

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DO USO DA ÁGUA NO PERÍMETRO
IRRIGADO TABULEIRO DE RUSSAS UTILIZANDO
PROGRAMAÇÃO LINEAR E NÃO-LINEAR**

WLISSSES MATOS MACIEL

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP
Dezembro – 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DO USO DA ÁGUA NO PERÍMETRO
IRRIGADO TABULEIRO DE RUSSAS UTILIZANDO
PROGRAMAÇÃO LINEAR E NÃO-LINEAR**

WLISSSES MATOS MACIEL

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Cury Saad

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp – Campus de
Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia (Irrigação e
Drenagem).

BOTUCATU – SP
Dezembro – 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Maciel, Wlisses Matos, 1978-
M152o Otimização econômica do uso da água no perímetro irrigado tabuleiro de russas utilizando programação linear e não-linear / Wlisses Matos Maciel. - Botucatu : [s.n.], 2016
xviii, 130 f. : ils. color., grafs. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2016
Orientador: João Carlos Cury Saad
Inclui bibliografia

1. Irrigação. 2. Recursos hídricos. 3. Renda (Agricultura). 4. Modelos matemáticos. 5. Planejamento agrícola. I. Saad, João Carlos Cury. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

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

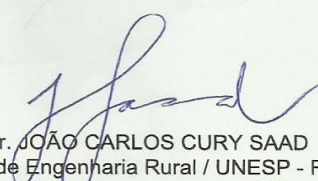
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DO USO DA ÁGUA NO PERÍMETRO IRRIGADO
TABULEIRO DE RUSSAS UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR E NÃO-
LINEAR

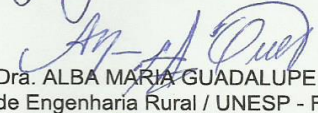
AUTOR: WLISSES MATOS MACIEL

ORIENTADOR: JOÃO CARLOS CURY SAAD

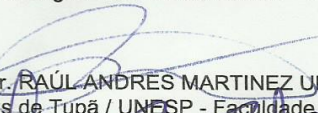
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA
(IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:



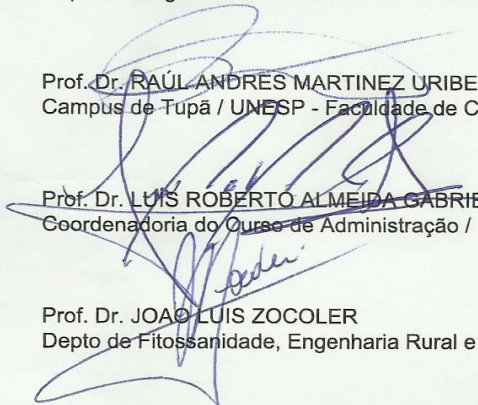
Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD
Depto de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Profa. Dra. ALBA MARIA GUADALUPE ORELLANA GONZÁLEZ
Depto de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. RAÚL ANDRÉS MARTÍNEZ URIBE
Campus de Tupã / UNESP - Faculdade de Ciências e Engenharia



Prof. Dr. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO
Coordenadoria do Curso de Administração / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP

Prof. Dr. JOÃO LUIS ZOCOLER
Depto de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Botucatu, 06 de dezembro de 2016.

Ofereço

Aos meus amados pais,

Maciel e Vanda e minhas irmãs Karine e Harine.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida.

Aos meus queridos pais Manuel João Maciel e Vanda Matos Maciel pelo esforço, confiança, dedicação e carinho.

As minhas irmãs Karine Matos Maciel, pela convivência e amizade e Harine Matos Maciel pelas sugestões valiosas de uma amiga de trabalho.

Ao Prof. Dr. João Carlos Cury Saad, pela orientação, ensinamentos e amizade na realização desse trabalho.

À Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” FCA/UNESP e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia – Irrigação e Drenagem pela oportunidade do curso de doutorado.

A todos os professores e funcionários da FCA/UNESP pelos ensinamentos e convivência.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará – IFCE, através do Campus Iguatu pela liberação para realização do curso de doutorado.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP, pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de doutorado.

A todos os amigos do Curso de Pós-Graduação, pela alegria vivida nesse período.

SUMÁRIO

RESUMO.....	01
ABSTRACT.....	02
1 INTRODUÇÃO.....	03
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	06
2.1 Agricultura irrigada.....	06
2.2 Gestão de recursos hídricos.....	08
2.3 Legislação em recursos hídricos.....	09
2.4 Alocação de recursos hídricos.....	10
2.5 Otimização de recursos hídricos.....	11
2.6 Técnicas de análises de sistemas utilizados em recursos hídricos.....	12
2.6.1 Simulação.....	13
2.6.1 Otimização.....	14
2.7 Programação linear.....	15
2.8 Programação não-linear.....	17
2.9 Custo na agricultura irrigação.....	19
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1 Caracterização da área.....	22
3.2 Instrumento analítico.....	23
3.2.1 Modelo de PL para minimização dos custos de implantação e operação de sistema de irrigação localizada (microaspersão) para a cultura da banana.....	24
3.2.1.1 Função objetivo.....	25
3.2.1.2 Restrições.....	27
3.2.2 Modelo de PNL para minimização dos custos de implantação e operação de sistema de irrigação localizada (microaspersão) para a cultura da banana.....	32
3.2.2.1 Função objetivo.....	34
3.2.2.2 Restrições.....	38
3.2.3 Modelo de PL para maximização da renda líquida de culturas irrigadas.....	44
3.2.3.1 Formulação do modelo.....	44
3.2.3.2 Coeficientes da função objetivo.....	45
3.2.3.3 Coeficientes de requerimento mensal de água.....	46
3.2.3.4 Restrições.....	49

3.2.3.5	Indicadores de mercado.....	52
3.2.3.6	Padrão de culturas.....	53
3.2.3.7	Estimativa dos custos de produção, da água e da energia e preços unitários de cada cultura.....	55
3.2.4	Modelo de PNL para maximização da renda líquida de culturas irrigadas.....	56
3.2.4.1	Formulação do modelo.....	56
3.2.4.2	Função de resposta das culturas à água.....	57
3.2.4.3	Preço de mercado e custo de produção para as culturas estudadas.....	58
3.3	Resolução dos modelos.....	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1	Análise comparativa dos modelos de PL e PNL.....	59
4.1.1	Modelo de programação linear – Minimização.....	59
4.1.2	Modelo de programação não-linear – Minimização.....	61
4.1.3	Comparação do desempenho entre os modelos.....	64
4.2	Análise comparativo entre os modelos de PL e PNL na otimização do uso da água.....	67
4.2.1	Modelo de programação linear – Maximização.....	67
4.2.2	Modelo de programação não-linear – Maximização.....	68
4.2.3	Análise de sensibilidade dos modelos.....	69
4.2.3.1	Análise de sensibilidade da função objetivo dos modelos.....	70
4.2.3.2	Análise de sensibilidade do recurso terra dos modelos.....	72
4.2.3.3	Análise de sensibilidade do volume de água dos modelos.....	74
5	CONCLUSÕES.....	76
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
7	ANEXOS.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Configuração de um modelo de simulação.....	14
Figura 2 –	À esquerda mapa do Brasil com a localização do nordeste e o estado do Ceará, no centro o Ceará e localização esquemática do baixo Jaguaribe, à direita localização esquemática do baixo Jaguaribe.....	23
Figura 3 –	“Lay-out” de um sistema de irrigação por microaspersão contendo 12 unidades operacionais, utilizando no modelo de PL.....	25
Figura 4 –	“Lay-out” de um sistema de irrigação por microaspersão contendo 12 unidades operacionais, utilizando no modelo de PNL.....	33
Figura 5 –	Representação gráfica do perfil de carga hidráulica nos trechos em aclave e declive da linha de derivação, definido pelo modelo de PNL para minimização dos custos implantação e operação total do sistema de irrigação por microaspersão.....	63
Figura 6 –	“Lay-out” da área a ser irrigada.....	93
Figura 7 –	Relação entre vazão e pressão para o microaspersor utilizado.....	94
Figura 8 –	Regressão envolvendo custo do tubo de polietileno e seu diâmetro interno, para uso nas linhas laterais.....	95
Figura 9 –	Regressão envolvendo custo do tubo de PVC PN40 e seu diâmetro interno, para uso nas linhas de derivação.....	96
Figura 10 –	Regressão envolvendo custo do tubo de PVC PN80 e seu diâmetro interno, para uso nas linhas auxiliar, secundária e principal.....	97
Figura 11 –	Regressão envolvendo custo do painel de controle e o número de unidades operacionais.....	98
Figura 12 –	Representação gráfica da relação entre o custo do sistema de bombeamento e a potência requerida.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Rendimento líquido por hectare das culturas – período de 20 anos.....	47
Tabela 2 –	Requerimento mensal de irrigação (mm) das culturas.....	48
Tabela 3 –	Calendário anual de cultivo da área de estudo.....	54
Tabela 4 –	Funções de resposta das culturas à água.....	57
Tabela 5 –	Valor médio de venda dos produtos agrícolas (US\$ kg ⁻¹) na região de nordeste, CE para os anos agrícola de 1994 a 2014, e custo médio da produção (US\$ ha ⁻¹) para as culturas implantadas no Perímetro Irrigado Tabuleiros de Russas.....	58
Tabela 6 –	Solução ótima para o modelo de PL.....	68
Tabela 7 –	Solução ótima para o modelo de PNL.....	69
Tabela 8 –	Análise de sensibilidade da receita líquida das variáveis básicas para os modelos PL e PNL.....	70
Tabela 9 –	Custos marginais associados às atividades não básica e o valor mínimo da contribuição ao lucro.....	72
Tabela 10 –	Análise de sensibilidade do recurso terra, em condição de não restrição de água.....	73
Tabela 11 –	Análise de sensibilidade do volume de água mensal.....	75
Tabela 12 –	Especificações dos tubos de polietileno.....	94
Tabela 13 –	Especificações dos tubos de PVC de PN 40 (40 mca), do tipo bolsa e anel.....	95
Tabela 14 –	Especificações dos tubos de PVC de PN 80 (80 mca), do tipo bolsa e anel.....	96
Tabela 15 –	Preço do painel de controle em função do número de unidades operacional.....	97
Tabela 16 –	Sistema de filtragem.....	98
Tabela 17 –	Válvulas elétricas.....	99
Tabela 18 –	Conjunto motobomba trifásica.....	99
Tabela 19 –	Valores nominais do fluxo de caixa das culturas (US\$.ha ⁻¹) período de 20 anos.....	128
Tabela 20 –	Dados necessários ao cálculo da ETo pelo método de Penman-Montheith (2003 - 2013) Instituto Federal do Ceará IFCE/Campus Limoeiro do Norte; Altitude = 82m; Latitude (S) = 5° 37' 20"; Longitude (W) = 38° 07' 08.....	130

Tabela 21 –	Necessidades de água para a cultura do abacaxizeiro calculados através de dados de ETo (2003 – 2013)	131
Tabela 22 –	Necessidades de água para a cultura da bananeira calculados através de dados de ETo (2003 – 2013)	131
Tabela 23 –	Necessidades de água para a cultura do feijão verde para o mês de fevereiro calculados através de dados de ETo (2003 – 2013)	132
Tabela 24 –	Necessidades de água para a cultura do feijão verde para o mês de agosto calculados através de dados de ETo (2003 – 2013).....	132
Tabela 25 –	Necessidades de água para a cultura da laranjeira calculados através de dados de ETo (2003 – 2013)	132
Tabela 26 –	Necessidades de água para a cultura do limoeiro calculados através de dados de ETo (2003 – 2013)	133
Tabela 27 –	Necessidades de água para a cultura do mamoeiro calculados através de dados de ETo (2003 – 2013)	133
Tabela 28 –	Necessidades de água para a cultura do maracujazeiro calculados através de dados de ETo (2003 – 2013)	134
Tabela 29 –	Necessidades de água para a cultura do meloeiro para o mês de setembro calculados através de dados de ETo (2003 – 2013).....	134
Tabela 30 –	Necessidades de água para a cultura da melancia para o mês de setembro calculados através de dados de ETo (2003 – 2013).....	134
Tabela 31 –	Necessidades de água para a cultura do milho verde o mês de fevereiro calculados através de dados de ETo (2003 – 2013).....	134
Tabela 32 –	Necessidades de água para a cultura do milho verde para o mês de setembro calculados através de dados de ETo (2003 – 2013).	135

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Dados de saída do modelo de PL para minimização dos custos de implantação e operação total do sistema de irrigação por microaspersão.....	60
Quadro 2 –	Dados de saída do modelo de PNL para minimização dos custos de implantação e operação total do sistema de irrigação por microaspersão.....	62
Quadro 3 –	Dados de saída do modelo de PNL para minimização dos custos de implantação e operação total do sistema de irrigação por microaspersão e para o modelo linear decorrente.....	66
Quadro 4 –	Características do microaspersor.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Área a ser irrigada, em m ² ;
A1	Área irrigada no mês de janeiro (ha);
A2	Área irrigada no mês de fevereiro (ha);
A3	Área irrigada no mês de março (ha);
A4	Área irrigada no mês de abril (ha);
A5	Área irrigada no mês de maio(ha);
A6	Área irrigada no mês de junho (ha);
A7	Área irrigada no mês de julho (ha);
A8	Área irrigada no mês de agosto (ha);
A9	Área irrigada no mês de setembro (ha);
A10	Área irrigada no mês de outubro (ha);
A11	Área irrigada no mês de novembro (ha);
A12	Área irrigada no mês de dezembro (ha);
A13	Área máxima de cultivo para a combinação das culturas do abacaxizeiro e mamoeiro (ha);
A14	Área máxima de cultivo para a combinação das culturas da bananeira e maracujazeiro (ha);
A15	Área máxima de cultivo para a combinação das culturas da laranjeira e limoeiro (ha);
A16	Área máxima de cultivo para a combinação das culturas do meloeiro e melancia (ha);
A17	Área máxima de cultivo para a cultura do feijão 1 e milho 1 (ha);
A18	Área máxima de cultivo para a cultura do feijão 2 e milho 2 (ha);
AUX	Comprimento da linha auxiliar (m);
Ca	Custo parcial do investimento;
Cb	Custo parcial do investimento;
Cd	Custo parcial do investimento;
C1	Coeficiente da regressão (eq. 37);
C2	Coeficiente da regressão (eq. 37);
C3	Coeficiente da regressão (eq. 38);
C4	Coeficiente da regressão (eq. 38);
C5	Coeficiente da regressão (eq. 39);
C6	Coeficiente da regressão (eq. 39);
C7	Coeficiente da regressão (eq. 40);

C8	Coeficiente da regressão (eq. 40);
C9	Coeficiente da regressão (eq. 41);
C10	Coeficiente da regressão (eq. 41);
C11	Coeficiente da regressão (eq. 59);
C12	Coeficiente da regressão (eq. 60);
C13	Coeficiente da regressão (eq. 60);
C14	Coeficiente da regressão (eq. 61);
C15	Coeficiente da regressão (eq. 61);
Cw	Custo com a aquisição da água consumida durante o ciclo, US\$.ano ⁻¹ ;
CPC/PC	Custo com o painel de controle (US\$);
Cm/Ce	Custo total com emissores (US\$);
CEC/FI	Custo do sistema de filtragem (US\$);
CSIS	Custo dos emissores (US\$) e tubulações do sistema de irrigação (US\$.m ⁻¹), em função do diâmetro (m);
CSIS1	Custo total do sistema de irrigação (US\$);
CSIST	Custo anual com o sistema de irrigação (rede hidráulica, estação de bombeamento e de controle, consumo de energia), em US\$.ha ⁻¹ ;
Cpp/CENE	Custo anual com sistema de bombeamento (US\$);
CEB	Custo da estação de bombeamento (US\$);
CKWH/Ckw	Custo do kwh, em US\$;
CP	Custo de produção por planta, em US\$;
CE/Cm	Custo unitário do emissor em US\$;
Cpe	Custo (US\$/m) do tubo de polietileno em função do diâmetro interno (m);
Cpvc	Custo com a tubulação de PVC (US\$);
Cprod	Custo anual de produção considerando todas as práticas culturais, exceto irrigação, em US\$.ha ⁻¹ .ano ⁻¹ ;
Cpvd	Custo (US\$.m ⁻¹) do tubo de PVC em função do diâmetro interno (m), referente à linha de derivação;
Cpvs	Custo (US\$.m ⁻¹) do tubo de PVC em função do diâmetro interno (m), referente à linha de secundária;
Cpva	Custo (US\$.m ⁻¹) do tubo de PVC em função do diâmetro interno (m), referente à linha de auxiliar;

C _{pvp}	Custo (US\$.m ⁻¹) do tubo de PVC em função do diâmetro interno (m), referente à linha de principal;
C _W /C _w	Preço da água, em US\$.m ⁻³ ;
CVF	Coeficiente de variação de fabricação;
CL/Ppe	Preço do tubo de polietileno (US\$.m ⁻¹);
D	Diâmetro interno do tubo (m);
DL	Diâmetro interno da linha lateral, em m;
DD	Diâmetro interno da linha de derivação, em m;
DS	Diâmetro interno da linha secundária, em m;
DA	Diâmetro interno da linha auxiliar, em m;
DP	Diâmetro interno da linha principal, em m;
Dz/dz	Gradiente de declive (m/m) na direção da linha de derivação;
dz	Gradiente de declive (m/m);
D/LD	Comprimento da linha de derivação, em m;
DECX	Declividade na direção x;
DECY	Declividade na direção y;
E	Tarifa de energia elétrica, em US\$.kWh ⁻¹ ;
EA/Ea	Eficiência de aplicação do sistema de irrigação;
Emv	Coeficiente de variação de fabricação;
E(x)	Esperança matemática da variável X _j ;
FRC	Fator de recuperação de capital;
Fl	Coeficiente de Christiansen para a linha lateral;
Fda	Coeficiente de Christiansen para a linha de derivação em aclave;
Fdd	Coeficiente de Christiansen para a linha de derivação em declive;
Fs	Coeficiente de Christiansen para a linha secundária;
Fa	Coeficiente de Christiansen para a linha auxiliar;
Fp	Coeficiente de Christiansen para a linha principal;
HFL/Hl	Perda de carga da linha lateral (m);
Hd	Perda de carga da linha de derivação (m);
Hda	Perda de carga da linha de derivação em aclave (m);
Hdd	Perda de carga da linha de derivação em declive (m);
Hs	Perda de carga da linha secundária (m);
Ha	Perda de carga da linha auxiliar (m);
Hp	Perda de carga da linha principal (m);

