume total requerido
- ABDFHA - volume total armazenado
- BCDB - volume total de runoff
- FGHF - volume total de perdas por percolação
- DEFD - volume total de déficit
- D - lâmina média aplicada
- D^A - lâmina média infiltrada
- D_i - lâmina média requerida
- D_u - lâmina média de runoff ($D_A - D_i$)
- D^R - lâmina média percolada ($D_i - D_{AU}$)
- D^P - lâmina média armazenada na zona radicular
- D^{AU}

A lâmina média aplicada é dada por:

$$D_A = 60 Q_i T_i / E L \quad [13.4]$$

sendo D_A a lâmina média bruta aplicada em mm, Q_i a vazão aplicada em l/s, T_i o tempo de aplicação em min, L e E o comprimento e o espaçamento entre sulcos, respectivamente.

A lâmina média infiltrada é dada por:

$$D_{i_{o-x}} = \left[a (\tau_{o-x})^b \right] (W/E) ? \quad [13.5a]$$

$$\text{ou } D_{i_{o-L}} = \left[a (\tau_{o-L})^b \right] W/E \quad [13.5b]$$

sendo D_i a lâmina média infiltrada em mm, a e b as constantes da equação de infiltração, τ_{o-x} o tempo de oportunidade para infiltração a uma distância x qualquer ao longo do sulco (em min), τ_{o-L} o tempo de oportunidade para infiltração em todo o comprimento do sulco e W é o perímetro molhado.

Segue-se que:

$$\tau_{o-x} \text{ ou } \tau_{o-L} = (T_i - T_a) \quad [13.6]$$

onde T_i é o tempo total de aplicação (min) e T_a é o tempo de avanço (min), expresso por

$$T_a = \left[\frac{S}{f} \right]^{1/h} \quad [13.7]$$

Substituindo a equação [13.6] e [13.7] em [13.5a]

e [13.5b] tem-se:

$$D_{i_{o-x}} = \left\{ a \left[T_i - \left[\frac{S_x}{f} \right]^{1/h} \right]^b \right\} W/E \quad [13.8a]$$

$$D_{i_{o-L}} = \left\{ a \left[T_i - \left[\frac{S_L}{f} \right]^{1/h} \right]^b \right\} W/E \quad [13.8b]$$

onde s_x é a distância entre o início da parcela e um ponto qualquer ao longo do sulco e s_L é a distância entre o início e o fim da parcela.

A lâmina de runoff é dada por:

$$D_R = D_A - D_i \quad [3.9a]$$

$$D_R = \frac{60 Q_i T_i}{E L} - \left[a \left[T_i - \left(\frac{S_L}{f} \right)^{1/h} \right] \right]^b W/E \quad [3.9b]$$

A lâmina média percolada em um ponto qualquer do sulco é dada por:

$$D_{p_{o-x}} = D_{i_{o-x}} - D_u \quad [3.10]$$

D_u é a lâmina líquida requerida e pode ser determinada por:

$$D_u = \left[a \left[T_i - T_{o-x} \right]^b \right] W/E \quad [3.11]$$

sendo $\left[T_i - T_{o-x} \right]$ o tempo de oportunidade necessário para aplicar a lâmina líquida requerida em um ponto qualquer x , ao longo do sulco. Para este trabalho, os valores ajustados de a e b são 8,0 e 0,598, respectivamente.

A lâmina média armazenada no sistema radicular da cultura é obtida por:

$$D_{AU} = D_A - D_R - D_p \text{ e } D_{AU} < D_u \quad [3.12]$$

De acordo com HART *et alii* (1983), o tempo de recesso pode ser ignorado quando a declividade do sulco é superior a 0,05 % e o valor do coeficiente de rugosidade hidráulica superficial, n , de manning, geralmente é considerado igual a 0,04.

3.3. Técnica de Otimização

A formulação do problema é um componente importante para qualquer sistema de otimização. Como em todas as técnicas quantitativas, uma determinada formulação de otimização deve ser apenas considerada como uma aproximação à realidade. O problema é definido em termos de uma função objetivo, que pode ser para minimizar os custos ou maximizar os lucros, e de um sistema de restrições.

Neste trabalho foi utilizada a Programação Geométrica Posinomial para minimizar os custos do projeto de irrigação, uma vez que todos os coeficientes da função objetivo e das restrições são positivos.

A função objetivo formulada tem a seguinte forma:

$$G_0(x)_{\min} = P_0(x) \quad [3.13]$$

onde $G_0(x)$ é a função objetivo, $P_0(x)$ são os termos da função objetivo.

O problema apresenta também k restrições com a seguinte forma

$$G_k(x) = P_k(x) \leq 1 \text{ e } k = 1, 2, \dots, K \quad [3.14]$$

sendo $G_k(x)$ a função de restrição do sistema de variáveis e constantes, $P_k(x)$ é denominada de posinômio e são termos da função objetivo e de restrições com coeficientes positivos.

Cada termo $P_k(x)$ da função objetivo e de restrição apresenta a seguinte forma:

$$P_k(x) = \sum_{i=1}^I U_{ik}(x) \quad k = 1, 2, 3, \dots, K \quad [3.15]$$

sendo k o número de restrições do problema, I o número de termos com coeficientes positivos.

A definição de U_{ik} é dado por:

$$U_{ik} = C_{ik} \prod_{m=1}^M x_m^{\varepsilon_{ikm}} \quad \begin{matrix} k = 0, 1, 2, \dots, K \\ i = 1, 2, 3, \dots, I \end{matrix} \quad [3.16]$$

sendo U_{ik} os termos com coeficientes positivos na função objetivo e nas restrições, C_{ik} as constantes de cada termo da função objetivo e das restrições, x_m as variáveis do sistema, ε_{ikm} os expoentes dos sistemas de variáveis e M o número de variáveis do sistema.

A solução do problema consiste em condensar cada restrição $g_k(x)$ ($k = 0, 1, \dots, K$) em um ponto $\hat{x} > 0$, conforme descrito por SPOTO (1988). O processo de condensação dos posinômios aumenta a região de factibilidade em relação à região de factibilidade do PGP, ou seja, a região factível do problema não condensado está contida na região factível do problema condensado. A seguir as funções são linearizadas aplicando a função logaritmo natural. O conjunto de equações obtidas é, então, resolvido por programação linear, devendo ser acrescentada uma restrição que interromperá o processamento quando houver a convergência da forma linear para o problema original (não-linear).

Sendo a propriedade dos programas posinomiais equivalentes a programas convexos, a solução ótima será

global. A solução ótima global será garantida se os valores utilizados para iniciar o algoritmo forem exequíveis.

Neste trabalho o programa utilizado para processar os dados foi desenvolvido por SPOTO (1988) em linguagem FORTRAN 77 e foram executadas em micro computador PC/XT.