HM/hw/hm	Pressão de operação do emissor (m);
Hav	Carga hidráulica média na linha de derivação (m);
HEC/He/Hec	Perda de carga na estação de controle (m);
Hf	Perda de carga devido ao atrito (m);
Hk	Carga hidráulica na saída k da linha principal (m);
Hg	Carga hidráulica na saída g da linha de derivação (m);
Hj	Carga hidráulica na saída j da linha de derivação (m);
HDo	Carga hidráulica no início da linha de derivação (m);
Hmin	Carga hidráulica (m) correspondente à vazão mínima na unidade operacional, sendo calculada em função da uniformidade de emissão;
Hddg	Carga hidráulica na saída g do trecho em declive da linha de derivação (m);
Hddj	Carga hidráulica na saída j do trecho em declive da linha de derivação (m);
Hdaf	Carga hidráulica na última saída do trecho em aclave da linha de derivação (m);
Ho	Carga hidráulica no início da linha principal (m);
Ht	Altura manométrica total, em m;
Hu/Hsu	Altura de sucção (m);
Huo	Carga hidráulica na entrada da unidade operacional (m);
HV/Hv	Perda de carga na válvula (m);
Hw	Carga hidráulica na entrada da linha lateral média (m);
hfm	Perda de carga total por atrito na linha de derivação (m);
I1	Volume de água mensal disponível, no mês de janeiro (mm.ha);
I2	Volume de água mensal disponível, no mês de fevereiro (mm.ha);
I3	Volume de água mensal disponível, no mês de março (mm.ha);
I4	Volume de água mensal disponível, no mês de abril (mm.ha);
I5	Volume de água mensal disponível, no mês de maio (mm.ha);
I6	Volume de água mensal disponível, no mês de junho (mm.ha);
I7	Volume de água mensal disponível, no mês de julho (mm.ha);
I8	Volume de água mensal disponível, no mês de agosto (mm.ha);
I9	Volume de água mensal disponível, no mês de setembro (mm.ha);
I10	Volume de água mensal disponível, no mês de outubro (mm.ha);
I11	Volume de água mensal disponível, no mês de novembro (mm.ha);
I12	Volume de água mensal disponível, no mês de dezembro (mm.ha);

Id/DI	Número de dias de irrigação durante o ciclo da cultura;
Ih/HI/TD	Número de horas de irrigação por conjunto de unidades operacionais atuando simultaneamente, dentro de um turno de irrigação;
If/ IFR/FR	Turno de irrigação, em dias;
JDj,i	Gradiente de perda de carga (m.m^{-1}) no tubo de PVC com diâmetro i utilizado na seção j da linha de derivação;
JSk,r	Gradiente de perda de carga (m.m^{-1}) no tubo de PVC com diâmetro r utilizado na seção k da linha secundária;
JAk,r	Gradiente de perda de carga (m.m^{-1}) no tubo de PVC com diâmetro r utilizado na seção k da linha auxiliar;
JPk,v	Gradiente de perda de carga (m.m^{-1}) no tubo de PVC com diâmetro v utilizado na seção k da linha principal;
JP	Localização do ponto de inserção da linha secundária na linha de derivação, o qual confere o mesmo valor de carga hidráulica mínima nos trechos de aclave e declive. É expresso em fração do comprimento total da linha de derivação (trecho em aclave mais trecho em declive);
KI	Coeficiente da eq. 18, igual a 0,75 para linhas laterais com diâmetro único, 0,63 para linhas com dois diâmetros e 0,5 para linhas com 3 ou mais diâmetros;
Kd	Coeficiente da eq. 19, igual a 0,75 para linhas de derivação com diâmetro único, 0,63 para linhas com dois diâmetros e 0,5 para linhas com 3 ou mais diâmetros;
K	Número de trechos (distância entre as saídas adjacentes) na linha principal;
L	Comprimento da tubulação (m);
L/LL	Comprimento da linha lateral (m);
LDj,i	Comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro i na seção j da linha de derivação;
LDD	Comprimento do trecho em declive da linha de derivação, em m;
LDA	Comprimento do trecho em aclave da linha de derivação, em m;
LSk,r	Comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro r na seção k da linha secundária;
LAk,r	Comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro r na seção k da linha auxiliar;
LPk,v	Comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro v na seção k da linha principal;
Lx	Comprimento da área irrigada na direção x, em m;
Ly	Comprimento da área irrigada na direção y, em m;
NPE	Número de plantas por ha;

NBM/EF/ η	Rendimento do conjunto moto-bomba;
NE/Ne	Número de emissores por ponto de emissão;
NLL	Número de saídas na linha de derivação;
NLLA	Número de saídas no trecho em aclave da linha de derivação;
NLLD	Número de saídas no trecho em declive da linha de derivação;
Nl	Número de linhas laterais na unidade operacional;
Nm	Número de microaspersores na linha lateral;
Nml	Número de pontos de emissão na linha lateral;
N/Ns	Número de unidades operacionais;
NUOS/Nsu	Número de unidades simultâneas;
Pk	Comprimento da seção k da linha principal, em m;
P	Comprimento da linha principal (m);
Pj	Probabilidade de ocorrência da variável Xj;
P	Preço do produto agrícola em US\$.kg ⁻¹ ;
Pm	Preço do emissor (US\$.unidade ⁻¹);
PD _i	Preço do tubo de PVC com diâmetro i utilizado na linha de derivação (US\$.m ⁻¹);
PS _r	Preço do tubo de PVC com diâmetro r utilizado na linha secundária (US\$.m ⁻¹);
PA _r	Preço do tubo de PVC com diâmetro r utilizado na linha auxiliar (US\$.m ⁻¹);
PP _v	Preço do tubo de PVC com diâmetro v utilizado na linha principal (US\$.m ⁻¹);
Pv	Preço da válvula (US\$.unidade ⁻¹);
Q	Vazão (m ³ .s ⁻¹);
Q _{disp}	Vazão disponível (m ³ .s ⁻¹);
Q _l	Vazão na linha lateral, m ³ .s ⁻¹ ;
Q _{min}	Vazão mínima na unidade operacional, em m ³ .s ⁻¹ ;
Q _{da}	Vazão no trecho em aclave da linha de derivação, m ³ .s ⁻¹ ;
Q _{dd}	Vazão no trecho em declive da linha de derivação, m ³ .s ⁻¹ ;
Q _s	Vazão na linha secundária, m ³ .s ⁻¹ ;
Q _a	Vazão na linha auxiliar, m ³ .s ⁻¹ ;
Q _p	Vazão na linha principal, m ³ .s ⁻¹ ;
Q _{op}	Vazão da unidade operacional, m ³ .s ⁻¹ ;
QE/Q _w	Vazão média do emissor, em m ³ .s ⁻¹ ;

S	Comprimento da linha secundária (m);
Sl/EE	Distância entre linhas, em m;
Sm/EL	Distância entre pontos de emissão na linha lateral, em m;
Sk/LSk	Comprimento da linha secundária k, em m;
TLA	Comprimento total com linhas auxiliares, em m;
Tav/TD	Número máximo de horas por dia, disponíveis para irrigação;
TLL	Comprimento total com linhas laterais, em m;
TM	Número total de emissores;
TLP	Comprimento total com linhas principais, em m;
TLS	Comprimento total com linhas secundárias, em m;
TLD	Comprimento total com linhas de derivação, em m;
UE	Uniformidade de emissão (valor decimal);
Vs	Velocidade na tubulação da linha secundária, em $m.s^{-1}$;
Va	Velocidade na tubulação da linha auxiliar, em $m.s^{-1}$;
Vp	Velocidade na tubulação da linha principal, em $m.s^{-1}$;
VL	Perda de carga permitida na linha de derivação (m);
VV/CVR	Custo de válvulas e registros (US\$);
Xj	Variável aleatória discreta j;
W	Volume de água aplicado/lâmina aplicada, em mm;
Δd	Variação máxima admissível de carga hidráulica na linha de derivação para que se tenha a uniformidade de emissão desejada, em m;
ΔE_m	Diferença de nível (m) entre o início e o final da linha de derivação sendo positivo para a linha de derivação em aclave e negativo para a linha de derivação em declive;
ΔE_l	Diferença de nível (m) entre o início e o final da linha lateral, sendo positivo para laterais em aclave e negativo para as laterais em declive.

OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DO USO DA ÁGUA NO PERÍMETRO IRRIGADO TABULEIRO DE RUSSAS UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR E NÃO-LINEAR. Botucatu, 2016. 153p. (Doutorado em Agronomia: Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Autor: Wlisses Matos Maciel

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Cury Saad

RESUMO

Na atividade irrigada, a água é o insumo de maior importância, sendo essencial sua otimização. Nos últimos anos, modernas técnicas de gestão de recursos hídricos vêm sendo difundidas e aplicadas à alocação desses recursos, que são escassos e competitivos. O uso dessas técnicas em áreas irrigadas pode permitir o aumento da eficiência econômica dos investimentos e favorecer sua alocação de maneira mais eficaz no dimensionamento e operação da infraestrutura hídrica regional existente. Os modelos de Programação Linear (PL) e Não-Linear (PNL) tem se destacado dado o potencial de resolução e aplicabilidade dos modelos projetados. O objetivo do presente trabalho constituiu-se em desenvolver modelos de PL e PNL que otimizem o dimensionamento de sistemas de irrigação localizada, sob o enfoque da minimização do custo de implantação e operação do sistema de irrigação; e também modelos de PL e PNL para propor planos ótimos de cultivos, sob o enfoque da maximização da receita líquida das culturas irrigadas. Os modelos desenvolvidos foram aplicados no Perímetro de Irrigação Tabuleiro de Russas no Estado do Ceará, especificamente em áreas de agricultura familiar com 8,0 ha, indicando alternativas de culturas a serem implantadas e suas respectivas áreas, incorporando restrições de disponibilidade de área, água e mercado. Os valores otimizados dos custos de implantação e operação do Perímetro foram obtidos com o modelo de PL, com um custo de US\$ 1.588,06 ha⁻¹.ano⁻¹ e a maximização da receita líquida anual foi obtida com o modelo de PNL, com um valor total de US\$ 77.377,88, utilizando o seguinte padrão de cultivo: 4,0 ha de banana; 4,0 ha feijão verde *Vigna* 1 no primeiro semestre e 4,0 ha de feijão verde *Vigna* 2 no segundo semestre, para um volume mensal de irrigação de 20.534,40 m³.

Palavras-chave: Irrigação localizada; recursos hídricos; receita líquida; modelos matemáticos; planejamento.

ECONOMIC OPTIMIZATION OF THE USE OF WATER IN THE IRRIGATED PERIMETER BOARD OF RUSSIANS USING LINEAR AND NON-LINEAR PROGRAMMING. Botucatu, 2016. 153p. (Doutorado em Agronomia: Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Auhtor: Wlisses Matos Maciel

Adviser: Prof. Dr. João Carlos Cury Saad

ABSTRACT

In irrigated activity, water is the most important input, and its optimization is essential. In recent years, modern techniques of water resources management have been diffused and applied to the allocation of these resources, which are scarce and competitive. The use of these techniques in irrigated areas can increase the economic efficiency of investments and favor their allocation in a more efficient way in the design and operation of the existing regional water infrastructure. The Linear (PL) and Nonlinear Programming (NLP) models have been highlighted given the potential for resolution and applicability of the designed models. The objective of this work was to develop PL and NLP models that optimize the design of localized irrigation systems, under the focus of minimizing the cost of implantation and operation of the irrigation system; and also PL and NLP models to propose optimal crop plans under the maximization approach of net income from irrigated crops. The models developed were applied to the Table Irrigation Perimeter of Russas in the State of Ceará, specifically in areas of family farming with 8.0 ha, indicating alternatives of crops to be implanted and their respective areas, incorporating restrictions of availability of area, water and marketplace. The optimized values of Perimeter deployment and operation costs were obtained with the PL model, with a cost of US \$ 1,588.06 ha⁻¹.yr⁻¹ and the maximization of annual net revenue was obtained with the NLP model of US\$ 77,377.88, using the following crop standard: 4.0 ha of banana; 4.0 ha *Vigna* 1 green beans in the first semester and 4.0 ha *Vigna* 2 green beans in the second semester, applied with a monthly irrigation volume of 20,534.40 m³.

Keywords: drip irrigation; water resources, net revenue, mathematical modeling, planning.

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos, a água é um bem de domínio público, de natureza limitada e dotado de valor econômico. Como a disponibilidade hídrica no Nordeste Brasileiro, a água sempre foi uma preocupação para a sociedade civil e os órgãos públicos. Neste contexto, a gestão deve visar a preservação dos múltiplos usos das águas e deve se dar de forma integrada, descentralizada, participativa e articulada entre os diversos órgãos gestores, assegurando assim, condições adequadas de fornecimento de água em quantidade e qualidade para as atuais e futuras gerações (ANA, 2014).

De modo geral, pode-se afirmar que a alocação de água se configura como uma ferramenta de gerenciamento do plano de recursos hídricos, em que o objetivo é o de racionalizar o equilíbrio entre ofertas hídricas e os múltiplos usos atuais e futuros. Assim, a alocação negociada é um grande mecanismo de repartição de água em uma bacia hidrográfica e disponibiliza informações para a formação e implantação de inúmeros instrumentos de gestão.

Nas bacias hidrográficas do semi-árido do Nordeste Brasileiro, onde o recurso hídrico é escasso, a otimização do uso da água é um desafio para os gerenciadores, pois o planejamento da irrigação requer cuidados especiais a fim de compatibilizar o balanço hídrico com a demanda, tanto no que se refere à quantidade como a sua repartição espacial e temporal. O uso dessa água deverá enfocar sua alocação entre as necessidades de consumo

de diversas culturas, sendo a produção determinada pelo grau com que se pode atender as necessidades hídricas totais, mediante o suprimento de água disponível (FRIZZONE, 1996).

Os modelos matemáticos são ferramentas úteis por apresentar ótimas estratégias de irrigação que podem ser usadas pelos agricultores visando melhor utilizar este recurso escasso (MATANGA e MARIANO, 1979). O desenvolvimento de modelos matemáticos para gerenciar projetos de irrigação tem recebido a atenção de muitos pesquisadores. Moore (1961) identificou uma forma otimizada de distribuição de água em projeto de irrigação visando à obtenção de produtividade econômica. A Programação Linear (PL) é apropriada para problemas complexos de alocação que podem ser resolvidas satisfatoriamente com técnicas analíticas convencionais (HILLIER e LIEBERMAN, 1988; BERNARDO et al., 1988).

A implantação de um sistema de irrigação localizada, assim como nos demais métodos, envolve a escolha da configuração do equipamento no campo, a definição das condições de operação e dimensionamento de seus componentes. Embora complexa a definição de todos os aspectos, é possível desenvolver modelos de Programação Não-Linear (PNL) que realizem tal processo de forma eficiente, auxiliando o projetista na escolha da melhor solução. Em áreas irrigadas, onde diversas culturas estão competindo por uma quantidade limitada de água, uma maneira de escolher a alocação ótima desses recursos é utilização de modelos de PNL, que podem ser solucionadas utilizando programas computacionais comerciais disponíveis.

A evolução da agricultura irrigada no Projeto de Irrigação Tabuleiro de Russas implica na busca da sustentabilidade econômica e ambiental, garantindo a continuidade do processo produtivo no desenvolvimento regional, gerando emprego e renda.

Esta tese teve como hipóteses: i) modelos de PNL são mais eficientes na otimização de sistemas de irrigação localizada do que os modelos de PL; ii) otimizar visando a maximização da receita líquida gerada pela adoção da combinação de culturas exploradas em áreas de pequenos produtores.

O objetivo geral desta tese foi:

Avaliar o uso da PL e PNL para otimização do uso da água no Perímetro Irrigado Tabuleiro de Russas – CE, com o enfoque de minimização dos custos e maximização da receita líquida.

Os objetivos específicos foram:

Desenvolver modelos de PL e PNL visando definir a configuração, o dimensionamento e a operação ótima dos sistemas de irrigação localizada por microaspersão, sob o enfoque de minimização de custos de implantação e operação;

Desenvolver modelos de PL e PNL visando definir a combinação de culturas adotadas em uma área de irrigação, sob o enfoque de maximização da receita líquida;

Promover a aplicação dos modelos de PL e PNL e propor alternativas às culturas e respectivas áreas no Perímetro Irrigado Tabuleiro de Russas, em área de pequenos produtores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agricultura irrigada

A irrigação é uma prática agrícola de fornecimento de água às culturas, onde e quando as dotações pluviométricas, ou qualquer outra forma natural de abastecimento, não são suficientes para suprir as necessidades hídricas das plantas (GOMES, 1999). Essa prática tem sido amplamente utilizada para combater a escassez de água, fornecendo assim água durante períodos secos. De acordo com Mantovani; Bernardo; Palaretti (2009), a agricultura irrigada tem sido uma estratégia importante para otimizar a produção global de alimentos, gerando desenvolvimento sustentável no campo, gerando empregos e renda.

No Nordeste do Brasil, onde a maioria dos sistemas de irrigação em operação não foi implementada com base em um projeto adequado, segundo Telles (1999), o uso perdulário da água na agricultura se agrava em razão de que não é ainda feita, de forma ampla, a cobrança pela utilização de recursos hídricos. Para regiões com deficiências hídricas, como é o caso do Nordeste, o combate às causas de desperdício, a utilização de métodos de menor consumo e de inovações tecnológicas, associadas à cobrança pela utilização da água, permitirão a racionalização do seu uso na agricultura e reduções consideráveis em seu consumo. A necessidade de incremento na eficiência do uso de água está claramente definida pela crise alimentar e pela escassez dos recursos hídricos (DANTAS NETO e FARIAS, 2013 e MONTEIRO 2014).

O objetivo econômico de uma empresa agrícola é obter altos níveis de produtividade com eficiência e rentabilidade, para isso deve-se utilizar de forma racional os recursos disponíveis. Na agricultura irrigada se tem a água como o principal recurso sobre o qual se tem maior interesse em implementar o controle na disponibilidade espacial e temporal, atendendo assim a demanda hídrica das culturas (FRIZZONE, 1993).

Segundo Andrade (2006) um planejamento que busca ajustar padrões de cultivo à disponibilidade de água pode melhorar o rendimento sócio-econômico-ambiental dos perímetros irrigados. Este planejamento, usualmente, pode-se valer da utilização de técnicas de otimização (via técnicas de PL, PNL e Programação Dinâmica – PD) visando, em geral, maximizar a receita líquida advinda da produção agrícola irrigada. O melhoramento da eficiência do uso da água nos perímetros irrigados requer, normalmente, que os seguintes fatores sejam satisfeitos: minimização da degradação do solo através de processos de rotação de culturas, preparo do solo e “*lay-out*” do sistema de drenagem apropriados (BOLLER et al., 1996, MELO e BRAGA Jr., 1996); adaptação da água disponível às necessidades das culturas a serem plantadas e, cuja escolha, venham a maximizar os benefícios econômicos - inclusive com plantações na entressafra (FRIZZONE, 1995; DANTAS NETO et al., 1996; CURI et al., 1997, ANDRADE, 2002); minimização do custo operacional e de instalação do sistema de irrigação - escolha das tubulações e estações de bombeamento, localização dos pontos de tomada d'água, etc. (CURI e GOMES, 1996; ZOCOLER, 2004); escolha do tipo de irrigação (aspersão, gotejamento e de superfície) que se adapte melhor as condições do terreno, disponibilidade de água e tipo e “*lay-out*” das culturas, minimizando os gastos com o sistema; escolha do tipo de plantações a serem utilizadas no perímetro irrigado visando maior lucro (FRIZZONE e SAAD, 1996; CURI et al., 1997; BARBOSA, et al., 2001; SAAD, 2002).

As restrições, geralmente, são dadas por limitações físicas (operacional, geométrica e hidráulica), como por exemplo: disponibilidade de água e área de plantio; qualidade da água, pressões e vazões mínimas; tipo de terreno para plantio; limitações quanto à capacidade das tubulações, estações de bombeamento e geradores de energia elétrica, limitações de ordem política e social (conflitos pelo uso da água, etc.); quantidade de água máxima e mínima suportada pelas plantações, etc.

2.2 Gestão de recursos hídricos

Nas últimas décadas, o conceito de gestão tem passado por um processo global de modernização que se intensificou, principalmente, a partir da discussão e lançamento, em fóruns internacionais, e de princípios delineadores do novo paradigma que é a gestão integrada em bacias hidrográficas (ANDRADE, 2006).

A expansão da industrialização, da urbanização e da agricultura irrigada a partir da segunda metade do século XX vem promovendo um aumento da poluição e da demanda de água no País, afetando sua disponibilidade em termos qualitativos e quantitativos e tornando patente a necessidade de maior controle no uso dos recursos ambientais, de uma maneira geral, e dos recursos hídricos, em especial. Nas décadas de 70 e 80 os paradigmas utilizados na gestão de recursos hídricos aplicava mecanismos de comando e controle e a partir dos anos 1990 a instrumentos de negociação.

A escassez de água pode ser considerada como fator de conflitos e isso se torna ainda mais problemático em regiões que tem como característica a ocorrência de estiagens, como é o caso do Semiárido Brasileiro. É nesse sentido que a gestão de recursos hídricos se torna fundamental para possibilitar a acessibilidade a esse bem escasso. Segundo Vieira (2003), “A crescente demanda de água e a multiplicidade de seus usos têm provocado, em toda parte, crises de escassez, conflitos de interesses, competição institucional, perturbações sociais e até obstáculos ao crescimento econômico e a preservação ambiental”.

Os conflitos em recursos hídricos, de maneira geral, têm como fonte a escassez quantitativa e qualitativa desses recursos (HOMER-DIXON, 1994; BACHLER et al., 1996; OHLSSON, 1999), impedido a sua alocação equitativa e o atendimento dos diversos usos (WOLF, 1999).

Segundo Andrade (2006), a gestão dos recursos hídricos é a forma pela qual se pretende equacionar e resolver as questões de escassez relativa dos recursos hídricos, realizando-se mediante procedimentos integrados de planejamento e administração (gerenciamento). No planejamento, desenvolvem-se estudos prospectivos visando à adequação do seu uso, controle e grau de proteção desejados pela sociedade, procurando-se alocar a água entre usos múltiplos de forma a obter os máximos benefícios econômicos, sociais e ambientais. Já na administração (gerenciamento), exercita-se um conjunto de ações destinadas à efetivação do planejamento, que são amparadas em devidos suportes técnicos,

jurídicos e administrativos, permitindo ajustes da oferta (gerenciamento da oferta) e da demanda (uso racional) de água, e a adequação de objetivos e metas a novas conjunturas.

2.3 Legislação em Recursos Hídricos

A Constituição Federal estatui que são públicas todas as águas no território nacional e divide o domínio delas entre a União e Estados-membros, nos termos dos artigos 20, III, e 26, I, respectivamente. Obedecendo o disposto no art. 21 XIX, e seguindo a indicativa de alguns Estados, foi promulgada, em 08 de janeiro de 1997, a Lei nº 9.433, conhecida como a “Lei da Águas”, que instituiu a Política Nacional do Recurso Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGREH).

Baseada no modelo Francês, ela representou uma quebra de paradigma na gestão de recursos hídricos no País, ao colocar no papel como entes centrais os Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH). Por meio deles, as três principais partes interessadas – poder público, usuários e comunidades – buscam soluções conjuntas de melhorias da qualidade e quantidade da água na respectiva bacia hidrográfica.

No Ceará, a Política Estadual de Recurso Hídricos, anterior à Nacional, estabelecida pela Lei nº 11.996/92, é fundamentada também no gerenciamento integrado, participativo e descentralizado. Os Comitês de Bacias Hidrográficas, instituídos, tanto pela legislação federal, Lei nº 9.433/97 - Brasil, como estadual, Lei nº 11.996/92 - Ceará, constituem os fóruns que promovem a descentralização do gerenciamento, permitindo a interferência de representantes dos diversos segmentos da sociedade. Têm poder consultivo e deliberativo, sendo a instância mais importante de participação e integração do planejamento e das ações relacionadas aos recursos hídricos.

O processo de apoio à organização dos usuários no Ceará é desenvolvido levando em consideração três níveis de atuação (Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará – COGERH, 1998). A COGERH, criada em 1993, é a instituição responsável pela implementação (operação) do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos que, entre outras atribuições, consta o apoio à formação e ao funcionamento dos comitês de bacia.

Exigências legais e instrumentos de gestão, como a outorga de direito de uso água, fomentam o aumento da eficiência e a consequente redução do desperdício (ANA, 2014).

2.4 Alocação de recursos hídricos

Para Tundisi (2011), o gerenciamento de recursos hídricos implica em uma série de ações a partir de uma bacia hidrográfica como referência, contemplando estratégia de planejamento, participação dos usuários, organização institucional e implantação de tecnologias diferenciadas, avançadas e de baixo custo.

O planejamento é uma forma de conciliar recursos escassos e necessidade abundantes. Em recursos hídricos, o planejamento pode ser definido como o conjunto de procedimentos organizados que visa o atendimento das demandas de água, considerando a disponibilidade restrita desse recurso (BARTH, 1987). Segundo Paz et al. (2000), o planejamento dos recursos hídricos é indispensável no sentido de compatibilizar os múltiplos usos da água, viabilizando os distintos setores produtivos, supervisionando a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos, melhorando os níveis de eficiência global de uso.

Segundo Dinar et al. (2002), existem critérios para atingir uma ótima distribuição na alocação de recursos escassos, que são: elasticidade na alocação da água; garantia aos diversos usuários; custo de oportunidade real e justo; transparência; igualdade; e anuência política e pública nos resultados do processo de alocação.

Os mecanismos de alocação de água são fundamentados no custo marginal, instituição pública, mercado de água e usuários. Cada mecanismo tem suas vantagens e desvantagens, sendo que os considerados eficientes são difíceis de serem implantados e requerem complexas estruturas institucionais e elevados custos de comando e controle. Sendo adotados na prática por muitos países a combinação desses mecanismos de alocação de água (TSUR e DINAR, 1997).

A água é alocada em base volumétrica ou de vazão de acordo com a necessidade de uma gleba de terra. Ford et al. (2001) relatam que o direito ao uso da água em muitos países está relacionado a uma dada área de terra. Mariano e Kemper (1999)

comparam experiências de sucesso de alocação de água no Brasil, Espanha e Estado Unidos, e apontam as seguintes causas: gestão compartilhada com transparência e credibilidade entre os membros; direitos de uso da água bem definidos e mensuráveis.

Já no Brasil, nos Estados de Minas Gerais e Bahia, um sistema de alocação de água foi testado com êxito na sub-bacia do Rio Verde Grande, tendo como base a negociação compartilhada com todos os usuários do montante de água disponível e emissão das outorgas de direito de uso da água (FREITAS, 2003).

No Estado do Ceará, com a implantação da Política Estadual de Recursos Hídricos houve significativos avanços nos processos de alocação negociada de águas que ocorre com a participação da sociedade local nos setores usuários e do poder público. Esses processos foram desenvolvidos em corpos de água particularmente, em açudes onde as demandas hídricas superavam as disponibilidades hídricas (FREITAS e VASCONCELOS, 1998; SOUZA FILHO e PORTO, 2003; GONÇALVES et al., 2003).

O processo de organização de usuários no Estado do Ceará configura-se como importante etapa na política de recursos hídricos, bem como a implementação da cobrança pelo uso da água. Segundo Garjulli et al. (1995), essa cobrança ocorre nos setores industrial e de saneamento, para o custeio da operação e manutenção da infraestrutura hídrica e no setor agrícola de forma educativa.

2.5 Otimização de recursos hídricos

Em planejamento e gerenciamento de sistemas de recursos hídricos, o tipo de problema que exige uma resposta à pergunta “como escolher a alternativa ótima que maximize um índice de eficiência?” encontra solução no uso de modelos de otimização. Estes modelos são representados por um algoritmo formal que é usado para calcular um conjunto de valores para as variáveis de decisão (variáveis que estão sobre o controle do tomador de decisão e que têm influência na solução do problema de otimização) que maximizam ou minimizam uma dada função objetivo (FO - que é função matemática), sujeita às restrições (representa as limitações dos recursos disponíveis ou exigências sobre as variáveis), as quais podem ou não ser funções lineares das variáveis de decisão.

A função objetivo de um problema de otimização representa uma forma de valoração do nível de desempenho obtido por mudanças específicas em um conjunto de variáveis de decisão, as quais definem como um sistema está para ser operado (SIMONOVIC, 1992). Aspectos diversos podem ser inseridos na definição de uma função objetivo, por exemplo: custos e prejuízos; lucros, benefícios diretos e indiretos; indicadores econômicos e de desenvolvimento; funções estritamente matemáticas (erros e desvios, calibração de parâmetros de modelos); indicadores sociais.

Em geral, um modelo de otimização para análise de sistemas de recursos hídricos é representado matematicamente por (LANZER, 1988; HILLIER e LIEBERMAN, 1988):

$$Max (ou Min) F(X) \quad (1)$$

Submetido a:

$$g_i(X) = b_i, (i = 1, \dots, m) \quad (2)$$

em que $F(X)$ é a função-objetivo (FO), função esta que deve ser otimizada (maximizada ou minimizada); X é o vetor de variáveis de decisão; e $g_i(X) = b_i$ são equações que representam as restrições na operação do sistema, sendo b_i parâmetros do modelo.

2.6 Técnicas de análises de sistemas utilizados em recursos hídricos

As bases da análise de sistemas de recursos hídricos estão assentadas na técnica da pesquisa operacional, introduzida pelos Estados Unidos durante a Segunda Guerra Mundial. De acordo com Braga (1987), deve-se ao “*Havard Water Program*”, em 1960, a ação pioneira de inserir este tipo de abordagem em planejamento e gestão dos recursos hídricos. A análise de sistemas consiste em decompor qualquer problema de planejamento e operação de sistemas de recursos hídricos em cinco passos: definição dos objetivos; formulação de medidas quantitativas dos objetivos; geração de alternativas de solução; quantificação das alternativas; e seleção da alternativa ótima.

Uma das principais áreas de aplicação dos modelos de análise de sistemas de recursos hídricos é no planejamento e na operação de sistemas de reservatórios (LIMA e LANNA, 2005). Lanna (1997) considera que são dois os grandes propósitos da análise de sistemas de recursos hídricos, a saber: (i) simular o comportamento da realidade do meio que se deseja representar e estudar, e (ii) otimizar os processos decisórios que atuam sobre a realidade. Estes propósitos dão margem à utilização de duas técnicas mais usuais na análise de sistemas de recursos hídricos, como sejam a simulação e a otimização.

2.6.1 Simulação

A simulação é uma técnica de modelagem usada para aproximar o comportamento espacial ou temporal de um sistema em um computador, representando as suas principais características por meio de descrições algébricas ou matemáticas (MAASS et al., 1962). Para Wurbs (1993) a técnica de simulação tenta representar um meio físico e prever sua atuação em um determinado conjunto de condições, através de formulações matemáticas, não manifestando exigência quanto à natureza do problema.

Os modelos de simulação são classificados em: modelos físicos, modelos analógicos e modelos matemáticos (analítico ou numérico), definindo-se estes últimos como aqueles em que o sistema físico é representado por um conjunto de expressões, compostas de variáveis e parâmetros, que são resolvidas, regra geral, com a utilização de computadores, sendo por isso cada vez mais utilizados (HALL e DRACUP, 1970). A sua principal desvantagem está na discretização de processos contínuos e na dificuldade de representação matemática de alguns processos físicos. A Figura 1 representa uma configuração de um modelo de simulação, com indicação da participação de um ente no processo – o tomador de decisão, o qual pode ser uma pessoa ou organização, com poderes de analisar, escolher, rejeitar e decidir pela seleção da melhor entre as várias alternativas obtidas pela simulação.

Os modelos de simulação são fáceis de entender e, por esta razão, são amplamente aceitos por altos níveis gerenciais, geralmente constituídos por não especialistas e até mesmo por leigos, sendo, com certeza, a classe de modelos mais amplamente utilizada na análise de sistemas de recursos hídricos. Entretanto, a incapacidade de encontrar os valores das variáveis de decisão, constitui-se uma limitação na otimização

dos critérios formulados pelos usuários dos modelos de simulação. O usuário que desejar encontrar valores ótimos para as variáveis de decisão utilizando um modelo de simulação é obrigado a recorrer aos chamados métodos de força bruta (processos de tentativa e erro), que se baseiam no processamento repetitivo do modelo, de tal forma a exaurir a faixa de valores possíveis das variáveis de decisão. Mesmo assim não se pode garantir que os valores ótimos tenham sido encontrados (ROBERTO e PORTO, 1999).

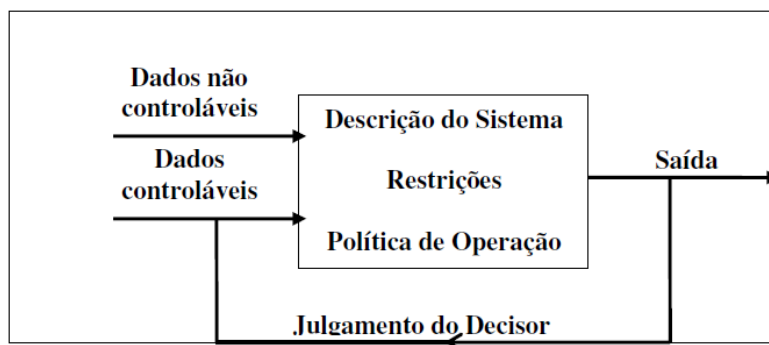


Figura 1 - Configuração de um modelo de simulação.

Fonte: PORTO e AZEVEDO, 1997.

Existem dois tipos básicos de modelos de simulação em recursos hídricos: o primeiro diz respeito à simulação dos processos hidrológicos (exemplo os de transformação de chuva em vazão) e de qualidade da água, onde equações diferenciais e relações empíricas são utilizadas para representação de vários aspectos quantitativos e qualitativos do ciclo hidrológico; o segundo tipo de modelo de simulação é referido aos aspectos de dimensionamento e operação de sistemas de recursos hídricos (BRAGA Jr, 1987; LABADIE, 1998).

2.6.2 Otimização

Otimizar a regra operativa de um reservatório significa, segundo Barros (1997), definir a descarga operada ótima, para um certo intervalo de tempo, que maximiza (ou minimiza) uma função objetivo e que atende a diversas restrições preestabelecidas, tornando-se um processo bastante complexo quando são considerados fatores como múltiplos reservatórios, múltiplos objetivos, elevado número de restrições e a aleatoriedade dos dados hidrológicos. Loucks et al. (1981) advertem, entretanto, que por melhor que seja a representação matemática, esta será uma aproximação do mundo real, e a

solução ótima obtida pelo modelo é, portanto, ótima somente em relação à definição em particular.

Segundo Andrade (2006), em uma revisão sobre o assunto, o autor destaca diversos tipos de modelagem para análise de sistemas de reservatórios, dando maior ênfase às técnicas de otimização como a PL, a PD e suas variações (PD estocástica, PD incremental com aproximações sucessivas, PD probabilística), e ainda a PNL. Yeh (1985) e Labadie (2004), afirmam que a PL tem como vantagens: (i) a habilidade para se ajustar e resolver problemas de grandes dimensões; (ii) atinge valores ótimos globais; (iii) a não necessidade de uma política inicial de operação dos reservatórios; (iv) a existência de modelos computacionais prontos para resolução de problemas.