3.4. Função Objetivo e Restrições

Para minimizar os custos do sistema e simultaneamente obter um nível adequado de irrigação, a função objetivo deve ser definida para um projeto ótimo.

Neste trabalho, a função objetivo consistiu em minimizar o custo do sistema. Os custos observados em um sistema de irrigação por superfície podem ser resumidos da seguinte forma:

- custo da água.
- custo da mão-de-obra.
- custo das estruturas de aplicação de água.
- custo dos efeitos ambientais causados pelas perdas por percolação e runoff sobre a qualidade da água.

O custo da água é determinado pela tarifa cobrada na região e o volume consumido durante todo o ciclo da irrigação. O custo da mão-de-obra deve ser calculado observando o tempo que a mesma é utilizada durante o ciclo. O custo das estruturas destinadas à aplicação de água deve ser amortizado anualmente.

Quanto aos efeitos ambientais, o custo está relacionado às perdas por percolação e runoff, uma vez que as mesmas provocam a lixiviação de nutrientes e conseqüentemente a poluição das fontes de água. Para quantificar esses custos é necessário a disponibilidade de dados apropriados que definem o grau de degradação da qualidade da água. A lixiviação de nutrientes aliadas à irrigação deficitária reduz a produtividade, no entanto esses parâmetros são considerados quando é computado o lucro.

Se no projeto do sistema de irrigação for incluído alguma obra de reutilização da água decorrente do runoff, este custo pode ser incluído naquele decorrente do uso da água.

A função de custo que irá proporcionar um projeto ótimo foi definida por REDDY & CLYMA (1981a) como:

$$G_o = n_i n_l n_v (C_1 \alpha_1 Q_f T_i n_{fs} + C_2 \alpha_2 \alpha T_i) + C_3 n_l w_f \quad (3.17)$$

onde:

G_o = função de custo para o projeto, Cr\$/campo.

C_1 = coeficiente de custo da água, Cr\$/l.

C_2 = custo da mão-de-obra, Cr\$/hora.

C_3 = custo fixo anual das construções, Cr\$/m.

α_1 = fator de conversão de unidades (60,0).

α_2 = fator de conversão de unidades (1/60,0).

α = fração do tempo em que a mão-de-obra é utilizada durante a irrigação.

n_l = número de parcelas no campo, na direção do comprimento.

w_f = largura do campo, m.

n_i = número de irrigação por ciclo.

n_{fs} = número de sulcos irrigados por conjunto.

n_v = número de conjuntos na direção da largura do campo.

Q_f = vazão aplicada em l/s.

T_i = tempo de aplicação, em min.

As restrições são fatores limitantes no sistema de variáveis do projeto e os valores adotados devem ser praticáveis. As restrições geralmente são baseados em:

- 1) comprimento do sulco com base nos limites físicos ou legais da propriedade,
- 2) vazão máxima não erosiva obtida com base na erosividade do solo e vazão mínima que permite o avanço da água até o final da parcela.
- 3) espaçamento entre sulcos baseado na cultura, máquinas ou preferência do agricultor.

As restrições para o modelo desenvolvido neste trabalho foram definidos como segue.

$$Q_f \geq Q_{f_{\min}} : G_1 = Q_{f_{\min}} / Q_f \leq 1 \quad [3.18]$$

$$Q_f \leq Q_{f_{\max}} : G_2 = Q_f / Q_{f_{\max}} \leq 1 \quad [3.19]$$

onde Q_f é a vazão média aplicada no sulco em l/s e $Q_{f_{\max}}$ pode, de acordo com REDDY & CLYMA (1981a), ser obtido pela relação:

$$Q_{f_{\max}} = 0,63/s_1 \quad [3.20]$$

sendo $Q_{f_{\max}}$ em l/s e s_1 é a declividade do sulco em percentagem.

No projeto de irrigação a lâmina líquida requerida é calculada de várias formas, porém a mais usada consiste em determinar a capacidade de armazenamento de água pelo solo até a profundidade desejada. Quando um percentual desse valor for consumido por evapotranspiração, procede-se à irrigação a fim de completar o armazenamento. Neste trabalho, a lâmina líquida foi fixada arbitrariamente em 32 mm.

Uma vez que foram estabelecida a vazão e a lâmina líquida requerida, o problema do dimensionamento consiste em determinar o tempo necessário para aplicar a lâmina requerida e o comprimento das parcelas. Inicialmente, nenhum critério racional de dimensionamento deve permitir um tempo de aplicação inferior àquele necessário para infiltrar a quantidade de água requerida no início da parcela. Portanto, o tempo de corte no fornecimento de água deve ser considerado em função de diferentes períodos de duração da fase de reposição.

O Soil Conservation Service (USDA, 1979) dos Estados Unidos, recomenda que o comprimento do sulco seja aquele em que a lâmina requerida foi aplicada, sendo o mesmo chamado de comprimento de projeto (KL). Uma estratégia apropriada consiste em determinar o comprimento ótimo e para tal deve-se assumir um valor de K que representa um percentual do comprimento. Dessa forma, a lâmina aplicada em KL deve ser maior ou igual à lâmina ótima requerida. Para este caso, pode-se formular a seguinte restrição:

$$D_u \geq D_{o_p} : G_g = D_{o_p} / D_u \leq 1 \quad [3.21]$$

em que, D_{o_p} = lâmina ótima requerida (mm) e D_u = lâmina líquida requerida (mm) e $0 > K < 1$.

$$G_3 = \frac{D_{o_p}}{\left\{ a \left[T_i - \left(K \frac{s_L}{f} \right)^{1/h} \right]^b \right\} \frac{W}{E}} \leq 1 \quad [3.22]$$

$$\text{ou, } G_3 = \frac{D_{o_p} E}{\left\{ a \left[T_i - \left(0,9 \frac{s_L}{f} \right)^{1/h} \right]^b \right\} W} \leq 1 \quad [3.23]$$

As restrições relacionadas ao comprimento do sulco são definidas em função das considerações mencionadas anteriormente e são dadas por:

$$n_1 L = L_F : G_4 = L_F / n_1 L \leq 1 \quad [3.24]$$

$$L \leq L_{\max} : G_5 = L / L_{\max} \leq 1 \quad [3.25]$$

$$L \geq L_{\min} : G_6 = L_{\min} / L \leq 1 \quad [3.26]$$

onde:

n_1 - número de parcelas, na direção do comprimento do campo.

L - comprimento do sulco, m.

L_F - comprimento do campo, m.

$L_{\max}$ - comprimento máximo da parcela, m.

$L_{\min}$ - comprimento mínimo da parcela, m.