2.7 Programação linear

A PL tem sido amplamente utilizada na prática. Muitas situações práticas podem ser representadas por modelos desse tipo; também é comum encontrarmos esses modelos representando subproblemas de casos mais complexos. Embora tais modelos já tivessem sido propostos há mais tempo, o ano 1947 foi um marco na área de otimização, quando o método Simplex foi publicado, seguindo-se intensas pesquisas de novos métodos e implantações eficientes e aplicações em diversas áreas, tais como agricultura, planejamento de produção industrial, logística, telecomunicações, finanças e muitas outras. Outro marco importante ocorreu em 1984, com a publicação de um método de Pontos Inteiros, do qual também surgiram-se intensas pesquisas. Os métodos do tipo simplex e do tipo pontos inteiros são, atualmente, as principais ferramentas computacionais para a resolução de problemas de otimização linear.

A primeira aplicação da PL em problemas de operação determinística de reservatório foi feita em data anterior ao ano de 1962, sendo usada para um problema simplificado de redes de distribuição de água (DORFMAN, 1962; SIMONOVIC, 1992; ALMEIDA, 2001). Segundo Saad (2002) a PL é a técnica de Pesquisa Operacional mais utilizada nos problemas de otimização, dada a sua versatilidade e o fato de aplicar fundamentos matemáticos pouco sofisticados, ou seja, a análise e resolução de sistemas de equações lineares (LANZER, 1988). A teoria da PL pode ser encontrada em textos de pesquisa operacional tais como Wagner (1970) e Luenberger (1973) e Braga Jr.

(1987), citados por Lima e Lanna (2005) e Fang et al (2011).

A PL pode auxiliar na tomada de decisões em diversas áreas, como na agricultura (MAINIÉ,1969). Valencia (1975) desenvolveu um modelo de PL para o planejamento da operação de um Distrito de Irrigação São Domingos, Baixa Califórnia no México. Autran (1978) fez o planejamento no Perímetro Irrigado de Morada Nova – CE, no Brasil, através da PL e Matanga e Mariño (1979) otimizaram a irrigação de três culturas, em Davis na Califórnia, nos Estados Unidos.

Modelos de PL visando a otimização de rede hidráulica de sistemas de irrigação fixos pressurizados (aspersão, microaspersão e gotejamento), tem como objetivo a minimização do custo da tubulação e acessórios, foram apresentados por Oron e Karmeli (1981); Bermani e Ofen (1984) e Saad (2002).

Saad et al. (1994) utilizando modelos de PL para irrigação por gotejamento em um pomar de citros, demonstraram que o dimensionamento da rede hidráulica pode ser modificado quando se considera o custo da energia consumida na operação do sistema.

Pesquisadores desenvolveram um modelo de PL separável, para estudar a alocação de água de irrigação no Projeto Senador Nilo Coelho, localizado em Petrolina – PE, com o objetivo de maximizar a receita líquida. Assumiu-se que as funções de produção água-cultura disponíveis representavam adequadamente as relações água-produção. Tais funções, não lineares, foram incorporadas ao modelo de PL, que considera um conjunto de fatores técnicos que influenciam a rentabilidade do projeto de irrigação. As funções não lineares foram aproximadas por funções lineares por partes, possibilitando a utilização do método Simplex para a solução. Explicitaram-se restrições na disponibilidade de água, de área e de mercado (FRIZZONE et al.,1997).

Muitos pesquisadores têm se voltado para esse tema, considerando a aplicaram a técnica de PL para a maximização da receita líquida em diversos projetos e perímetros irrigados como: Acer (1990) em Guairá, SP; Dantas Neto et al (1997) no Senador Nilo Coelho, PE; Rodrigues et al (2000) em Morada Nova, CE; Carvalho et al (2000) no Gortuba, MG; Curi et al (2005) no semi-árido, PB; Santos et al (2009) no Baixo Acaraú, CE; Tavares et al (2011) no Agreste, PE; Delgado et al (2012) no Campos dos Goytacazes, RJ.

Saad e Mariño (2002) desenvolveram um modelo de PL para dimensionamento do sistema de irrigação localizada em área de declividade elevada. Uma vez que as linhas de derivação estão na direção da declividade, elas são dispostas em declive e dimensionadas com um ou mais diâmetros a fim de manter a variação de carga hidráulica entre duas linhas laterais quaisquer dentro do limite de variação que asseguram a uniformidade de emissão desejada.

Na minimização dos custos em projetos de irrigação (rede hidráulica) o uso da PL apresenta vantagens, dentre os quais se destacam: trabalhar com variável discreta (diâmetros comerciais); relatórios detalhados com diversos dados para suporte de decisões (análise de sensibilidade); e a simplicidade na utilização de programas computacionais específicos para resolução de equações lineares. Segundo Saad (2002) “a solução ótima, quando existente, é sempre um ótimo global, ou seja, dentro do universo de possibilidades previstas pelo modelo, não há solução melhor do que aquela fornecida”.

O desenvolvimento de modelos matemáticos para gerar programas de otimização para a agricultura tem recebido a atenção de muitos pesquisadores (CRISTANCHO, 1965; MAGALHÃES, 1971, WU e LIANG, 1972, ARAÚJO, 1972; PANAGIDES, 1973; BALARINE, 1975; HUANG et al., 1975; SUGAI, 1976; TRAVA et al., 1977; TSAKIRIS e KIOUNTOUZIS, 1982; YARON e BRESSLER, 1983; HATCH et al., 1985; TSAI et al., 1987; BERNEDINI, 1988; BOMAN et al., 1989; MANNOCHI e MECARELLI, 1994; FRIZZONE, 1996; MAINUDDIN et al., 1997; BORGES JÚNIOR et al, 2008; LIMA et al, 2008; SCHONWALD et al, 2008; CARVALHO et al, 2009; MARQUES et al, 2009; SCHARDOG et al, 2009; CABRAL et al, 2011, SANTOS JONIOR, 2011).

2.8 Programação Não-Linear

A PNL é considerada por Chiang (1982) como um processo em relação ao contexto da otimização clássica, uma vez que as restrições podem entrar no problema na forma de desigualdade e, assim, faz-se explicitamente a introdução das condições de não-negatividade no mesmo. Entretanto a necessidade de confirmar a função-objetivo e as restrições ao modelo linear pode, às vezes, ser uma limitação significativa. Desta forma, um progresso adicional seria a estrutura de otimização que pudesse trabalhar

com funções-objetivo e restrições em forma de desigualdades não lineares, sendo que tal estrutura é encontrada na PNL (SAAD, 1993; MATOS, 2000; SAAD, 2002).

Importantes contribuições sobre modelos de PNL e suas aplicações em sistemas de recursos hídricos são apresentadas nos trabalhos de Yeh (1985), Simonovic (1992), Wurbs (1993), Labadie (2004) e Lima e Lanna (2005).

Pesquisas com sistemas fixos de irrigação pressurizada, utilizaram PNL, o qual foi solucionado pela programação geométrica e, também pela técnica do “*Branch and Bound*”, na minimização do custo de sistemas de irrigação pressurizada (KARMELI e ORON, 1979; ORON e WALKER, 1981).

Um modelo não-linear foi apresentado por Holzapfel et al. (1990) para otimização do dimensionamento e operação de sistemas de irrigação por gotejamento, aplicáveis a áreas planas. A função-objetivo era de maximização da receita líquida, tendo utilizado uma função para o fator água para associar a produtividade e, conseqüentemente, a receita bruta, à lâmina de irrigação.

Saad e Frizzone (1996) utilizando o modelo proposto por Holzapfel et al. (1990) para desenvolver um modelo de PNL para maximização da receita líquida de culturas irrigadas por sistemas de irrigação localizada, aplicáveis a áreas regulares com declividade uniforme e que considerasse o critério de uniformidade de emissão da unidade operacional. Tal modelo mostrou-se adequado quando utilizado na determinação da configuração, dimensionamento e operação de sistemas de irrigação em pomares irrigados, na região de Limeira em São Paulo.

A PNL pode ser classificada quanto aos métodos utilizados na solução dos problemas em: (i) técnicas analíticas - as soluções ótimas são obtidas pela resolução de sistemas de equações, com apoio de derivadas, podendo a otimização ser reduzida à procura das raízes desses sistemas, e (ii) técnicas de busca numérica - usam informações passadas em um processo iterativo, para gerar melhores soluções no processo de otimização, e permitem ainda o emprego de métodos numéricos para resolver problemas dos quais não se conhece solução analítica (CIRILO, 1997).

Curi et al. (1997) usaram PNL para estudar a alocação ótima da água do reservatório Engenheiro Arcoverde, localizado na zona sertão do Estado da Paraíba, para

fins de irrigação.

Os modelos de PNL podem ser resolvidos utilizando programas computacionais já desenvolvidos e disponíveis no mercado (GIL et al., 1981). Com a utilização destes modelos, a otimização dos sistemas de irrigação passou a abranger, também, a escolha da melhor configuração do equipamento na área a ser irrigada, bem como a melhor condição operacional (MATOS, 2000).

A PNL caracteriza-se por não possuir um método geral de resolução dos seus problemas, tal qual o método Simplex na programação linear (SANTOS JUNIOR, 2011). Os modelos são lentos e exigem grande capacidade de armazenamento de dados (YEH, 1985). Segundo Labadie (2004), muitos dos problemas de otimização de sistemas de reservatórios não podem ser modelados, realisticamente, usando-se o artifício da linearização, devendo ser tratados como problemas de PL.

Segundo Melo, (2004), a complexidade da PNL aumenta consideravelmente quando comparada à PL, por se tratar de um caso mais genérico que representa mais fielmente os processos analisados.

Monteiro (2014) e Carvalho et al (1998) desenvolveram modelos de PNL para a determinação de um padrão de cultivo ótimo para a agricultura irrigada. Os resultados mostraram que alterações de preços, custo da água e disponibilidade de terra tem um grande impacto nos padrões de cultivos e no lucro. Sinha et al (1999), criaram um modelo de PNL para estudo de sistemas de reservatórios com múltiplas finalidades, concluindo que o modelo levou a uma diminuição no armazenamento de água do sistema e no custo.

2.9 Custos na agricultura irrigada

Na agricultura irrigada a constante concorrência e a competitividade tem exigido cada vez mais um diferencial, o preço é um dos fatores de maior impacto no mercado. Sendo importante a análise de custos para a obtenção de um preço de venda mais competitivo e capaz de gerar maior rentabilidade. O cálculo do custo de produção e a análise econômica do projeto de irrigação geram informações que auxiliam o produtor a tomar decisão na escolha da cultura, como também na otimização do sistema adotado (MAGALHÃES et al., 2005; ZOCOLER et al., 2004).

Martins (2003) define custos como os gastos relativos a bens e serviços utilizados na produção de outros bens. Sendo reconhecidos no momento da utilização dos fatores de produção, necessários a fabricação de um produto ou a execução de um serviço. Já para Padoveze (2006) custos são definidos como sendo a mensuração econômica dos recursos (produtos, serviços e direitos) adquiridos para a obtenção e a venda dos produtos e serviços.

Segundo Hoffman et al. (1976), custos correspondem à compensação dos fatores de produção utilizados por uma firma para produzir determinado bem.

Já para Maher (2001) os custos e serviços representam um sacrifício de recursos. Esse gasto representa a medida do sacrifício necessário para adquirir um bem ou serviço, independentemente de ser pago imediatamente ou no futuro.

Os custos são importantes para determinar a rentabilidade na agricultura o que permite avaliar o sistema de produção adotado. Para Richetti (2007), esse custo constitui elemento essencial nas ações gerenciais e administrativas na busca de padrões de qualidade e obtenção de lucro, sendo parâmetro importante para auxiliar a tomada de decisão.

Para Ojima et al. (2007), os custos são ferramentas importantes nas mudanças das margens de lucro causadas pelo aumento da competitividade, exige maior eficiência do sistema produtivo e redução dos gastos utilizados. Na avaliação de um empreendimento visando ampliar, reduzir ou adotar outras práticas, necessita da elaboração de planilhas de custos e análise de preços de mercado (MENEGATTI, 2006).

Em projetos de irrigação é muito importante a análise econômica, em que a água é um dos principais insumos e muitas vezes por ser escassa, pode apresentar-se como um fator limitante nos projetos. Para Zocoler et al. (1999) o investimento inicial é fator decisivo na avaliação dos custos variáveis do sistema de irrigação e o tempo na análise dos custos fixos. Os custos e benefícios de um projeto de irrigação derivam das obras e das atividades conduzidas ao longo da sua vida útil, isto é, no período de tempo em que o projeto serve a um determinado objetivo.

Os custos medem o uso dos recursos e existem muitas maneiras de

classificá-los, tendo cada uma sua finalidade. Em projetos de irrigação eles podem ser divididos em duas grandes categorias: custos fixos e custos variáveis. Os custos fixos correspondem os investimentos para materializar o projeto e os custos variáveis ou anuais são aqueles que ocorrerão ao longo do projeto e dependem, principalmente, do número de horas de operação do sistema por ano.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área

O Perímetro Irrigado Tabuleiro de Russas está localizado nos municípios de Russas, Limoeiro do Norte e Morada Nova a 160 km de Fortaleza – CE, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude Sul 5° 37' 20", longitude Oeste 38° 07'08", com altitude de 82 metros.

A área do Perímetro está situada no Baixo Vale do Jaguaribe na Zona de Transição Norte do Tabuleiros de Russas. Essa área consiste de uma faixa contínua de terras agricultáveis ao longo da margem esquerda do Rio Jaguaribe, entre a confluência do Rio Banabuiú e a cidade de Russas. A Rodovia BR-116 margeia o limite leste do Projeto, paralela ao Rio Jaguaribe, e consiste no principal acesso à área.

O clima da região, segundo a classificação de Koeppen é do tipo Bsh, caracterizando-se como seco e muito quente. A precipitação média é de 720 mm, distribuída irregularmente ao longo do ano. A umidade relativa média do ar e a temperatura média mensal são, respectivamente, de 60% e 27° C. A demanda evaporativa é de 2900 mm.ano⁻¹.

O perímetro irrigado é formado por uma área irrigável de 18.266 ha, dividida em duas etapas: 10.765 ha na primeira, já disponíveis para exploração, porém apenas 2.100 ha estão sendo utilizados e em produção; e 3.600 ha na segunda etapa, no qual se praticará agricultura irrigada com alto valor econômico com o uso dos sistemas de irrigação localizada, gotejamento e microaspersão, e irrigação por aspersão. O restante da

área compõe a reserva legal. Atualmente se produz no perímetro irrigado frutas, hortaliças, grãos, pastagem, cana de açúcar, madeira e oleaginosas.

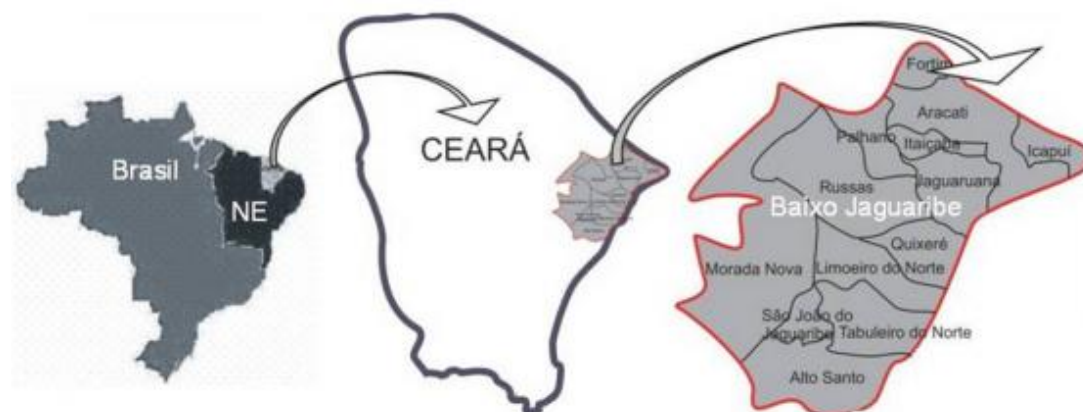


Figura 2. À esquerda mapa do Brasil com a localização do nordeste e o estado do Ceará, no centro o Ceará e localização esquemática do baixo Jaguaribe, à direita localização esquemática do baixo Jaguaribe. Fonte: IPECE.

3.2 Instrumento analítico

Como instrumento analítico desta tese foram desenvolvidos quatro modelos de otimização, envolvendo a minimização de custos de implantação e operação e maximização de receita líquida, tendo natureza Linear (PL) ou Não-Linear (PNL), à saber:

- 1 – Modelo de PL para minimização dos custos de implantação e operação de sistema de irrigação localizada (microaspersão) para a cultura da banana;
- 2 – Modelo de PNL para minimização dos custos de implantação e operação de sistema de irrigação localizada (microaspersão) para a cultura da banana;
- 3 – Modelo de PL para maximização da receita líquida de culturas irrigadas; e
- 4 – Modelo de PNL para maximização da receita líquida de culturas irrigadas.

3.2.1 Modelo de PL para minimização dos custos de implantação e operação de sistema de irrigação localizada (microaspersão) para a cultura da banana

As premissas básicas do modelo de PL desenvolvido nesta tese foram:

- o gradiente de declive deve ser uniforme (longitudinal);
- a configuração da rede hidráulica e as condições operacionais devem ser definidas previamente;
- as linhas laterais apresentam diâmetro único e estão em nível;
- as linhas laterais são de polietileno e as demais de PVC;
- as unidades operacionais são compostas por: válvulas reguladoras de pressão, linha de derivação, linhas laterais e emissores.

Uma configuração da rede hidráulica de um sistema de irrigação localizada utilizada pelo modelo de PL é apresentada na Figura 3.

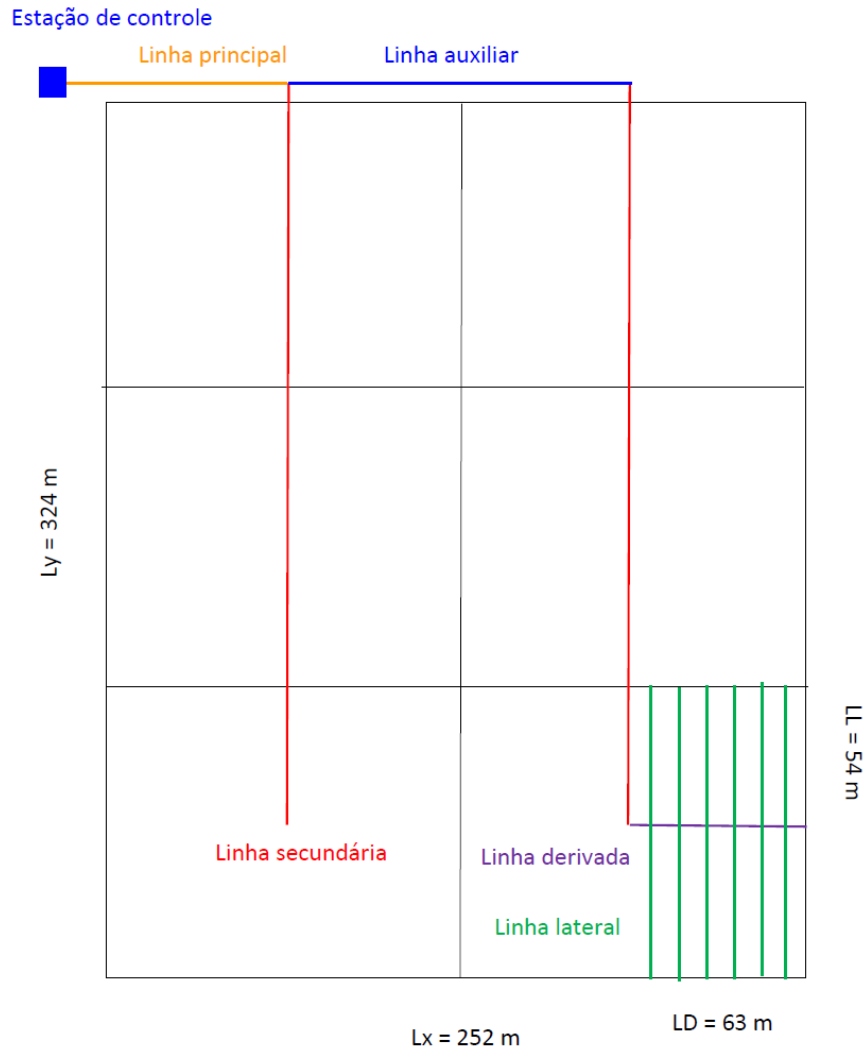


Figura 3. “Lay-out” de um sistema de irrigação por microaspersão contendo 12 unidades operacionais, utilizando no modelo de PL. Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.1 Função-objetivo

A função-objetivo a ser minimizada é o custo anual do sistema de irrigação, calculado por:

$$\begin{aligned}
 & \text{MIN } CT \\
 & = \frac{10000[(C_e + C_{pe} + C_{pvc} + C_v + C_{pc} + C_f + C_p)FRC + C_{pp} + C_{agua}]}{A}
 \end{aligned} \tag{3}$$

em que CT = custo anual do sistema de irrigação (US\$.ha⁻¹); C_e = custo total com emissores (US\$); C_{pe} = custo da tubulação de polietileno (US\$); C_{pvc} = custo com tubulação de PVC (US\$); C_v = custo com válvulas (US\$); C_{pc} = custo com painel de controle (US\$); C_f =

custo do sistema de filtragem (US\$); C_p = custo do sistema de bombeamento (US\$); FRC = fator de recuperação de capital ($i = 12\%$ aa, $n = 10$ anos); C_{pp} = custo anual de bombeamento (US\$); C_{agua} = custo com aquisição da água consumida durante o ciclo (US\$.ano⁻¹); e A = área total a ser irrigada (m²).

Os componentes da função-objetivo são estimados utilizando as seguintes equações:

$$C_e = N_s.Nl.Nm.Pm \quad (4)$$

$$C_{pe} = N_s.Nl.LL.Ppe \quad (5)$$

$$C_{pvc} = N_s. \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^I PDi.LDji + 2. \sum_{K=1}^K \sum_{R=1}^R PSr.LSkr + \sum_{K=1}^K \sum_{R=1}^R PAr.LAkr + \sum_{K=1}^K \sum_{V=1}^V PPv.LPkv \quad (6)$$

$$C_v = N_s.Pv \quad (7)$$

$$C_{pp} = \frac{10,787.Quo.N_s.ht.Id.Ik.E}{If.\eta} \quad (8)$$

em que: N_s = número de unidade operacionais; Nl = número de linhas laterais na unidade operacional; Nm = número de microaspersores na linha lateral; Pm = preço do microaspersor (US\$.unidade⁻¹); LL = comprimento da linha lateral (m); Ppe = preço do tubo de polietileno (US\$.m⁻¹); PDi = preço do tubo de PVC com o diâmetro i utilizado na linha de derivação (US\$.m⁻¹); $LDji$ = comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro i na seção j da linha de derivação; PSr = preço do tubo de PVC com diâmetro r utilizado na linha secundária (US\$.m⁻¹); $LSkr$ = comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro r utilizado na seção k da linha secundária; PAr = preço do tubo de PVC com diâmetro r utilizado na linha auxiliar (US\$.m⁻¹); $LAkr$ = comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro r utilizado na seção k da linha auxiliar; PPv = preço do tubo de PVC com diâmetro v utilizado na linha principal (US\$.m⁻¹); $LPkv$ = comprimento (m) da tubulação de PVC com diâmetro v utilizado na seção k da linha principal; Pv = preço da válvula (US\$.unidade⁻¹); Quo = vazão da unidade operacional (m³.s⁻¹); ht = altura manométrica total (m); Id = número de dias de irrigação durante o ciclo da cultura; Ih = número de horas de irrigação por conjunto de unidades

operacionais atuando simultaneamente; I_f = turno de irrigação (dias); E = tarifa de energia elétrica (US\$.kWh⁻¹); e η = rendimento do conjunto motobomba.

Uma vez que há duas linhas secundárias (uma na auxiliar e outra na principal), o fator 2 é utilizado no segundo termo do lado direito da Eq. 6. As variáveis de decisão são: LD_{ji} , LS_{kr} , LA_{kr} , LP_{kv} e altura manométrica total (ht).

3.2.1.2 Restrições

1) Área

Tais restrições são necessárias para assegurar que o sistema de irrigação a ser dimensionado tenha as dimensões coerentes com o “lay-out” previamente definido. Para a seção 1 ($j=1$) da linha de derivação:

$$\sum_{i=1}^I LD_{1i} = 0,5 \cdot EL \quad (9)$$

A distância entre o início da linha de derivação e o primeiro emissor é igual à metade do espaçamento regular entre emissores, razão pela qual se utiliza o fator 0,5 na Eq. 9. Para as seções $j = 2$ a J da linha de derivação:

$$\sum_{i=1}^I LD_{ji} = EL \quad (10)$$

Para as linhas secundárias $k=1$ a K da linha secundária:

$$\sum_{r=1}^R LS_{kr} = S_k \quad (11)$$

Para as seções $k=1$ a K da linha auxiliar:

$$\sum_{r=1}^R LA_{kr} = A_k \quad (12)$$

Para as seções $k=1$ a K da linha principal:

$$\sum_{v=1}^V LPkv = Pk \quad (13)$$

em que: EL = distância entre linhas laterais (m); LD = comprimento da seção j da linha derivada (m); Sk = comprimento da seção k da linha secundária (m); Ak = comprimento da seção k da linha auxiliar (m); Pk = comprimento da seção k da linha principal (m).

2) Dimensionamento da linha de derivação

A linha de derivação é dimensionada supondo-se que ela sempre esteja operando totalmente em declive, sendo que o modelo permite dimensionar todos os possíveis perfis de pressão que podem ocorrer nessa condição.

No perfil I, a pressão decresce com o comprimento da linha de derivação, atinge um valor mínimo e depois volta a aumentar com o comprimento da tubulação. Neste tipo de perfil, há 3 possibilidades: (a) a pressão no final da linha de derivação é menor que a pressão no início da tubulação; (b) a pressão no final da linha de derivação é igual à pressão no início; e (c) a pressão no final da linha de derivação é maior que a pressão no início.

O perfil II ocorre quando a pressão aumenta continuamente com o comprimento da linha de derivação, o que ocorre quando se tem grande declividade.

Todos os perfis de pressão são detalhados por Wu et al. (1986) e representados no modelo pelo seguinte conjunto de equações:

$$HDo - HDj \leq \Delta d \quad j = 1, \dots, J \quad (14)$$

$$HDj - HDo \leq \Delta d \quad j = 1, \dots, J \quad (15)$$

$$HDg - HDj \leq \Delta d \quad j = 1, \dots, J; g = 1, \dots, J; e g \neq j \quad (16)$$

em que HDo = carga hidráulica no início da linha de derivação (m); HDj = carga hidráulica na saída j da linha de derivação (m); HDg = carga hidráulica na saída g da linha de derivação (m); e Δd = máxima variação da carga hidráulica permitida na linha de derivação (m).

Em uma linha de derivação com múltiplos diâmetros (mais de um diâmetro) é impossível se saber previamente em qual saída estará a menor carga hidráulica.

As Eqs. 14, 15 e 16 asseguram que a diferença de carga hidráulica entre quaisquer saídas ou entre qualquer saída e o início da linha de derivação será menor ou igual à máxima variação de carga hidráulica permitida na linha de derivação (Δd). Desta forma, este conjunto de restrições asseguram que a diferença entre a máxima e mínima carga hidráulica será menor que ou igual o Δd , independentemente de onde estes pontos extremos estejam localizados.

A carga hidráulica média na linha de derivação é calculada por:

$$H_{av} = \frac{\sum_{j=1}^J HD_j}{\left(\frac{Nl}{2}\right)} \quad (17)$$

em que: HD_j = carga hidráulica na linha derivada; H_{av} = carga hidráulica média na linha de derivação (m).

3) Carga hidráulica nas saídas da linha de derivação

A carga hidráulica na entrada da linha lateral é calculada por (KELLER e BLIESNER, 1990):

$$H_w = kl + kl \cdot h_{fl} \pm 0,5 \cdot \Delta El \quad (18)$$

em que H_w = carga hidráulica na entrada da linha lateral média (m); h_w = pressão de operação do emissor (m); $kl = 0,75$ para linha laterais com diâmetro único; $0,63$ para linhas laterais com dois diâmetros e $0,5$ para linha com 3 ou mais diâmetros (KARMELI e KELLER, 1975); h_{fl} = perda de carga na linha lateral (m); ΔEl = diferença de nível (m) entre o início e o final da linha lateral, sendo positivo para laterais em aclave e negativo para laterais em declive.

A carga hidráulica no início da linha de derivação pode ser calculada pela seguinte equação:

$$H_{Do} = kb + kb \cdot h_{fm} \pm 0,5 \cdot \Delta Em \quad (19)$$

em que $kb = 0,75$ para linhas de derivação com diâmetro único; $0,63$ para linhas laterais com dois diâmetros e $0,5$ para linha com 3 ou mais diâmetros; h_{fm} = perda de carga na linha de derivação (m); ΔEm = diferença de nível (m) entre o início e o final da linha lateral, sendo positivo para laterais em aclave e negativo para laterais em declive.

A perda de carga total por atrito na linha de derivação (hfm), em metros, é calculada por:

$$hfm = 1,05 \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I JD_{ji} \cdot LD_{ji} \quad (20)$$

em que JD_{ji} = gradiente de perda de carga ($m \cdot m^{-1}$) na tubulação de PVC com diâmetro i utilizado na seção j da linha de derivação; e 1,05 = fator utilizado para compensar as perdas de carga localizadas.

A carga hidráulica na entrada da unidade operacional, antes da válvula, é calculada por:

$$H_{uo} = H_{Do} + H_v \quad (21)$$

em que H_{uo} = carga hidráulica na entrada da unidade operacional (m); e H_v = perda de carga na válvula (m).

O modelo assume que as linhas laterais tem um único diâmetro e estão em nível. Desta forma, $k = 0,75$ e $\Delta EL = 0$ na Eq. 18. Por outro lado, o processo de otimização vai gerar, na grande maioria dos casos, linhas de derivação com dois diâmetros, o que implica em $kb = 0,63$.

Substituindo-se as Eqs. 17, 18 e 19 na Eq. 21, tem-se:

$$H_{uo} = 0,75 \cdot h_{fl} + h_w + H_v + 0,6615 \sum_{i=1}^I JD_{ji} \cdot LD_{ji} - 0,5 LD \cdot dz \quad (22)$$

em que dz = gradiente de declive ($m \cdot m^{-1}$) na linha de derivação; e LD = comprimento da linha de derivação (m).

A carga hidráulica nas saídas da linha de derivação é estimada por:

Para $j = 1$:

$$HD_1 = H_{Do} - 1,05 \sum_{i=1}^I JD_{1i} \cdot LD_{1i} + 0,5 \cdot EL \cdot dz \quad (23)$$

Para $j = 2$ a J :

$$HD_J = HD_{J-1} - 1,05 \sum_{i=1}^I JD_{1i} \cdot LD_{1i} + 0,5 \cdot EL \cdot dz \quad (24)$$

4) Dimensionamento das linhas secundárias

As linhas secundárias são dimensionadas em função da pressão requerida na entrada da unidade operacional (H_{uo}) e da pressão disponível na saída da linhas auxiliar (H_{k1}) ou principal (H_{k2}).

Para $k = 1$ a K :

$$1,05 \sum_{r=1}^R JS_{kr} \cdot LS_{kr} \geq H_{k1} - H_{uo} \quad (25)$$

em que JS_{kr} = gradiente de perda de carga, em $m \cdot m^{-1}$, no tubo de PVC com diâmetro r utilizado na linha secundária k .

5) Carga hidráulica nas saídas das linhas auxiliar e principal

A carga hidráulica no início e nas saídas da linha auxiliar é calculada por:

$$H_a = H_1 - H_2 \quad (26)$$

Para $k = 1$ a K :

$$H_a = H_1 - A \cdot dz - 1,05 \sum_{r=1}^R JA_{kr} \cdot LA_{kr} \quad (27)$$

em que H_a = carga hidráulica na entrada da linha auxiliar (m); H_k = carga hidráulica na saída k da linha auxiliar (m); e JA_{kr} = gradiente de perda de carga ($m \cdot m^{-1}$) no tubo com diâmetro r utilizado na seção k da linha auxiliar.

A carga hidráulica no início e nas saídas da linha principal é calculada por:

$$H_o = ht - Hes - Hs \quad (28)$$

Para $k=1$ a K :

$$H_p = H_o - P \cdot dz - 1,05 \sum_{v=1}^V JP_{KV} \cdot LP_{KV} \quad (29)$$

em que H_p = carga hidráulica na entrada da linha principal (m); ht = altura manométrica total (m); Hes = perda de carga na estação de controle (m); Hs = altura de secção (m); Hk = carga hidráulica na saída k da linha principal (m); e JP_{kv} = gradiente de perda de carga (m.m⁻¹) no tubo com diâmetro v utilizado na seção k da linha principal.

6) Altura manométrica total

A altura manométrica total (ht) é igual à pressão total requerida para atender a unidade operacional que opera em condições mais críticas. O modelo assume que o fluxo de água da fonte para as unidades operacionais é feito em condições em aclave. Desta forma, a condição mais crítica é quando se irá suprir a unidade operacional mais distante.

$$ht = H_{uo} + 1,05 \left(\sum_{r=1}^R JS_{kr} \cdot LS_{kr} + \sum_{i=1}^K JA_{KR} \cdot LA_{KR} + \sum_{v=1}^V JP_{kv} \cdot LP_{kv} \right) + (LD + LA + LP) \cdot dz + Hes + Hs \quad (30)$$

em que LD = comprimento da linha de derivação (m); LA = comprimento da linha auxiliar (m); e LP = comprimento da linha principal (m).

3.2.2 Modelo de PNL para minimização dos custos de implantação e operação de sistema de irrigação localizada (microaspersão) para a cultura da banana

As premissas básicas utilizadas no desenvolvimento do modelo PNL foram:

- a área deve ser regular e apresentar declividade uniforme nas duas direções;
- as estações de bombeamento e de controle estão localizadas na extremidade do campo na direção X, no limite da área superior;

- as linhas laterais são de polietileno, apresentam diâmetro único e estão em nível, sendo que as demais linhas da rede hidráulica são de PVC;
- a linha de derivação está disposta na direção X, onde se tem declividade supostamente uniforme.

Um sistema de irrigação localizada é, normalmente, subdividido em unidades operacionais. O modelo não-linear assume a unidade operacional como sendo constituída por emissores (gotejadores ou microaspersores), tubulação (linhas laterais, de derivação, secundária, auxiliar e principal) e acessórios (registros e válvulas), conforme pode ser verificado na Figura 4.