Ainda podem ser formuladas restrições com relação ao tempo de aplicação de água, número de sulcos por conjunto, número de conjuntos com um dado número de sulcos e espaçamento entre sulcos em função da largura do campo. Essas restrições são:

$$n_{fs} Q_f = Q : G_7 = n_{fs} Q_f / Q \leq 1 \quad [3.27]$$

$$n_l n_v T_i \leq T_{max} : G_8 = n_l n_v T_i / T_{max} \leq 1 \quad [3.28]$$

$$n_v n_{fs} = n_f : G_9 = n_f / (n_v n_{fs}) \leq 1 \quad [3.29]$$

$$n_{fs} E \leq W_f : G_{10} = n_{fs} E / W_f \leq 1 \quad [3.30]$$

sendo:

- n_{fs} - número de sulcos por conjunto.
- Q - vazão total disponível, l/s.
- Q_f - vazão derivada ao sulco, l/s.
- n_l - número de parcelas na direção do comprimento do campo.
- n_v - número de conjuntos em direção à largura do campo.
- T_i - tempo de aplicação de água, min.
- T_{max} - tempo máximo disponível para irrigar o campo, min.
- n_f - número de sulcos na direção da largura.
- W_f - largura do campo, m.
- E - espaçamento entre sulcos, m.

3.5. Aplicação do Modelo

Para a análise dos parâmetros de dimensionamento utilizou como modelo um campo cujas dimensões estão apresentadas na Figura 2, na qual estão caracterizadas algumas das variáveis a serem otimizadas. Na tabela 3 apresentam-se os valores dos parâmetros utilizados para otimizar o sistema incluindo as restrições e os coeficientes de custo. As variáveis de campo foram obtidas por REZENDE *et alii* (1987).

E = ESPACAMENTO ENTRE SULCOS

WF = LARGURA TOTAL DO CAMPO

LF = COMPRIMENTO TOTAL DO CAMPO

L = COMPRIMENTO DA PARCELA

$N1$ = NUMERO DE CONJUNTOS NO COMPRIMENTO

Nw = NUMERO DE CONJUNTOS NA LARGURA

Nfs = NUMERO DE SULCOS POR CONJUNTO

Figura 2. Esquema caracterizando alguns parâmetros de dimensionamento.

Tabela 3. Dados utilizados para otimizar o sistema.

1. VARIÁVEIS DE CAMPO			
Declividade = 0,86 %			
Eq. de infiltração: $z = 8,0 t^{0,598}$, z (mm); t (min) e $r=0,997$			
Eq. de avanço	para	Q_f (l/s)	
$s = 15,473 t^{0,492}$	para	0,45	s (m) e t (min)
$s = 17,896 t^{0,502}$	para	0,55	
$s = 19,684 t^{0,518}$	para	0,65	
$s = 20,846 t^{0,541}$	para	0,75	
$s = 21,787 t^{0,563}$	para	0,85	
Eq. da seção transversal: $B = 8,8 y^{0,54}$ B e y (cm), $r=0,998$			
Lâmina requerida = 32,0 mm			
Lâmina ótima = 32,0 mm			
Perímetro molhado (WD) = 0,20 m			
Espaçamento entre sulcos = 0,80 m			
Comprimento do campo = 680,0 m			
Largura do campo = 340,0 m			
Vazão disponível = 50 l/s			
Número de irrigações realizadas (n_i) = 6			
2. RESTRIÇÕES			
Comprimento máximo = 340 m			
Comprimento mínimo = 80 m			
Vazão máxima aplicada = 1,0 l/s			
Vazão mínima aplicada = 0,4 l/s			
Tempo máximo para irrigar o campo = 7300 min			
Tempo mínimo para irrigar o campo = 40 min			
3. COEFICIENTES DE CUSTO			
Custo da água: $C_1 = \text{Cr\$ } 200,00/\text{m}^3 = \text{Cr\$ } 0,20/\text{l}$			
Custo da mão-de-obra: $C_2 = \text{Cr\$ } 84,0/\text{h}$			
Custo da construção: $C_3 = \text{Cr\$ } 975,0/\text{m}$			
$\alpha = 1$			

Aplicando-se os dados à função de custo (ou função objetivo) tem-se:

$$\min G_o = n_l n_v (C_1 \alpha_1 n_i Q_f T_i n_{fs} + C_2 \alpha_2 \alpha n_i T_i) + C_3 n_l W_F$$

$$W_F = n_{fs} n_v E$$

$$\min G_o = n_l n_v (C_1 \alpha_1 n_i Q_f T_i n_{fs} + C_2 \alpha_2 \alpha n_i T_i)$$

$$+ C_3 n_l n_{fs} n_v E$$

$$\min G_o = 0,2 \times 60 \times 6 Q_f T_i n_{fs} n_l n_v + 84 \times \frac{1}{60} \times 1 \times 6 T_i n_l n_v$$

$$+ 975 \times 0,80 n_l n_{fs} n_v$$

$$\min G_o = 72 Q_f T_i n_{fs} n_l n_v + 8,4 T_i n_l n_v$$

$$+ 780 n_l n_{fs} n_v .$$

No procedimento de linearização, a função de custo é adicionada ao problema como uma restrição. Esta restrição é formulada adicionando uma nova variável (x_o), ou seja:

$$\min x_o$$

$$\text{sendo } G_o = 72 Q_f T_i n_{fs} n_l n_v + 8,4 T_i n_l n_v +$$

$$780 n_l n_{fs} n_v \leq x_o$$

$$G_o = 72 x_o^{-1} Q_f T_i n_{fs} n_l n_v + 8,4 x_o^{-1} T_i n_l n_v +$$

$$+ 780 x_o^{-1} n_l n_{fs} n_v \leq 1.$$

As demais restrições do sistema são, então, definidas como:

$$G_1 = Q_f / Q_{f_{\min}} \leq 1 : G_1 = 0,40 / Q_f \leq 1$$

$$G_2 = Q_f / Q_{f_{\max}} \leq 1 : G_2 = Q_f / 1,0 \leq 1$$

A restrição G_3 para a vazão de 0,45 l/s é:

$$G_3 = \frac{(32) (0,80)}{\left\{ 8,0 \left[T_i - \left(\frac{0,9 L}{15,473} \right)^{2,033} \right]^{0,598} \right\} 0,20} \leq 1$$

$$G_3 = \frac{25,60}{\left\{ 8,0 \left[T_i - \left(0,003081 L \right)^{2,033} \right]^{0,598} \right\} 0,20} \leq 1.$$