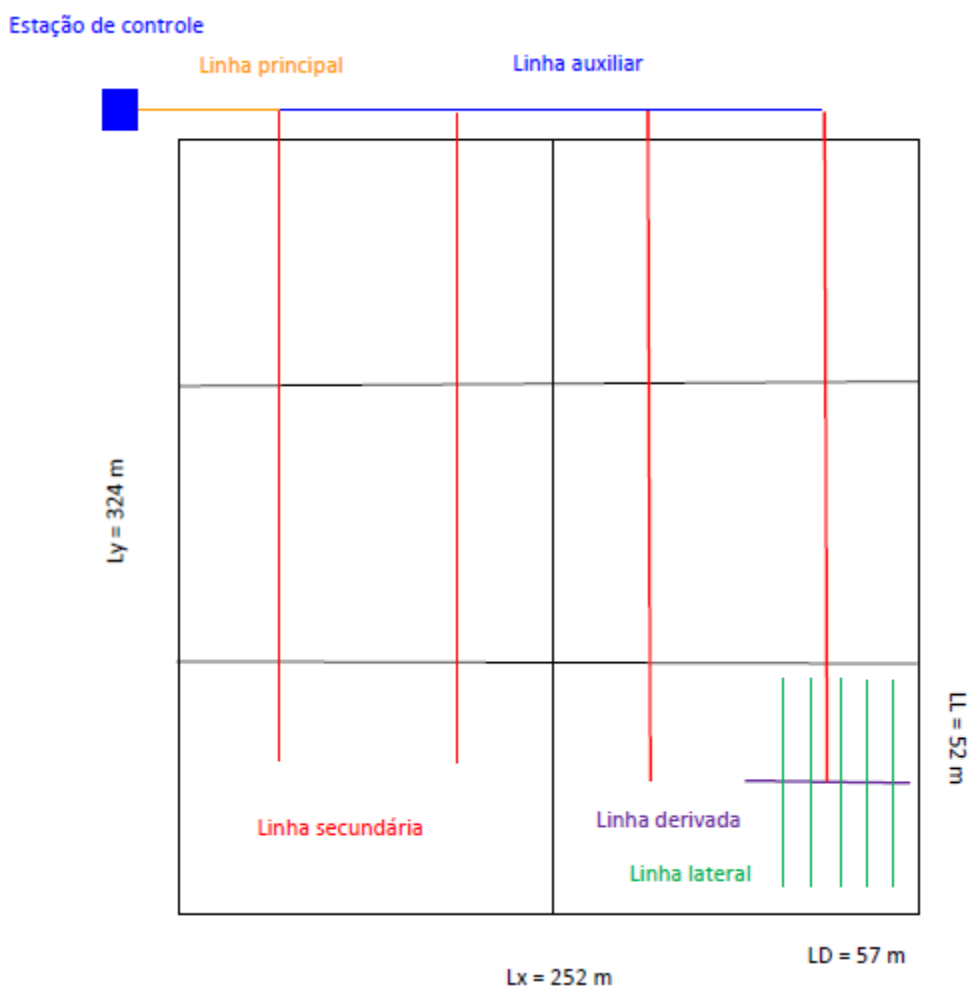


Figura 4. “*Lay-out*” de um sistema de irrigação por microaspersão contendo 12 unidades operacionais, utilizando no modelo de PNL. Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2.1 Função-objetivo

A função-objetivo a ser minimizada é o custo anual do sistema de irrigação e é calculada pela soma entre os custos anualizados com investimento e bombeamento e custo com aquisição da água. Portanto,

$$CT = Cip + C_{\text{água}} \quad (31)$$

em que Cip = custo anualizado referente a investimento e bombeamento; $C_{\text{água}}$ = custo com aquisição da água, (US\$.ha⁻¹.ano⁻¹).

O modelo permite que se inclua o valor a ser pago pela água utilizada, a tarifa é cobrada pelo Distrito de Irrigação Tabuleiro de Russas (DISTAR) que administra o projeto. O custo com a água é estimado por:

$$C_{\text{água}} = \frac{10000 \cdot W \cdot Cw}{EL \cdot EE \cdot Ea} \quad (32)$$

em que $C_{\text{água}}$ = Tarifa variável (US\$); W = volume de água aplicado por planta por ano, (m³); Cw = preço da água, (US\$.m⁻³); EE = distância entre pontos de emissão na linha lateral, (m); EL = distância entre linhas laterais, (m); Ea = Eficiência de aplicação.

O custo com investimento e energia (bombeamento) é dado por:

$$Cip = Ca + Cb + Cd \quad (33)$$

em que Cip = custo anualizado referente a investimento e bombeamento; Ca , Cb e Cd = custo parcial do investimento, (US\$.ha⁻¹.ano⁻¹).

$$Ca = Cmi \cdot TM \quad (34)$$

em que Cmi = custo unitário do emissor, (US\$); TM = número total de emissores.

$$Cb = (Cpe \cdot TLL + NUO \cdot LD \cdot Cpvd + TLS \cdot Cpvs + TLA \cdot Cpva + TLP \cdot Cpvp) \quad (35)$$

em que Cpe = custo (US\$.m⁻¹) do tubo de polietileno em função do diâmetro interno (m); TLL = comprimento total das linhas laterais (m); NUO = número de unidades operacionais; LD = comprimento da linha de derivação (m); $Cpvd$ = custo (US\$.m⁻¹) do tubo de PVC em função do diâmetro interno (m), referente a linha de derivação; TLS = comprimento total com linhas secundárias (m); $Cpvs$ = custo (US\$.m⁻¹) do tubo de PVC em função do diâmetro

interno (m), referente a linha de secundária; TLA = comprimento total com linhas auxiliares (m); $Cpva$ = custo (US\$.m⁻¹) do tubo de PVC em função do diâmetro interno (m), referente a linha de auxiliar; TLP = comprimento total com linhas principal (m); $Cpvp$ = custo (US\$.m⁻¹) do tubo de PVC em função do diâmetro interno (m), referente a linha de principal;

$$Cd = Cv + Ccp + Cf + Cp \quad (36)$$

em que Cv = custo com válvula, (US\$); Ccp = custo do painel de controle (US\$); Cf = custo do sistema de filtragem, (US\$); Cp = custo do sistema de bombeamento, (US\$).

$$Cip = \frac{10000[(Ca + Cb + Cd)FRC + Cpp]}{A} \quad (37)$$

em que Cip = custo anualizado referente a investimento e bombeamento; Ca , Cb e Cd = custo parcial do investimento (US\$.ha⁻¹.ano⁻¹); Cpp = custo anual com bombeamento, (US\$); FRC = fator de recuperação de capital ($i = 12\%$ aa, $n = 10$ anos) e A = área total a ser irrigada (m²).

As regressões que expressam o custo do tubo em função do diâmetro interno, para cada uma das linhas que compõe a rede hidráulica, são apresentadas a seguir:

$$Cpe = C1(DL)^{C2} \quad (38)$$

$$Cpvd = C3(DD)^{C4} \quad (39)$$

$$Cpvs = C5(DS)^{C6} \quad (40)$$

$$Cpva = C7(DA)^{C8} \quad (41)$$

$$Cpvp = C9(DP)^{C10} \quad (42)$$

em que DL = diâmetro interno da linha lateral, (m); DD = diâmetro interno da linha de derivação, (m); DS = diâmetro interno da linha secundária, (m); DA = diâmetro interno da linha auxiliar, (m); $C1$, $C2$, $C3$, $C4$, $C5$, $C6$, $C7$, $C8$, $C9$ e $C10$ são constantes.

A quantidade de cada componente da rede hidráulica é calculada pelas seguintes equações:

$$LL = (NGE - 0,5).EE \quad (43)$$

$$LD = LDA + LDD \quad (44)$$

$$LDA = (NLLA - 0,5).EL \quad (45)$$

$$LDD = (NLLD - 0,5).EL \quad (46)$$

$$LDD = JP.LD \quad (47)$$

$$LS = Ly - (NGE.EE) \quad (48)$$

$$LA = Lx - LD \quad (49)$$

$$LP = LDA \quad (50)$$

$$LUOX = NLL.EL \quad (51)$$

$$LUOY = 2.NGE.EE \quad (52)$$

$$TM = \frac{A.Nm}{EE.EL} \quad (53)$$

$$TLL = \frac{(A)}{(EL)} - \frac{(A)}{(2 * NGE.EL)} \quad (54)$$

$$TLD = \frac{(A)}{(2 * NGE.EE)} - \frac{(A)}{(4 * NGE.EE * NLL)} \quad (55)$$

$$TLS = \frac{(A)}{(2 * NGE.EL)} - \frac{(LX.NGE.EE)}{(2 * EL.NLL)} \quad (56)$$

$$TLA = LX - (2.NLL.EL) \quad (57)$$

$$TLP = LX - (3.NLL.EL) \quad (58)$$

$$NLS = \frac{TLS}{LY - (NLLA.EL)} \quad (59)$$

em que A = área total a ser irrigada (m^2); NGE = número de pontos de emissão na linha lateral; NLL = número de saídas na linha de derivação; $NLLA$ = número de saídas no trecho em aclave da linha de derivação; $NLLD$ = número de saídas no trecho em declive da linha de derivação; LL = comprimento da linha lateral (m); LD = comprimento da linha de derivação (m); LDA = comprimento do trecho em aclave da linha de derivação (m); LDD =

comprimento do trecho em declive da linha de derivação (m); LS = comprimento da linha secundária (m); LA = comprimento da linha auxiliar (m); $Luox$ = comprimento no eixo X da unidade operacional (m); $Luoy$ = comprimento no eixo Y da unidade operacional (m); TLL = total de linhas laterais (m); TLD = total de linhas derivadas (m); TLA = total de linha auxiliar (m); TLP = total de linha principal (m); NLS = número de linhas secundárias; Lx = comprimento da área irrigada na direção X (m); Ly = comprimento da área irrigada na direção Y (m); JP = localização do ponto de inserção da linha secundária na linha de derivação, o qual confere o mesmo valor de carga hidráulica mínima nos trechos em aclave e declive. É expresso em fração do comprimento total da linha de derivação (trecho em aclave mais trecho em declive).

A variável JP assume valores entre 0,5 e 1, sendo que 0,5 significa que o trecho em aclave e declive da derivação tem o mesmo comprimento, o que ocorre quando a linha está em nível. Quando JP é maior que 0,5 e menor que 1, significa que o trecho em declive é maior que o trecho em aclave. Quando $JP = 1$, significa que não há trecho em aclave e a linha de derivação está totalmente na condição em declive.

O custo com válvulas no início das unidades operacionais (Cv), em US\$, é calculada em função do número de unidades operacionais:

$$TCv = C11.NUO \quad (60)$$

em que $C11$ = coeficientes.

$$Ccp = C12.NUO + C13 \quad (61)$$

em que $C12$ e $C13$ são coeficientes.

$$TCp = C14.QT.Ht + C15 \quad (62)$$

em que $C14$ e $C15$ são coeficientes; e Ht = altura manométrica total, em m, dada por:

$$Ht = 0,75.hfl + Hav + 0,75.HFDA + HFS + HFA + HFP + Hes + 0,5.LDA.Sx + LA.Sx + LP. \quad (63)$$

em que $HFDA$ = perda de carga no trecho em aclave da linha de derivação (m); HFS = perda de carga na linha secundária (m); HFA = perda de carga na linha auxiliar (m); HFP = perda de carga na linha principal (m); Sx = declividade na direção X .

$$C_{pp} = C_{kw} \left(\frac{10,787 \cdot Q_{uo} \cdot N_s \cdot H_T \cdot I_d \cdot I_k \cdot E}{I_f \cdot \eta} \right) \quad (64)$$

em que C_{kw} = custo do kWh (US\$).

3.2.2.2 Restrições

As restrições envolvem aspectos hidráulicos, limitações físicas da área, critério de dimensionamento da unidade operacional e condições operacionais.

Em áreas com declividade uniforme nas duas direções, o modelo não-linear assume que as linhas laterais estão em nível e que a linha de derivação está em condição de desnível. Os trechos em aclave e declive da linha de derivação apresentam diferentes comprimentos, porém o mesmo diâmetro.

O ponto de inserção (JP) da linha secundária na linha de derivação, o qual define os comprimentos dos trechos em aclave e declive, é calculado por (KELLER e BLIESNER, 1990):

$$T \frac{Sy \cdot LD}{HFD} - 0,36 \left(\frac{Sy \cdot LD}{HFD} \right)^{1,57} = JP^{2,75} - (1 - JP)^{2,75} \quad (65)$$

Foi adotada a equação de Darcy-Weisbach para cálculo da perda de carga nas tubulações. Para uso em plásticos lisos, tal equação tem a seguinte formulação (KELLER e BLIESNER, 1990):

$$H_f = \frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \quad (66)$$

em que H_f = perda de carga devido o atrito (m); f = coeficiente de atrito; L = comprimento da tubulação (m); Q = vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$); D = diâmetro interno do tubo (m); g = aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m} \cdot s^{-2}$).

Segundo o valor do número de Reynolds (Re), calculou-se o coeficiente de atrito:

$$\text{Se } Re \leq 2000: f = \frac{64}{Re} \quad (67)$$

De acordo com Pizarro (1990), pode-se utilizar a equação proposta por Blasius para calcular o coeficiente de atrito no regime crítico, e que a possibilidade de cometer erro é menor que 2%.

Para regime turbulento, usando-se tubulações de plástico hidraulicamente lisos, a equação de Blasius será:

$$f = 0,316 \cdot Re^{-0,25} \quad (68)$$

Em todos os casos Re , para água a 20° C, foi dado por:

$$Re = 1,26 \cdot 10^{-0,25} \cdot \left(\frac{Q}{D}\right) \quad (69)$$

Substituindo-se as equações (69) e (70), na equação (66), tem-se:

$$Hf = 7,89 \cdot 10^{-4} L \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad (70)$$

em que Hf = perda de carga devido o atrito (m); L = comprimento da tubulação (m); Q = vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); D = diâmetro interno do tubo (m).

A perda de carga em cada uma das linhas que compõe a rede hidráulica é estimada por:

$$HFL = \frac{8,1267 \cdot 10^{-4} LL \cdot QL^{1,75} FL}{DL^{4,75}} \quad (71)$$

$$HFDA = \frac{7,89 \cdot 10^{-4} LDA \cdot QDA^{1,75} FDA}{DD^{4,75}} \quad (72)$$

$$HFDD = \frac{7,89 \cdot 10^{-4} LDD \cdot QDD^{1,75} FDD}{DD^{4,75}} \quad (73)$$

$$HFD = HFDA + HFDD \quad (74)$$

$$HFS = \frac{7,89 \cdot 10^{-4} LS \cdot QS^{1,75} FS}{DS^{4,75}} \quad (75)$$

$$HFA = \frac{7,89 \cdot 10^{-4} LA \cdot QA^{1,75} FA}{DA^{4,75}} \quad (76)$$

$$HFP = \frac{7,89 \cdot 10^{-4} LP \cdot QP^{1,75} FP}{DP^{4,75}} \quad (77)$$

em que QL = vazão da linha lateral ($m^3.s^{-1}$); QDA = vazão no trecho em aclave da linha de derivação ($m^3.s^{-1}$); QDD = vazão no trecho em aclave da linha de derivação ($m^3.s^{-1}$); QS = vazão da linha secundária ($m^3.s^{-1}$); QA = vazão da linha auxiliar ($m^3.s^{-1}$); QP = vazão da linha principal ($m^3.s^{-1}$); FL , FDA , FDD , FS , FA e FP são coeficientes de Christiansen para as linhas lateral, derivação em aclave, derivação em declive, secundária, auxiliar e principal respectivamente.

A vazão nas linhas lateral, derivação em aclave, derivação em declive, secundária, auxiliar e principal é calculada por:

$$QL = NGE \cdot NE \cdot QE \quad (78)$$

$$QDA = 2 \cdot NLLA \cdot QL \quad (79)$$

$$QDD = 2 \cdot NLLD \cdot QL \quad (80)$$

$$QS = QE \cdot NE \cdot NUOS \cdot NLL \cdot NGE \quad (81)$$

$$QA = QS \quad (82)$$

$$QP = 2 \cdot QA \quad (83)$$

$$QUO = QS \quad (84)$$

$$\frac{2 \cdot QE \cdot NE \cdot NUOS \cdot NLL \cdot NGE}{UE} \leq QDISP \quad (85)$$

As linhas laterais e de derivação são dimensionadas segundo critério baseado na uniformidade de emissão (UE). A variação de perda de carga admissível nas duas linhas, para que se tenha o valor desejado (de projeto) de UE , é calculada por (KELLER e BLIESNER, 1990):

$$DHUO = 2,5(HM - Hmin) \quad (86)$$

em que HM = pressão de serviço (mca); DH_{UO} = variação da carga hidráulica admissível (mca) nas linhas laterais e de derivação, ou seja, na unidade operacional, para que se assegure a uniformidade de emissão desejada; H_{min} = carga hidráulica (mca) correspondente à vazão mínima na unidade operacional, sendo calculada em função da uniformidade de emissão.

A uniformidade de emissão é estimada por (KARMELI e KELLER, 1975):

$$UE = 100 \left(1 - 1,27 \frac{Emv}{\sqrt{NE}} \right) \frac{q_{min}}{q_w} \quad (87)$$

em que UE = uniformidade de emissão (valor decimal); Emv = coeficiente de variação de fabricação; q_{min} = vazão mínima da unidade operacional ($m^3.s^{-1}$); q_w = vazão média do emissor ($m^3.s^{-1}$); e NE = número de emissores por planta.

O valor encontrado para DH_{UO} deve ser dividido entre as linhas lateral e de derivação. Keller e Bliesner (1990) sugerem que esta divisão seja feita de forma igualitária.

O modelo não-linear desenvolvido flexibiliza tais limites, de tal forma que as linhas lateral e de derivação possam apresentar variação de carga hidráulica entre 30 e 70% do valor DH_{UO} , porém a soma destas variações tem que ser igual a 1 (igual a DH_{UO}). Expressando isto na forma de equações, tem-se:

$$h_{fl} \geq 0,4.DH_{UO} \quad (88)$$

$$h_{fl} \leq 0,6.DH_{UO} \quad (89)$$

$$HFDA + (LDA.SY) \geq 0,3.DH_{UO} \quad (90)$$

$$HFDA + (LDA.SY) \leq 0,7.DH_{UO} \quad (91)$$

$$DH_{UO} \leq HFL + HFDA + LDA.SY \quad (92)$$

Há necessidade de uma restrição que obrigue o modelo a dimensionar uma rede hidráulica que supra a totalidade da área que se deseja irrigar, sendo expressa por:

$$A = 2.NGE.NLL.EE.ELNUO \quad (93)$$

As linhas secundária, auxiliar e principal são dimensionadas com base na velocidade admissível no interior do tubo, que deve estar compreendida entre 0,2 e 2,0 m.s⁻¹. A velocidade nas linhas secundária, auxiliar e principal é calculada por:

$$VS = 1,27324 \frac{QS}{DS^2} \quad (94)$$

$$VA = 1,27324 \frac{QA}{DA^2} \quad (95)$$

$$VP = 1,27324 \frac{QP}{DP^2} \quad (96)$$

em que VS = velocidade na tubulação da linha secundária; VA = velocidade na tubulação da linha auxiliar; VP = velocidade na tubulação da linha principal (m.s⁻¹).

O tempo diário disponível para irrigação também constitui uma restrição, sendo que o modelo estabelece um valor mínimo de 18 h.dia⁻¹ em um máximo a ser definido pelo usuário e caracterizado com *Tav*, resultando nas seguintes equações:

$$\frac{NUO.Ih}{NUOS.Ifrr} \leq Tav \quad (97)$$

$$\frac{NUO.Ih}{NUOS.Ifrr} \geq 18 \quad (98)$$

em que *Tav* = número máximo de horas por dia, disponível para irrigação.

O modelo de PNL define a configuração da rede hidráulica (“*layout*”), as condições operacionais e o dimensionamento de toda a tubulação. Os principais dados de saída do modelo são: número de unidades operacionais, número de unidades operacionais atuando simultaneamente, comprimento dos trechos em aclive e declive na linha de derivação, perda de carga em todas as linhas da rede hidráulica, comprimento e diâmetro de todas as linhas do sistema e variação de carga hidráulica admissível na unidade operacional. Como esses modelos apresentam limitações por trabalhar com variáveis discretas em equações não-lineares, Saad (2002) solucionou o problema dividindo o processo em duas etapas: um modelo não-linear que otimiza a configuração no campo, a operação e o dimensionamento do sistema de irrigação, porém com variáveis contínuas; e

um modelo linear, baseado nos resultados obtidos pelo modelo não-linear, que dimensiona a rede hidráulica permitindo a combinação de diâmetros comerciais na rede hidráulica.

O modelo de PL constituído com base nos resultados gerados pelos modelos não-linear, segue a estrutura básica descrita no item 3.2.1, com algumas modificações que são apresentadas a seguir:

A principal modificação é que, neste caso, a linha de derivação apresenta trecho em aclave e trecho em declive (no modelo linear desenvolvido e descrito no item 3.2.1, a linha de derivação está sempre na condição em declive). Os valores admissíveis de variação de carga hidráulica nas linhas laterais, de derivação em aclave e derivação em declive são aquelas provenientes da solução do modelo não-linear e corresponde ao valor da uniformidade de emissão que minimizou os custos por ocasião da adoção da irrigação.

As restrições hidráulicas para os trechos em aclave e declive da linha de derivação estão representadas nas seguintes equações:

$$HDo - HDA_f \leq \Delta d \quad (99)$$

$$HDo - HDDj \leq \Delta d \quad j = 1, \dots, J \quad (100)$$

$$HDDj - HDo \leq \Delta d \quad j = 1, \dots, J \quad (101)$$

$$HDDg - HDDj \leq \Delta d \quad \forall \quad j = 1, \dots, J; g = 1, \dots, J; e g \neq j \quad (102)$$

$$HDDj - HDD_f \leq \Delta d \quad j = 1, \dots, J \quad (103)$$

$$HDD_f - HDDj \leq \Delta d \quad j = 1, \dots, J \quad (104)$$

em que HDo = carga hidráulica da linha de derivação (o mesmo valor tanto para o trecho em aclave quanto para o trecho em declive), em m; $HDDj$ = carga hidráulica na saída j do trecho em declive da linha de derivação (m); $HDDg$ = carga hidráulica na saída g do trecho em declive da linha de derivação (m); e Δd = variação máxima admissível de carga hidráulica na linha de derivação (m); HDA_f = carga hidráulica da última saída do trecho em aclave da linha de derivação; e HDD_f = carga hidráulica da última saída do trecho em declive da linha de derivação.

3.2.3 Modelo de PL para maximização da renda líquida de culturas irrigadas

3.2.3.1 Formulação do modelo

O modelo de PL desenvolvido tem função-objetivo sujeita às restrições de uso dos recursos água, mercado e terra, visando à maximização da renda líquida do pequeno produtor. Conforme Hillier e Lieberman (1988), a otimização da função-objetivo consiste na determinação dos valores associados às variáveis X_i , que satisfaçam às condições de linearidade.

A formulação geral do modelo proposto é representada pelas seguintes equações:

$$MAX RL = \sum_{i=1}^n C_i \cdot X_i \quad (105)$$

Tendo como restrições:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{W_{ij}}{E} \right) \cdot X_i \leq VM_j \quad (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, 12) \quad (106)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i \leq A \quad (i = 1, \dots, n) \quad (107)$$

$$X_i \geq 0 \quad (\text{não negatividade}) \quad (108)$$

em que RL = renda líquida total do lote (US\$); i = número inteiro representando a cultura ($i = 1, \dots, n$); j = número inteiro representando o mês do ano ($j = 1, \dots, 12$); X_i = área cultivada com a i -ésima cultura (ha); C_i = renda líquida por unidade de área para i -ésima cultura (US\$.ha⁻¹.ano⁻¹); W_{ij}/E = lâmina bruta mensal de água para irrigar a i -ésima cultura (mm); E = eficiência de aplicação d'água (forma decimal); VM_j = volume mensal de água disponível (mm.ha); e A = disponibilidade máxima de terra (ha).

Na formulação do modelo proposto não foram considerados os custos fixos para exploração das áreas (aluguéis, juros de financiamentos, prestações de amortização dos lotes, amortização e conservação de benfeitorias do perímetro).

Considerou-se todos os lotes como tendo a mesma fertilidade natural e também a tecnologia mais competitiva possível, do ponto de vista de utilidade e de economicidade.

3.2.3.2 Coeficientes da função-objetivo

Os coeficientes da função-objetivo representam a renda líquida por unidade de área para cada uma das culturas (US\$ ha⁻¹). Para obtenção desses coeficientes, foi realizado um fluxo de caixa para um período de vinte anos, com base nos preços dos produtos, nos níveis de produtividade e nos custos de produção ao longo desse período adotando-se esperança matemática (probabilidade) nos cálculos, para chegar a uma média histórica de preços. Na Tabela 1 encontram-se os valores médios de mercado da produção agrícola para a região Nordeste, CE e o custo médio de produção das dez culturas implantadas no Perímetro Irrigado Tabuleiros de Russas, fornecidos pelos produtores e o Distrito de Irrigação do Perímetro Tabuleiros de Russas – DISTAR, que é a entidade responsável pela administração, organização, operação e manutenção da infraestrutura de irrigação do perímetro. Esses valores foram considerados fixos no modelo por se tratarem de valores médios. A função-objetivo a seguir representa o modelo desenvolvido:

$$\begin{aligned} \text{Max RL} = & 2453,36 \cdot X_1 + 6740,30 \cdot X_2 + 2186,53 \cdot X_3 + 2186,53 \cdot X_4 + 4631,17 \cdot X_5 \\ & + 5773,00 \cdot X_6 + 4790,84 \cdot X_7 + 6080,80 \cdot X_8 + 9819,71 \cdot X_9 + 3020,54 \cdot X_{10} + \\ & 1510,21 \cdot X_{11} + 1510,21 \cdot X_{12} \end{aligned} \quad (109)$$

em que MAX RL = maximização da renda líquida; X₁ = área cultivada com abacaxi (ha); X₂ = área cultivada com banana (ha); X₃ = área cultivada com feijão verde 1 (ha); X₄ = área cultivada com feijão verde 2 (ha); X₅ = área cultivada com laranja pera (ha); X₆ = área cultivada com limão tahiti (ha); X₇ = área cultivada com mamão havaí (ha); X₈ = área cultivada com maracujá (ha); X₉ = área cultivada com melão (ha); X₁₀ = área cultivada com melancia (ha); X₁₁ = área cultivada com milho verde 1 (ha); e X₁₂ = área cultivada com milho verde 2 (ha).

3.2.3.3 Coeficientes de requerimento mensal de água

Para o cálculo dos requerimentos mensais de água das culturas perenes foi considerada a necessidade mensal durante o período de franca produção, estabelecendo-se o seguinte procedimento: Evapotranspiração de referência (ET_o) – através do método de Penman – Monteith. Os dados de entrada para o cálculo de ET_o foram obtidos na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão Tecnológica do Instituto Federal do Ceará de 2003 a 2013; Coeficientes das culturas (K_c) – para estágio de pleno desenvolvimento das culturas; Evapotranspiração máxima (ET_m): $ET_m = ET_o \times K_c$; Precipitação efetiva (P_e): $P_e = (125 - 0,2P_m) \times P_m / 125$, onde P_m a precipitação média mensal; Necessidade de Irrigação (NI) – calculada conforme equação: $NI = ET_m - P_e$; Requerimento mensal de irrigação ou lâmina bruta (L_b): $L_b = NI / E_a$; e Eficiência de aplicação de água (E_a). Os requerimentos mensais de irrigação das culturas são apresentados na Tabela 2 e as respectivas planilhas contendo os cálculos das necessidades hídricas das culturas (ANEXO).

Tabela 1 – Rendimento líquido por hectare das culturas – período de 20 anos.

Culturas	Receita Bruta (US\$.ha ⁻¹)	Despesa (US\$.ha ⁻¹)	Receita Líquida (US\$.ha ⁻¹)	Receita Bruta Anual (US\$.ha ⁻¹)	Desp. Equi. Anual (US\$.ha ⁻¹)	Rec. Líq. Equi. Anual (US\$.ha ⁻¹)
Abacaxi	56913,75	38588,48	18325,27	7619,54	5166,17	2453,36
Banana	113008,10	62661,77	50346,29	15129,38	8389,08	6740,30
Feijão verde 1	29305,66	12973,48	16332,19	3923,41	1736,87	2186,53
Feijão verde 2	29305,66	12973,48	16332,19	3923,41	1736,87	2186,53
Laranja	75236,85	40644,59	34592,26	10072,62	5441,44	4631,17
Limão	79401,28	36280,17	43121,11	10630,15	4857,14	5773,00
Mamão	101145,70	65360,77	35784,93	13541,26	8750,42	4790,84
Maracujá	110516,30	65096,09	45420,19	14795,79	8714,98	6080,80
Melão	149007,70	75659,92	73347,74	19948,96	10129,26	9819,70
Melancia	63322,84	40761,04	22561,81	8477,585	5457,03	3020,54
Milho verde 1	25630,67	14350,21	11280,47	3431,40	1921,19	1510,21
Milho verde 2	25630,67	14350,21	11280,47	3431,40	1921,19	1510,21

Fonte: Elaborado pelo autor.

Receita e despesa equivalente: valor nominal da receita e despesa x FRC

Taxa de juros adotados: 12% ao ano.

Tabela 2 – Requerimento mensal de irrigação (mm) das culturas.

Meses	Abacaxi	Banana	Feijão 1	Feijão 2	Laranja	Limão	Mamão	Maracujá	Melão	Melancia	Milho 1	Milho 2
Janeiro	107,31	99,66	-	-	47,51	64,89	104,29	30,12	-	-	-	-
Fevereiro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Março	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abril	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Junho	75,75	70,60	-	-	35,50	47,20	73,72	23,80	-	-	-	-
Julho	125,62	119,59	-	-	78,52	92,21	123,25	64,83	-	-	-	-
Agosto	166,33	159,18	-	150,80	110,43	126,68	163,52	94,18	-	-	-	-
Setembro	188,58	180,53	-	274,91	125,71	143,98	185,41	107,43	48,95	97,69	-	217,20
Outubro	205,19	196,45	-	299,04	136,85	156,72	201,75	116,98	315,65	358,03	-	173,56
Novembro	197,71	189,28	-	-	131,83	150,98	194,39	112,68	245,46	179,07	-	263,99
Dezembro	177,72	169,46	-	-	113,11	131,89	174,47	94,32	-	-	-	-
Total	1296,77	1231,54	-	724,75	786,76	935,02	1271,08	644,36	610,06	634,79	-	654,75

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.4 Restrições

As restrições de área correspondentes nos doze meses do ano e determinam que a ocupação da área deve ser menor ou igual a área disponível. Considerando no estudo uma área de 8,0 ha para pequenos produtores. As equações referentes às restrições de área estão enumeradas de 110 a 121.

$$A1 = X1+X2+X5+X6+X7+X8 \leq 8,0 \text{ ha} \quad (110)$$

$$A2 = X1+X2+X3+X5+X6+X7+X8+X11 \leq 8,0 \text{ ha} \quad (111)$$

$$A3 = X1+X2+X3+X5+X6+X7+X8+X11 \leq 8,0 \text{ ha} \quad (112)$$

$$A4 = X1+X2+X3+X5+X6+X7+X8+X11 \leq 8,0 \text{ ha} \quad (113)$$

$$A5 = X1+X2+X5+X6+X7+X8 \leq 8,0 \text{ ha} \quad (114)$$

$$A6 = X1+X2+X5+X6+X7+X8 \leq 8,0 \text{ ha} \quad (115)$$

$$A7 = X1+X2+X5+X6+X7+X8 \leq 8,0 \text{ ha} \quad (116)$$

$$A8 = X1+X2+X4+X5+X6+X7+X8+X9+X10 \leq 8,0 \text{ ha} \quad (117)$$

$$A9 = X1+X2+X4+X5+X6+X7+X8+X9+X10+X12 \leq 8,0 \text{ ha} \quad (118)$$

$$A10 = X1+X2+X4+X5+X6+X7+X8+X9+X10+X12 \leq 8,0 \text{ ha} \quad (119)$$

$$A11 = X1+X2+X5+X6+X7+X8+X12 \leq 8,0 \text{ ha} \quad (120)$$

$$A12 = X1+X2+X5+X6+X7+X8 \leq 8,0 \text{ ha} \quad (121)$$

sendo:

A1: área irrigada no mês de janeiro (ha);

A2: área irrigada no mês de fevereiro (ha);

A3: área irrigada no mês de março (ha);

A4: área irrigada no mês de abril (ha);

A5: área irrigada no mês de maio (ha);

A6: área irrigada no mês de junho (ha);

A7: área irrigada no mês de julho (ha);

A8: área irrigada no mês de agosto (ha);

A9: área irrigada no mês de setembro (ha);

A10: área irrigada no mês de outubro (ha);

A11: área irrigada no mês de novembro (ha);

A12: área irrigada no mês de dezembro (ha).

As restrições de água garantem que a demanda mensal de água das culturas não seja maior que o volume de água disponível pelo distrito durante o respectivo mês. No cálculo da evapotranspiração máxima (ET_m) das culturas anuais, utilizou-se os coeficientes de cultivo (K_c), referente a cada estágio vegetativo, enquanto para as culturas permanentes, utilizou-se o valor do K_c para as culturas em pleno desenvolvimento. A ET_m foi calculada pelo produto entre a ET_o e K_c.

A vazão para fins de cálculo do volume disponível no mês mais crítico (outubro), foi de 1,15 L.s⁻¹.ha⁻¹ para pequenos produtores. Tendo como base o Relatório de manutenção e operação do projeto DISTAR as vazões estarão disponíveis durante 20 horas por dia. As equações referentes às restrições de água estão enumeradas de 122 a 133.

$$I1=107,31 \cdot X1+99,66 \cdot X2+0 \cdot X3+0 \cdot X4+47,51 \cdot X5+64,89 \cdot X6+104,29 \cdot X7+30,1 \cdot X8+0 \cdot X9+0 \cdot X10+0 \cdot X11+0 \cdot X12 \leq 2053,44 \text{ mm (20.534,40 m}^3\text{)} \quad (122)$$

$$I2=52,57 \cdot X1+46,78 \cdot X2+44,31 \cdot X3+0 \cdot X4+7,3 \cdot X5+20,46 \cdot X6+50,29 \cdot X7+0 \cdot X8+0 \cdot X9+0 \cdot X10+102,49 \cdot X11+0 \cdot X12 \leq 2053,44 \text{ mm (20.534,40 m}^3\text{)} \quad (123)$$

$$I3=0 \cdot X1+0 \cdot X2+0 \cdot X3+0 \cdot X4+0 \cdot X5+0 \cdot X6+0 \cdot X7+0 \cdot X8+0 \cdot X9+0 \cdot X10+0 \cdot X11+0 \cdot X12 \leq 2053,44 \text{ mm (20.534,40 m}^3\text{)} \quad (124)$$

$$I4=0 \cdot X1+0 \cdot X2+0 \cdot X3+0 \cdot X4+0 \cdot X5+0 \cdot X6+0 \cdot X7+0 \cdot X8+0 \cdot X9+0 \cdot X10+0 \cdot X11+0 \cdot X12 \leq 2053,44 \text{ mm (20.534,40 m}^3\text{)} \quad (125)$$

$$I5=0*X1+0*X2+0*X3+0*X4+0*X5+0*X6+0*X7+0*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 \leq 2053,44 \text{ mm (20.534,40 m}^3\text{)} \quad (126)$$

$$I6=75,75*X1+70,60*X2+0*X3+0*X4+35,50*X5+47,20*X6+73,72*X7+23,80*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 \leq 2053,44 \text{ mm (20.534,40 m}^3\text{)} \quad (127)$$

$$I7=125,62*X1+119,59*X2+0*X3+0*X4+78,52*X5+92,21*X6+123,25*X7+64,83*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 \leq 2053,44 \text{ mm (20.534,40 m}^3\text{)} \quad (128)$$

$$I8=166,33*X1+159,18*X2+0*X3+150,80*X4+110,43*X5+126,68*X6+163,52*X7+94,18*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 \leq 2053,44 \text{ mm (20.534,40 m}^3\text{)} \quad (129)$$

$$I9=188,58*X1+180,53*X2+0*X3+274,91*X4+125,71*X5+143,98*X6+185,41*X7+107,43*X8+48,95*X9+97,69*X10+0*X11+217,20*X12 \leq 2053,44 \text{ mm (20.534,40 m}^3\text{)} \quad (130)$$

$$I10=205,19*X1+196,45*X2+0*X3+299,04*X4+136,85*X5+156,72*X6+201,75*X7+116,98*X8+315,65*X9+358,03*X10+0*X11+263,99*X12 \leq 2053,44 \text{ mm (20.534,40 m}^3\text{)} \quad (131)$$

$$I11=197,71*X1+189,28*X2+0*X3+0*X4+131,83*X5+150,98*X6+194,39*X7+112,68*X8+245,46*X9+179,07*X10+0*X11+263,99*X12 \leq 2053,44 \text{ mm (20.534,40 m}^3\text{)} \quad (132)$$

$$I12=177,72*X1+169,46*X2+0*X3+0*X4+113,11*X5+131,89*X6+174,47*X7+94,32*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 \leq 2053,44 \text{ mm (20.534,40 m}^3\text{)} \quad (133)$$

sendo:

I1: volume de água mensal disponível, no mês de janeiro (m³);

I2: volume de água mensal disponível, no mês de fevereiro (m³);

I3: volume de água mensal disponível, no mês de março (m³);

I4: volume de água mensal disponível, no mês de abril (m³);

I5: volume de água mensal disponível, no mês de maio (m³);

I6: volume de água mensal disponível, no mês de junho (m³);

I7: volume de água mensal disponível, no mês de julho (m³);

I8: volume de água mensal disponível, no mês de agosto (m³);

I9: volume de água mensal disponível, no mês de setembro (m³);

I10: volume de água mensal disponível, no mês de outubro (m³);

I11: volume de água mensal disponível, no mês de novembro (m³);

I12: volume de água mensal disponível, no mês de dezembro (m³).