Na restrição G_3 é definida uma nova variável, V , com a finalidade de reduzir a complexidade dessa restrição. Assim temos:

$$V = T_i - (0,003081 L)^{2,033} \Rightarrow G_{12} = \frac{V + (0,003081 L)^{2,033}}{T_i} \leq 1$$

$$G_{12} = V T_i^{-1} + (0,003081 L)^{2,033} T_i^{-1} \leq 1$$

Portanto, a restrição G_3 torna-se:

$$G_3 = \frac{25,60}{\left[8,0 V^{0,598} \right] \left[0,20 \right]} \leq 1.$$

$$G_4 = L_f / n_1 L \leq 1 : G_4 = 680 / n_1 L \leq 1$$

$$G_5 = L / L_{\max} \leq 1 : G_5 = L / 340 \leq 1$$

$$G_6 = L_{\min} / L \leq 1 : G_6 = 80 / L \leq 1$$

$$G_7 = n_{fs} Q_f / Q \leq 1 : G_7 = n_{fs} Q_f / 50 \leq 1$$

$$G_8 = n_l n_v T_i / T_{max} \leq 1 : G_8 = n_l n_v T_i / 7300 \leq 1$$

$$G_9 = n_f / (n_v n_{fs}) \leq 1 : G_9 = n_f / (n_v n_{fs}) \leq 1$$

$$G_{10} = n_{fs} E / W_f \leq 1 : G_{10} = n_{fs} 0,80 / 340 \leq 1$$

Para as vazões de 0,55 l/s, 0,65 l/s, 0,75 l/s e 0,85 l/s, os coeficientes e expoentes das restrições G_9 e G_{12} foram calculadas de forma semelhante àquela usada para a vazão de 0,45 l/s.

Todas as restrições são linearizadas em um ponto inicial arbitrário, sendo que o mesmo não precisa ser um ponto exequível.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicando a técnica da programação geométrica posinomial foram definidos os valores da função objetivo para diferentes valores de vazão aplicada, número de parcelas na direção do comprimento do campo e do número de conjuntos na direção da largura. Os valores da função objetivo representam os custos para irrigar toda a área ($680 \text{ m} \times 340 \text{ m} = 231.200,00 \text{ m}^2$), durante o ciclo de uma cultura qualquer para o qual seriam necessárias 6 irrigações de 32 mm.

As tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam os valores obtidos para as variáveis do projeto e da função objetivo. Nas colunas de G_o (função objetivo) onde aparece "_____" significa que não há solução para o problema, devido as restrições quanto à vazão disponível, tempo máximo para irrigação da área e comprimento máximo da parcela.

Tabela 4 - Valores obtidos para as variáveis e para a função objetivo, para $n_l = 5$.

n_l	n_v	n_{fs}	Q_f	T_i	L	G_o
5	4	106	0,45 0,55	170,2	136,00	13403800,00
5	5	85	0,45 0,55 0,65	170,2 149,5	136,00	13410960,00 14268630,00 -
5	6	71	0,45 0,55 0,65 0,75	170,2 149,5 137,1	136,00	13418070,00 14274890,00 15327170,00 -
5	7	61	0,45 0,55 0,65 0,75 0,75	170,2 149,5 137,1 129,5	136,00	13425270,00 14281180,00 15332900,00 16559630,00 -
5	8	53	0,45 0,55 0,65 0,75 0,85	170,2 149,5 137,1 129,5 124,6	136,00	13432360,00 14287440,00 15338660,00 16565070,00 17901680,00
5	9	47	0,45 0,55 0,65 0,75 0,85	170,2 149,5 137,1 129,5 124,6	136,00	- 14293770,00 15344420,00 16570500,00 17906900,00

Tabela 5 - Valores obtidos para as variáveis e para a função objetivo, para $n_1 = 4$.

n_l	n_v	n_{fs}	Q_f	T_i	L	G_o
			0,45	208,7	170,00	12847140,00
4	4	106	0,55			

			0,45	208,7		12854120,00
4	5	85	0,55	175,4	170,00	13166580,00
			0,65			-

			0,45	208,7		12861160,00
4	6	71	0,55	175,4	170,00	13172480,00
			0,65	155,4		13717500,00
			0,75			-

			0,45	208,7		12868180,00
			0,55	175,4		13178390,00
4	7	61	0,65	155,4	170,00	13722740,00
			0,75	143,0		14485830,00
			0,85			-

			0,45	208,7		12875200,00
			0,55	175,4		13184300,00
4	8	53	0,65	155,4	170,00	13722950,00
			0,75	143,0		14490640,00
			0,85	135,0		15406660,00

			0,45			-
4	9	47	0,55	175,4	170,00	13190160,00
			0,65	155,4		13733180,00
			0,75	143,0		14495450,00
			0,85	135,0		15411180,00

Tabela 6 - Valores obtidos para as variáveis e para a função objetivo, para $n_1 = 3$.

n_l	n_v	n_{fs}	Q_f	T_i	L	G_o
3	4	106	0,45		227,00	-
			0,55			-

3	5	85	0,45			-
			0,55		227,00	-
			0,65			-

3	6	71	0,45			-
			0,55		227,00	-
			0,65			-
			0,75			-

3	7	61	0,45			-
			0,55			-
			0,65	194,1	227,00	12608650,00
			0,75	171,0		12792700,00
			0,85			

3	8	53	0,45			-
			0,55			-
			0,65	194,1	227,00	12613520,00
			0,75	171,0		12797000,00
			0,85	156,2		13213420,00

3	9	47	0,45			-
			0,55			-
			0,65	194,1	227,00	12618440,00
			0,75	171,0		12801320,00
			0,85	156,2		13217380,00

Tabela 7 - Valores obtidos para as variáveis e para a função objetivo, para $n_1 = 2$.

n_1	n_v	n_{fs}	Q_f	T_i	L	G_o
2	4	106	0,45			-
			0,55		340,00	-
			0,65			-
			0,75			-
2	5	85	0,45			-
			0,55		340,00	-
			0,65			-
			0,75			-
2	6	71	0,45			-
			0,55		340,00	-
			0,65			-
			0,75			-
2	7	61	0,45			-
			0,55			-
			0,65		340,00	-
			0,75			-
2	8	53	0,45			-
			0,55			-
			0,65		340,00	-
			0,75			-
			0,85	212,1		11722640,00
2	9	47	0,45			-
			0,55			-
			0,65		340,00	-
			0,75			-
			0,85	212,1		11726220,00

4.1. Efeito da Variação de n_1 sobre L , T_i e G_o

A variável n_1 (número de parcelas na direção do comprimento do campo) está diretamente relacionada ao comprimento do campo (L_F). À medida que se reduz n_1 , o comprimento da parcela (L) e o tempo de aplicação de água (T_i) aumentam. A tabela 8 mostra a variação do tempo de aplicação em função do número e do comprimento das parcelas, considerando a vazão aplicada de 0,85 l/s.

Tabela 8 - Variação de T_i em função de n_1 e L .

n_1	L (m)	Diferença % de L	T_i (min)	Diferença % de T_i
5	136,00	25,00	124,6	8,35
4	170,00	33,53	135,0	15,70
3	227,00	49,78	156,2	35,79
2	340,00		212,1	

Verifica-se que os aumentos percentuais para o comprimento de parcelas são maiores do que aqueles observados para o tempo de aplicação. Essas diferenças percentuais são crescentes à medida que aumenta L e T_i . A variável tempo de aplicação reflete na função objetivo através dos termos relacionados ao custo da água e da mão-de-obra. O comprimento da parcela que está relacionado à variável n_1 , apresenta-se em todos os termos da função objetivo.

A variação destes parâmetros resulta numa alteração no valor da função objetivo conforme os valores per-

centuais observadas na tabela 8. Pelos valores da função objetivo verifica-se que, para a mesma vazão aplicada, o aumento no comprimento da parcela e no tempo de aplicação promove a redução no número de parcelas no campo e no custo do projeto. Na tabela 9 estão relacionadas as variações no custo do projeto em função do comprimento da parcela e do tempo de aplicação, sendo a vazão aplicada de 0,85 l/s e o número de conjuntos no sentido da largura do campo (n_v) igual a 8.

Tabela 9 - Custo do projeto em função de L e T_i , para $Q_f = 0,85$ l/s e $n_v = 8$.

L (m)	T_i (min)	G_o (Cr\$)	Diferença % de G_o
340,0	212,1	11722640,00	12,72
227,0	156,2	13213420,00	16,60
170,0	135,0	15406660,00	16,20
136,0	124,6	17901680,00	

Pela tabela 9 pode-se deduzir que se aumentar o comprimento da parcela de 136,0 metros para 340,0 metros, a redução no custo do projeto é de 52,71%. O Soil Conservation Service (USDA, 1979) dos Estados Unidos, recomenda que, sempre que possível o comprimento das parcelas irrigadas deve ser maximizado. Maiores comprimentos implicam em menor número de canais ou tubulações para derivação de água às parcelas e canais de drenagem para remoção do excesso de água superficial, menor utilização de mão-de-obra e maior área efetivamente cultivada. Todas estas características favorecem a economia do projeto de irrigação.

Nas tabelas 4, 5 e 6 verifica-se que para o mesmo comprimento de parcela (L), o tempo de aplicação de água (T_i) reduz à medida que aumenta a vazão aplicada (Q_f). Considerando como exemplo os dados de vazão aplicada e tempo de aplicação, obtidos para $n_l = 4$; $L = 170,0$ m e $n_v = 8$, observa-se, na Tabela 10, que a diferença percentual no tempo de aplicação reduz à medida que aumenta a vazão aplicada. Entretanto, o valor do projeto (G_o) aumenta em função do custo da água, pois o custo de estruturas hidráulicas permanece constante e o custo da mão-de-obra diminui com a redução do tempo de aplicação. A diferença percentual de G_o aumenta em função do aumento da vazão aplicada.

Tabela 10 - Variação de T_i e G_o em função de Q_f .

Q_f (l/s)	T_i (min)	Def. % de T_i	G_o (Cr\$)	Def. % de G_o
0,45	208,7	18,93	12875200,00	2,40
0,55	175,4	12,93	13184300,00	4,12
0,65	155,4	8,65	13727950,00	5,56
0,75	143,0	5,92	14490640,00	6,32
0,85	135,0		15406660,00	

Na Figura 3 verifica-se que, à medida que diminui o número de parcelas no campo, o tempo de aplicação tem uma taxa de acréscimo maior para menores vazões. Observa-se, também, que somente a vazão de 0,85 l/s atinge o comprimento máximo da parcela ($n_l = 2$).

Figura 3 - Variação de T_i em função de Q_f e n_i .

4.2. Efeito da Variação de n_v , n_f e n_{fs} sobre G_o

Com relação ao número de conjuntos (n_v) existentes no campo, verifica-se que para a mesma vazão aplicada o custo do projeto aumenta à medida que aumenta o número de conjuntos, sendo os acréscimos de G_o variáveis conforme o número de parcelas no campo (n_l) e a vazão aplicada (Q_f). Nas tabelas 11 e 12 estão relacionados os valores de G_o em função do número de conjuntos e os acréscimos observados. Verifica-se também, que mantendo constante as demais variáveis e aumentando a vazão aplicada, ocorre uma redução na diferença percentual de G_o , conforme pode ser comparado entre as tabelas 11 e 12.

Tabela 11 - Custo do projeto em função de n_v , para $Q_f = 0,75$ l/s.

n_v	$n_l = 3$	
	G_o (Cr\$)	Diferença % de G_o
6	-	
7	12792700,00	0,034
8	12797000,00	0,034
9	12801320,00	

n_v	$n_l = 4$		$n_l = 5$	
	G_o (Cr\$)	Diferença % de G_o	G_o (Cr\$)	Diferença % de G_o
6	-		-	
7	14485830,00	0,033	16559630,00	0,032
8	14490640,00	0,033	16565070,00	0,032
9	14495450,00		16570500,00	

Tabela 12 - Custo do projeto em função de n_v , para $Q_f = 0,85$ l/s.

n_v	$n_l = 2$		$n_l = 3$	
	G_o (Cr\$)	Diferença % de G_o	G_o (Cr\$)	Diferença % de G_o
7	-		-	
8	11722640,00	0,031	13213420,00	0,030
9	11726220,00		13217380,00	

n_v	$n_l = 4$		$n_l = 5$	
	G_o (Cr\$)	Diferença % de G_o	G_o (Cr\$)	Diferença % de G_o
7	-		-	
8	15406660,00	0,029	17901680,00	0,029
9	15411180,00		17906900,00	

O aumento do número de conjuntos acarretará uma redução no número de sulcos irrigados por conjuntos (n_{fs}) e a sua participação na composição do custo do projeto é bem inferior àqueles observados para as variáveis n_l , L e T_i , conforme pode ser observado nas tabelas 8, 11 e 12.

O produto $n_v \cdot n_{fs}$ corresponde ao número total de sulcos (n_f) possíveis de existir na área, que por sua vez é função da largura do campo (W_f) e do espaçamento entre sulcos (E), sendo no caso em estudo igual a 425 sulcos ($340,0 + 0,80$ m). Para detectar a influência das variáveis n_v e n_{fs} em cada termo da função objetivo, foram fixados os valores de Q_f , T_i , n_l e n_f , variando-se n_v e n_{fs} .

Tabela 13 - Valores para cada termo da função objetivo em relação a n_v e n_{fs} .

$Q_f = 0,85 \text{ l/s}; T_i = 212,1 \text{ min}; n_l = 2; n_f = 425$					
n_v	n_{fs}	$G_{Ag} \text{ (Cr\$)}$	$G_{Est} \text{ (Cr\$)}$	$G_{MO} \text{ (Cr\$)}$	Difer. % G_{MO}
8	53	11031132,31	663000,00	28506,24	12,50
9	47	11031132,31	663000,00	32069,52	

Pela tabela 13 verifica-se que o termo da função objetivo relacionado à água (G_{Ag}) e o termo relacionado à construção de estruturas hidráulicas (G_{Est}) não sofrem alterações se o número total de sulcos for constante. No entanto, o termo relacionado ao custo da mão-de-obra (G_{MO}) é variável conforme o número de conjuntos existente na área e número de sulcos irrigados por conjunto. A figura 4 mostra o custo do projeto em relação ao número de sulcos irrigados por conjunto e vazão aplicada, considerando $n_l = 4$. Verifica-se que o número de sulcos irrigados por conjunto reduz à medida que aumenta a vazão aplicada. O número de sulcos possíveis de serem irrigados por conjunto é função da vazão aplicada por sulco e da vazão disponível (Q).

Figura 4 - Custo do projeto em função do número de sulcos irrigados por conjunto e da vazão aplicada, para $n_1 = 4$.

4.3. Efeito da Variação de Q_f sobre G_o

Considerando a variável vazão aplicada, observa-se pelas tabelas 4, 5 e 6, que mantendo constante os demais parâmetros, a função objetivo aumenta à medida que aumenta a vazão aplicada, sendo que estes acréscimos percentuais aumentam conforme aumenta o valor da vazão. A tabela 14 caracteriza esta situação, sendo adotado como exemplo, $n_1 = 5$ e $n_v = 8$.

Tabela 14 - Variação do custo do projeto em função de Q_f .

Q_f (l/s)	G_o (Cr\$)	Diferença % de G_o
0,45	13432360,00	6,37
0,55	14287440,00	7,36
0,65	15338660,00	8,00
0,75	16565070,00	8,07
0,85	17901680,00	

Considerando o mesmo valor de n_v e mudando o valor de n_1 , a diferença percentual de G_o apresenta a mesma tendência observada na tabela 14, porém as taxas de acréscimos reduzem à medida que diminui o valor de n_1 .

A figura 5 representa o custo do projeto em função da vazão aplicada para alguns casos estudados. Verifica-se que para os mesmos valores de número de parcela no campo (n_1), as taxas de acréscimo no custo do projeto apresentam pequenas variações. Observa-se, também, que para

Figura 5. Custo do projeto em função da vazão aplicada ao sulco.

$n_v = 7$, a vazão de 0,85 l/s é impraticável uma vez que a vazão máxima disponível (Q) não é suficiente para irrigar 60 sulcos. Sendo $n_1 = 3$, a vazão de 0,45 l/s e 0,55 l/s também são impraticáveis, pois as mesmas não atingem o final do sulco que apresenta um comprimento de 227,0 metros.

Verifica-se na tabela 7 que a vazão de 0,85 l/s é a que apresentou o menor custo de projeto, isto porque as demais vazões analisadas não atingiram o comprimento de 340,0 metros. Observando a tabela 6, verifica-se que o custo do projeto reduz para menores vazões. Assim, se para o comprimento de 340,0 metros, uma vazão menor que 0,85 l/s tivesse atingido o final do sulco, provavelmente resultaria num menor custo do projeto.

Para o caso em estudo verifica-se nas tabelas 15 e 16 que o aumento de n_1 promoverá um acréscimo de 46,87% no custo da água e da mão-de-obra e 150% no custo da construção de estruturas hidráulicas. Porém, o coeficiente de custo que exerce maior influência no custo do projeto é aquele relacionado ao custo da água.

Tabela 15 - Valores para cada termo da função objetivo em função de n_l , T_i e Q_f para $n_v = 8$.

	$n_l=2$ $n_v=8$	$n_l=3$ $n_v=8$	$n_l=4$ $n_v=8$	$n_l=5$ $n_v=8$	Difer.
CUSTOS	$T_i=212,1$	$T_i=156,2$	$T_i=135,0$	$T_i=124,6$	% entre
	$Q_f=0,85$	$Q_f=0,85$	$Q_f=0,85$	$Q_f=0,85$	$n_l=2$ e 5
G_{Ag}	11033442,00	12188286,00	14045400,00	16204230,00	46,87
G_{MO}	28506,24	31489,92	36288,00	41865,60	46,87
G_{Est}	663000,00	994500,00	1326000,00	1657500,00	150,00

Tabela 16 - Valores para cada termo da função objetivo em função de n_l , T_i e Q_f para $n_v = 9$.

	$n_l=2$ $n_v=9$	$n_l=3$ $n_v=9$	$n_l=4$ $n_v=9$	$n_l=5$ $n_v=9$	Difer.
CUSTOS	$T_i=212,1$	$T_i=156,2$	$T_i=135,0$	$T_i=124,6$	% entre
	$Q_f=0,85$	$Q_f=0,85$	$Q_f=0,85$	$Q_f=0,85$	$n_l=2$ e 5
G_{Ag}	11033442,00	12188286,00	14045400,00	16204230,00	46,87
G_{MO}	32069,52	35426,16	40824,00	47098,80	46,87
G_{Est}	663000,00	994500,00	1326000,00	1657500,00	150,00

Comparando as tabelas 15 e 16, observa-se que o único termo que compõe a função objetivo e que sofreu alteração com a variação de n_v é aquele referente ao custo da mão-de-obra, conforme já foi observado anteriormente. O custo da mão-de-obra também sofre alterações em função da variação de n_l e T_i . Comprova-se, também, pelas tabelas 15 e 16, que aumentando-se o número de parcelas no campo, ocorre-

rá um aumento no custo da construção de estruturas hidráulicas e, conseqüentemente, no custo do projeto.

De acordo com REDDY & CLYMA (1981) a solução ótima para o projeto vai depender do valor relativo dos coeficientes de custos.

4.4. Sensibilidade do Modelo à Variação do Custo da Água

Para esta análise foi considerado constante os valores de $Q_f = 0,85$ l/s, $n_l = 2$, $n_v = 8$, $T_l = 212,1$ min, $L = 340,0$ m e $n_{fs} = 53$ e os coeficientes de custo de mão-de-obra e construção de estruturas hidráulicas. Os valores para o custo da água foram sendo alterados a partir de Cr\$ 0,0 a Cr\$ 2,50 o litro. Na tabela 17 estão relacionados os valores obtidos para a função objetivo e as respectivas diferenças percentuais.

Tabela 17 - Custo do projeto em função da variação do custo da água, para $Q_f = 0,85$ l/s, $n_l = 2$ e $n_v = 8$.

G_{Ag} (Cr\$/l)	Difer. % de G_{Ag}	G_o (Cr\$)	Difer. % de G_o
0,0		691500,00	1595,25
0,2	150,00	11722640,00	141,15
0,5	100,00	28269370,00	97,55
1,0	50,00	55847150,00	49,38
1,5	33,33	83424960,00	33,06
2,0	25,00	111002800,00	24,84
2,5		138580700,00	

Não existindo tarifa para o consumo de água, o custo do projeto é definido em função do custo de construção de estruturas hidráulicas e da mão-de-obra. Sendo o custo da água igual a Cr\$ 0,20 o litro, o aumento no custo do projeto é de 1595,25%. À medida que aumenta o custo da água, o custo do projeto sofre acréscimos, sendo que a $\%$ de G_0 decrescentes com o aumento da tarifa. Na figura 6 está relacionado o custo do projeto em função do custo da água. REDDY & CLYMA (1981) observaram que se o custo da água é elevado, deve-se optar por um sistema mais eficiente em que as perdas sejam mínimas. Nesta figura, observa-se que o custo do projeto aumentou linearmente com o aumento no custo da água, o que concorda com as análises feitas por REDDY & APOLAYO (1991).

4.5. Sensibilidade do Modelo à Variação do Custo da Mão-de-obra

Para esta análise foram adotadas as mesmas condições do item 4.4 e variou o coeficiente do custo da mão-de-obra de Cr\$ 0,0 a Cr\$ 210,00 a hora de trabalho. Os coeficientes do termo relacionado à água e construção de estruturas hidráulicas foram mantidos constantes e iguais a 72 e 780, respectivamente. Na tabela 18 encontram-se os valores obtidos para a função objetivo e os acréscimos percentuais dessa função.

Figura 6. Custo do projeto em função do custo da água

Tabela 18 - Custo do projeto em função da variação do custo da mão-de-obra, para $Q_f = 0,85 \text{ l/s}$, $n_1 = 2$ e $n_v = 8$.

G_{MO} (Cr\$/h)	Difer. % de G_{MO}	G_o (Cr\$)	Difer. % de G_o
0,00		11694150,00	
42,00		11708390,00	0,1218
84,00	100,00	11722640,00	0,1217
126,00	50,00	11736900,00	0,1216
168,00	33,33	11751140,00	0,1213
210,00	25,00	11765410,00	0,1214

Observa-se que os acréscimos produzidos no custo do projeto, devido ao custo da mão-de-obra, são bem inferiores àqueles ocorridos em função do custo da água. Quando não existe o custo da mão-de-obra na composição do custo do projeto, observa-se que G_o ainda é relativamente alto, não sendo, portanto, a mão-de-obra que mais onera o custo do projeto. Se a mão-de-obra for de Cr\$ 168,00/hora, o custo para irrigar o campo será de Cr\$ 9.498,33 por irrigação, sendo necessário 7 dias/homem. Na figura 7 está relacionado o custo do projeto em função do custo da mão-de-obra.

4.6. Sensibilidade do Modelo à Variação do Custo da Construção de Estruturas Hidráulicas

Também neste caso, foram consideradas as condições do item 4.4, variando os coeficientes de custo para construção de estruturas hidráulicas desde Cr\$ 0,0 a

Figura 7 - Custo do projeto em função do custo da mão-de-obra.

Cr\$ 2437,50 por metro linear. Os coeficientes de custo para água e mão-de-obra foram mantidos constantes e iguais aqueles adotados na análise geral. Na tabela 19 estão relacionados os valores obtidos para a função objetivo, assim como os acréscimos percentuais de G_o para cada incremento de custo da construção.

Tabela 19 - Custo do projeto em função da variação do custo de construção, para $Q_f = 0,85$ l/s, $n_1 = 2$ e $n_v = 8$.

G_{Est} (Cr\$/m)	Difer. % de G_{Est}	G_o (Cr\$)	Difer. % de G_o
0,00		11058160,00	
487,50		11391140,00	3,0112
975,00	100,00	11722640,00	2,9102
1462,50	50,00	12054140,00	2,8279
1950,00	33,33	12385640,00	2,7509
2437,50	25,00	12717140,00	2,6765

Verifica-se que os acréscimos percentuais no custo do projeto em função do custo das construções reduzem à medida que aumenta o custo por metro linear. Seu efeito no custo do projeto é bem menos acentuado do que o custo da água e mais expressivo do que o custo da mão-de-obra. De acordo com REDDY & CLYMA (1981), se não existir custo referente a construção de estruturas hidráulicas, o comprimento das parcelas pode ser menor. A figura 8 relaciona o custo do projeto em função do custo da construção.

Figura 8 - Custo do projeto em função do custo da construção de estruturas hidráulicas.

4.7. Análise de Eficiência

Esta análise foi realizada para $n_i = 3$, sendo neste caso, o valor de $L = 227$ metros e o tempo de aplicação de água (T_i) variável conforme a vazão aplicada. Na tabela 20 estão relacionados os valores obtidos para eficiência de aplicação (E_a), eficiência de armazenamento (E_s), perdas por percolação (P_p) e perdas por deflúvio superficial (P_d).

Tabela 20 - Dados de eficiência e perdas.

Q_i (l/s)	T_i (min)	G_o (Cr\$)	E_a	E_s	P_p	P_d
0,65	194	12613520,00	0,76	1,00	0,22	0,02
0,75	171	12797000,00	0,75	1,00	0,16	0,09
0,85	157	13213420,00	0,73	1,00	0,12	0,15

Verifica-se pela tabela 20 que a vazão de 0,65 l/s foi a que apresentou o melhor índice de eficiência de aplicação, o menor custo de projeto e o maior índice de perdas por percolação. A vazão de 0,85 l/s revelou uma perda por deflúvio superficial superior à perda por percolação.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e para as condições em que foi desenvolvido o experimento pode-se concluir que:

- a) Aumentando o comprimento dos sulcos, aumenta o tempo de aplicação de água e reduz o custo total do projeto.
- b) O menor custo de projeto é obtido para menor número de parcela e menor número de conjunto, ou seja, quanto maior for o comprimento do sulco e maior for o número de sulcos irrigados por conjunto, maior será a economia no projeto.
- c) Se o número total de sulcos possíveis de existir na área a ser irrigada sofrer alguma alteração, todos os termos que compõem a função objetivo serão alterados. Mantendo constante o número total de sulcos, somente o componente da função objetivo relacionado ao custo de mão-de-obra sofrerá alteração.

- d) O componente da função que exerceu maior influência no custo do projeto é aquele relacionado ao custo da água, seguido do componente relacionado ao custo de estruturas hidráulicas.
- e) O componente da função objetivo que exerceu menor influência no custo do projeto foi aquele relacionado ao custo da mão-de-obra.
- f) Se o custo da mão-de-obra for muito elevado, deve-se adotar o maior comprimento de parcela e reduzir o número de conjuntos irrigados para minimizar a utilização da mão-de-obra.
- g) O maior índice de eficiência de aplicação foi obtido para a vazão que apresentou o menor custo de projeto, para um comprimento de sulco de 227 metros.

6. RECOMENDAÇÕES

O programa de computador utilizado para obter os dados necessários para a análise, revelou a necessidade de incluir no mesmo um procedimento que forneça valores inteiros para algumas variáveis de projeto que fisicamente não podem apresentar valores fracionários. Como exemplo, o número de parcela no campo e o número de conjuntos a serem irrigados.

Um futuro trabalho deveria incluir na análise de sensibilidade a variação da lâmina de água requerida e proceder o estudo para diferentes tipos de solo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, M.A.S.B.; SOARES, A.A.; COUTO, L. & BERNARDO, S. Características de avanço e infiltração de água em sulcos para escoamentos contínuos e intermitentes. *Irrigação e Tecnologia Moderna*, 40: 26-31, 1990.
- BASSET, D.L.; FANGMEIR, D.D. & STRELKOFF, T. Hydraulics of surface irrigation in: Design and Operation of Farm Irrigation Systems. The American Society of Agricultural Engineers, 12: 447-498, 1983.
- CHIANG, A.C. *Matemática para Economistas*. São Paulo, McGraw Hill do Brasil. 1982. 684p.
- CONVERSE, A.O. *Otimização*. São Paulo, EDART. 1977. 262p.
- CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S.; PAIR, C.H. & SHOCKELY, D.G. Methods for evaluation irrigation systems. *Agricultural Handbook*, 82. Washington, D.C., SCS-USDA, 1956, 24p.
- DAEE. *Diagnóstico básico do plano de irrigação do Estado de São Paulo*, Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1973, 30p.
- DUFFIN, R.J.; PETERSON, E.L. & ZENER, C. *Geometric Programming*. New York, John Wiley and Sons. 1967. 287p.
- FINKEL, H.J. & NIR, D. Criteria of the choice of irrigation method. *Trans. Am. Soc. Agric. Engr.* 3(1): 93-99, 1979.

FRITZSCHE, H. Programação não-linear: análise e métodos. São Paulo, Editora Blücher. 1978. 170p.

GILLEY, J.R. Intake function and border irrigation. Fort Collins, Colorado State University, 1968, 130p. [M.S. Thesis].

HALL, W.A. Design of irrigation border checks. *Agricultural Engineering*, 41: 439-442, 1960.

HART, W.E.; WOODWARD, G. & HUMPHERYS, A.S. Design and operation of gravity or surface systems in; design and operation of farm irrigation systems. *The American Society of Agricultural Engineers*, 13: 501-580, 1983.

HOLZAPFEL, E.A.; MARIÑO, M.A. & MORALES, J.C. Surface irrigation optimization models. *Journal of the Irrig. and Drain, Div. ASCE*, 112(IR1): 1-9, 1986.

KARMEI, D. Distribution patterns and losses for furrow irrigation. *Journal of the Irrig. and Drain, Div ASCE*, 104(IR1): 59-68, 1978.

KARMEI, D. & ORON, G. Analysis of closed conduit irrigation systems and its subdivisions. *Journal of the Irrig. and Drain, Div ASCE*, 105(IR2): 187-196, 1979.

MCMILLAN, C. Mathematical programming: an introduction to the design and application of optimal decision machines. *Wiley Series in Management and Administration*. 1970, 496p.

MUSIK, J.T.; SLETTEN, W.H. & DUSEK, D.A. Evaluation of graded furrow irrigation with length of run on a clay loam soil. *Trans. Am. Soc. Agric. Engr.* 16(S): 1075-1080, 1084, 1973.

- ON FARM IRRIGATION COMMITTEE OF THE IRRIGATION AND DRAINAGE DIVISION, ASCE. Describing irrigation efficiency and uniformity. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proc. Am. Soc. Civil Engr.*, 104(IR1): 35-41, 1978.
- PERI, G.; HART, W.E.; NORUM, D.J. Optimal irrigation depths - a method of analysis. *Journal of the Irrig. and Drain. Div. Proc. Am. Soc. Civil Engr.*, 105(IR4): 341-355, 1979.
- RAYEJ, W. & WALLENDER, W.W. Furrow model with specified space intervals. *Journal of the Irrig. and Drain. Eng. ASCE*, 113(4): 536-548, 1987.
- REDDY, J.M. & APOLAYO, M.H. Sensitivity of furrow irrigation sistem cost and desing variables. *Journal of the Irrig. and Drain. Eng. ASCE*. 117(2): 201-219, 1991.
- REDDY, J.M. & CLYMA, W. Optimal design of furrow irrigation system. *Trans. of the ASAE* 24(3): 617-623, 1981a.
- REDDY, J.M. & CLYMA, W. Optimal design of border irrigation system. *Journal of the Irrig. and Drain. Eng. ASCE*, 103(IR3): 289-305, 1981b.
- REDDY, J.M. & CLYMA, W. Optimizing surface irrigation system design parameters: simplified analysis. *Trans. of the ASAE* 24(4): 966-974, 1982.
- REZENDE, F.C. & SCALOPPI, E.J. Avaliação de métodos para determinação das características de infiltração em sulcos. *Pesq. Agrop. Bras.* 20(2): 227-233, 1985.
- SCALOPPI, E.J. A method for evaluation infiltration parameters in surface irrigation. In *Congress on Irrigation and Drainage 12*. Fort Collins, Colorado. Proceeding New Delhi, india. International Commission on Irrig. and Drain.: 369-378, 1984.

SCALOPPI, E.J. Sistema de irrigação por superfície. Informe Agropecuário 12(139), 1986.

SCALOPPI, E.J. Modelos matemáticos para simulação de irrigação superficial. Faculdade de Ciências Agrônomicas/UNESP, Botucatu, 1983. 155p. [Tese de Livre Docência].

SCHNEIDER, A.D.; NEW, L.L. & MUSIK, J.T. Reducing tailwater runoff for efficient irrigation water use. Trans. Am. Soc. Agric. Engr. 19(6): 1093-1097, 1976.

SOIL CONSERVATION SERVICE. Furrow Irrigation, Chapter 5. Washington, D.C., Nat. Eng. Handbook, USDA, 1979, 96p.

SOUZA, F. & AUGUSTO, S.G. Aplicação da técnica do SCS para projeto e manejo da irrigação por sulcos abertos e em declive, com e sem redução de vazão. Irrigação e Tecnologia Moderna, 17: 9-14, 1984.

SPOTO, E.S. Métodos de programação geométrica. São Carlos, EESC/USP, 1988, 151p. [Dissertação de Mestrado].

WALLENDER, W.W. Furrow model with spatially varying infiltration. Trans. of the ASAE 29(4): 1012-1016, 1986.

WALLENDER, W.W. & RAYEJ, M. Economic optimization of furrow irrigation with uniform and nonuniform soil. Trans. of the ASAE 30(5): 1425-1429, 1987.

WU, I-P. & LIANG, T. Optimal design of furrow length of surface irrigation. Journal of the Irrig. and Drain. Eng. ASCE, 96(1R3): 319-331, 1970.