3.2.3.5 Indicadores de mercado

A produção brasileira de frutas, ocupando a terceira colocação no *ranking* mundial, ainda é responsável somente por 5,7 % do volume colhido, com uma produção de 41,5 milhões de toneladas (FAO, 2014). A região Nordeste tem se destacado de forma bastante positiva na produção e exportação de frutas tropicais e o Estado do Ceará, especificamente, tem despontado como um dos mais importantes agentes dessa transformação nordestina, alcançando lugares de destaque inclusive no cenário nacional. Em 1999, quando o Estado cearense começou a investir de forma mais significativa na produção de frutas irrigada, ocupava o 12º lugar no *ranking* exportador brasileiro, doze anos depois (2011), já estava em 4º lugar, ficando atrás dos Estados de São Paulo, Bahia e Rio Grande do Sul.

Na formulação do modelo proposto admitiu-se que não haverá restrição de mão-de-obra e capital para a implantação das culturas, sendo necessário a incorporação de áreas mínimas e máximas de algumas culturas para garantir um capital de giro do produtor, conciliando o ciclo das culturas, capacidades de pagamento e retorno financeira. As equações referentes às restrições de mercado estão enumeradas de 134 a 139.

$$A13 = X1 + X7 \leq 4,0 \text{ ha} \quad (134)$$

$$A14 = X2 + X8 \leq 4,0 \text{ ha} \quad (135)$$

$$A15 = X5 + X6 \leq 2,0 \text{ ha} \quad (136)$$

$$A16 = X9 + X10 \leq 4,0 \text{ ha} \quad (137)$$

$$A17 = X3 + X11 \leq 4,0 \text{ ha} \quad (138)$$

$$A18 = X4 + X12 \leq 4,0 \text{ ha} \quad (139)$$

sendo:

A13: área máxima de cultivo para a combinação das culturas do abacaxizeiro e mamoeiro (ha);

A14: área máxima de cultivo para a combinação das culturas da bananeira e maracujazeiro (ha);

A15: área máxima de cultivo para a combinação das culturas da laranjeira e limoeiro (ha);

A16: área máxima de cultivo para a combinação das culturas do meloeiro e melancia (ha);

A17: área máxima de cultivo para a cultura do feijão verde 1 e milho verde 1 (ha);

A18: área máxima de cultivo para a cultura do feijão verde 2 e milho verde 2 (ha).

3.2.3.6 Padrão de culturas

No presente trabalho foram consideradas dez culturas bastante exploradas pelos pequenos produtores no projeto, quais sejam: abacaxi, banana, feijão *Vigna* verde 1, feijão *Vigna* verde 2, laranja pera, limão tahiti, mamão havaí, maracujá, melão, melancia, milho verde 1 e milho verde 2, onde o padrão de ocupação é apresentado no Tabela 3.

Tabela 3 – Calendário anual de cultivo da área de estudo.

Mês	Culturas											
	Abacaxi	Banana	Feijão 1	Feijão 2	Laranja	Limão	Mamão	Maracujá	Melão	Melancia	Milho 1	Milho 2
Janeiro	X	X			X	X	X	X				
Fevereiro	X	X	X		X	X	X	X			X	
Março	X	X	X		X	X	X	X			X	
Abril	X	X	X		X	X	X	X			X	
Maio	X	X			X	X	X	X				
Junho	X	X			X	X	X	X				
Julho	X	X			X	X	X	X				
Agosto	X	X		X	X	X	X	X				
Setembro	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X
Outubro	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X
Novembro	X	X			X	X	X	X	X	X		X
Dezembro	X	X			X	X	X	X				

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.7 Estimativa dos custos de produção, da água e da energia e preços unitários de cada cultura

A solução ótima originada pelos modelos de PL e PNL é dependente dos parâmetros de entrada. No presente trabalho, o custo de produção das culturas (US\$ ha⁻¹), bem como os preços unitários de venda das culturas (US\$.kg⁻¹), foram baseados no Sistema de Informação Gerencial Agrícola (SIGA), da Secretaria de Agricultura e Pecuária (SEAGRI) e Centrais de Abastecimentos do Ceará (CEASA). Todos os valores foram atualizados com o Índice Geral de Preços da Fundação Getúlio Vargas (FGV). Devido à grande variabilidade e, conseqüentemente, maior incerteza com os preços dos produtos agrícolas foi feita utilizando a distribuição de frequências de seus valores para um série histórica de dados e efetuado o cálculo de sua esperança (probabilidade).

Os custos fixos relativos ao cultivo das culturas irrigadas foram estimados com base no princípio de recuperação de capital. Segundo este princípio, os custos fixos correspondem ao valor de uma anuidade referente ao pagamento necessário para quitar o capital utilizado no investimento em um determinado tempo com uma determinada taxa de juros sobre o capital, sendo este tempo igual à vida útil dos equipamentos, conforme a seguinte expressão:

$$CF = I_0 \times FRC \quad (140)$$

em que: CF = custo fixo anual dos investimentos no sistema de irrigação (US\$.ha⁻¹) ; I_0 = investimento no sistema de irrigação (US\$) ; e FRC = fator de recuperação de capital.

O fator de recuperação de capital é estimado pela equação:

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (141)$$

em que: i = taxa real anual de juros; e n = vida útil dos equipamentos.

Para fins de estimativa dos custos fixos como investimento será considerado o valor necessário para aquisição do equipamento de irrigação para um hectare e a construção da casa do conjunto moto-bomba. A taxa de desconto será de 12% ao ano, considerando-se ainda, que os equipamentos tenham uma vida útil de 10 anos, e não existindo valor residual ao final de sua vida útil.

O custo da tarifa de água foi obtido junto ao Distrito de Irrigação Tabuleiro de Russas (DSTAR) do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), em US\$ por 1000 m³. Desta forma o preço da água foi de US\$ 4,97 por 1000 m³.

A concessionária de energia elétrica para a região em que se encontra a área a ser irrigada é a Companhia Energética do Ceará (COELCE). Em função de suas dimensões e especificações, este projeto de irrigação se enquadra no Grupo B2 Rural – Categoria Irrigação, sendo que somente se paga tarifa de consumo, que neste caso é de US\$ 0,1036 kWh⁻¹.

3.2.4 Modelo de PNL para maximização da renda líquida de culturas irrigadas

3.2.4.1 Formulação do modelo

O modelo de PNL desenvolvido tem função-objetivo sujeita às restrições no uso dos recursos água, mercado e terra, visando à maximização da renda líquida do pequeno produtor.

$$MAX RL = \sum_{i=1}^n \{[(P_i \cdot Y_i) - C_{Pi}] * X_i\} \quad (142)$$

Tendo como restrições:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{W_{ij}}{E} \right) \cdot X_i \leq VM_j \quad (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, 12) \quad (143)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i \leq A \quad (i = 1, \dots, n) \quad (144)$$

$$X_i \geq 0 \quad (\text{não negatividade}) \quad (145)$$

em que RL = renda líquida total do lote (US\$); i = número inteiro representando a cultura ($i = 1, \dots, n$); j = número inteiro representando o mês do ano ($j = 1, \dots, 12$); X_i = área cultivada com a i -ésima cultura (ha); P_i = preço da i -ésima cultura (US\$.kg⁻¹); Y_i = produtividade da i -ésima cultura obtida com a função resposta a água de irrigação (kg.ha⁻¹); C_{Pi} = custo de produção da i -ésima (US\$.ha⁻¹); W_{ij}/E = lâmina bruta

mensal de água para irrigar a *i-ésima* cultura (mm); E = eficiência de aplicação d'água (forma decimal); VM_j = volume mensal de água disponível (m^3); e A = disponibilidade máxima de terra (ha).

3.2.4.2 Função de resposta das culturas à água

As funções de resposta das culturas à água foram utilizadas no modelo de PNL para calcular o melhor cenário de lâmina, levando em consideração os recursos água e terra. Para esta pesquisa foram utilizadas funções publicadas na literatura. Na Tabela 4 são apresentadas as funções utilizadas neste trabalho.

Tabela 4 – Funções de resposta das culturas à água.

Cultura	Equações	Referência
Abacaxi	$Y = - 506,687 + 0,905709W - 0,000370675W^2$	REGO FILHO (2002)
Banana	$Y = 1E^{-05}W^2 - 0,0304W + 41,916$	COELHO (2004)
Feijão Vigna	$Y = - 0,061 W^2 + 29,313 W + 2092,5$	LIMA (1999)
Laranja	$Y = - 5,1466 \times 10^{-8}W^2 + 8,1133 \times 10^{-4}W + 2,7334$	BERTONHA (1997)
Limão Tahiti	$Y = 0,030W - 31,94$	ALVES JÚNIOR (2006)
Mamão	$Y = - 1,649117 \times 10^{-4}W^2 + 4,651029W - 233,133$	LYRA (2008)
Maracujá	$Y = 2,3931 + 0,049058W - 0,0000183W^2$	MARTINS (1998)
Melão	$Y = - 0,0379 W^2 + 54,132 W + 5420,3$	MONTEIRO (2004)
Melancia	$Y = - 1,1064W^2 + 503,89W + 2931,6$	SOARES (2000)
Milho	$Y = - 10472,43 + 1120,10W - 0,1438W^2$	OLIVEIRA (1993)

Y: Produtividade ($kg \cdot ha^{-1}$); W: Lâmina de água (mm).

O modelo de PNL desenvolvido para este trabalho, segue a mesma estrutura desenvolvida na PL descrita nos itens 3.2.3.2 a 3.2.3.7. A principal modificação é a utilização das funções de resposta água-cultura, que permite encontrar a melhor relação entre lâmina e recursos utilizados.

3.2.4.3 Preço de mercado e custo de produção para as culturas estudadas

Na Tabela 5 encontram-se os valores médios de mercado da produção agrícola para a região nordeste, CE e o custo médio de produção das dez culturas implantadas no Perímetro Irrigado Tabuleiros de Russas, fornecidos pelos produtores e o Distrito de Irrigação do Perímetro Tabuleiros de Russas – DISTAR, é a entidade responsável pela administração, organização, operação e manutenção da infraestrutura de irrigação do perímetro. Esses valores foram considerados fixos no modelo por se tratarem de valores médios.

Tabela 5. Valor médio de venda dos produtos agrícolas (US\$ kg⁻¹) na região de nordeste, CE para os anos agrícola de 1994 a 2014, e custo médio da produção (US\$ ha⁻¹) para as culturas implantadas no Perímetro Irrigado Tabuleiros de Russas.

Culturas	Valor de mercado para as culturas (US\$ kg ⁻¹)	Custo médio da produção (US\$ ha ⁻¹)
Abacaxi	0,2774	5.166,18
Banana	0,3019	8.389,08
Feijão verde 1	1,4012	4.151,21
Feijão verde 2	1,4012	4.151,21
Laranja	0,4663	5.441,45
Limão	0,8110	4.857,14
Mamão	0,4956	8.750,42
Maracujá	0,5407	8.714,99
Melão	0,6452	10.129,26
Melancia	0,1892	5.457,04
Milho verde 1	0,3064	4.592,97
Milho verde 2	0,3064	4.592,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Resolução dos modelos

Para solucionar os modelos de Programação Linear e de Programação Não-Linear foi utilizado o programa computacional GAMS® (*General Algebraic Modeling System*), versão 24.3.1, que permite o acesso a 51 ferramentas de solução (“solver”), o que evidencia a aplicabilidade e poder de resolução deste software. Para solucionar os modelos de Programação Linear utilizou-se o “solver” GAMS/CPLEX e para os modelos de Programação Não-Linear o “solver” GAMS/CONOPT.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados sob dois aspectos visando atender os objetivos deste trabalho. Primeiramente foi realizado a comparação do modelo de PL com o modelo de PNL para minimização dos custos de implantação e operação de um lote de pequeno produtor. Na segunda parte, são discutidos e analisados os resultados de otimização do uso da água para maximização da receita líquida, utilizando modelos de PL e PNL, obtidos a partir de volume mensal médio de água disponível de 20.534,40 m³.

4.1 Análise comparativa dos modelos de PL e PNL

4.1.1 Modelo de Programação Linear – Minimização

O modelo de PL desenvolvido para minimização dos custos de implantação e operação anual de irrigação por microaspersão adota o “*lay-out*” apresentado na Figura 2, contendo 12 unidades operacionais, com 2 unidades atuando simultaneamente, previamente definido.

O resultado do modelo de PL indicou para a linha de distribuição um trecho inicial de 45 m com diâmetro de 0,075 m e outro trecho de 18 m com 0,050 m de diâmetro, totalizando 63 m. Na linha secundária, um diâmetro único de 0,075 m para um trecho de 270 m. Já para as linhas auxiliar e principal encontrou-se um diâmetro de 0,075 e 0,100 m, para trechos de 126 e 63 m, respectivamente. Os principais dados de saída do

modelo de PL estão no Quadro 1, verifica-se que os custos de implantação e operação foi US\$ 1.588,06 ha⁻¹.ano⁻¹, valor este dividido em custo da energia elétrica (US\$ 1.092,39 ha⁻¹.ano⁻¹), custo do sistema de irrigação (US\$ 407,63 ha⁻¹.ano⁻¹) e custo anual com água (US\$ 88,03 ha⁻¹.ano⁻¹).

Quadro 1. Dados de saída do modelo de PL para minimização dos custos de implantação e operação total do sistema de irrigação por microaspersão.

Item	Modelo Linear: Minimização
Número de U.O	12
Número de U.O. S	2
Número de linhas secundárias	2
Linha lateral	54 m DN16
Linha de derivação	45 m DN75 (CP40) 18 m DN50 (CP40) 63m
Linha secundárias	
• Linha 1	270 m DN75 (CP40)
• Linha 2	270 m DN75 (CP40)
Linha auxiliar	126 m DN75 (CP80)
Linha principal	63 m DN100 (CP80)
Altura manométrica (ht)	36,45 m
Custo da unidade de bombeamento (US\$)	2.086,55
Custo anual de bombeamento (US\$.ano ⁻¹)	8.919,19
Custo da energia elétrica (US\$.ha ⁻¹ .ano ⁻¹) – (A)	1.092,39
Custo do sist.de irrigação (US\$.ha ⁻¹ .ano ⁻¹) - (B)	407,63
Custo anual com água (US\$.ha ⁻¹ .ano ⁻¹) – (C)	88,03
Custo total (US\$.ha⁻¹.ano⁻¹) - (A + B + C)	1.588,06

UO= unidade operacional; UOS= unidades operacionais trabalhando simultaneamente; DN = diâmetro nominal; CP = classe de pressão do tubo.

Saad (2002), Bernami e Ofen (1984); Oron e Karmeli (1981) apresentaram modelos de PL para a otimização de rede hidráulica de sistemas de irrigação na redução dos custos da tubulação e acessórios. Para Pleban e Amir (1981) os custos de equipamentos e energia são antagônicos, uma vez que tubos de diâmetros menores apresentam menor custo, porém, resultam em maior perda de carga e, consequentemente,

em maior consumo de energia. De maneira oposta, tubos com maior diâmetro fornecem menor perda de carga e menor consumo de energia, todavia apresentam maior custo.

Saad et al (1994) desenvolveram um modelo de PL visando minimização do custo anual da rede hidráulica de um sistema de irrigação em um pomar de citros no Estado de São Paulo. Os resultados dos dimensionamentos, o hidráulico-energético foi o mais econômico (custo total de US\$ 2.426,80 ha⁻¹), seguido pelo hidráulico (US\$ 2.429,64 ha⁻¹) e pelo calculado por especialista (US\$ 3.355,78 ha⁻¹).

Saad e Mariño (2002) desenvolveram um modelo de PL para dimensionamento do sistema de irrigação localizada em áreas de citros no Estado de São Paulo, com declividades na direção das linhas de derivação de 3; 6 e 9%. Os resultados indicaram que o modelo desenvolvido foi eficiente na minimização de custo total e assegurando a uniformidade de emissão desejada na unidade operacional.

4.1.2 Modelo de Programação Não-Linear – Minimização

O modelo de PNL para minimização do custo anual do sistema de irrigação por microaspersão definiu a configuração da rede hidráulica no campo, a qual é apresentada na Figura 3.

A área irrigada foi subdividida em 12 unidades operacionais com duas unidades operacionais atuando simultaneamente em uma configuração diferente da estabelecida no modelo de PL. As linhas laterais apresentam 52 m de comprimento de cada lado da linha de derivação, que por sua vez tem o comprimento 57 m e 0,070 m de diâmetro. Para as linhas secundária o comprimento foi de 270 m e 0,073 m diâmetro. Já para as linhas auxiliar e principal encontrou-se um diâmetro de 0,073 e 0,140 m, para trechos de 195 e 29,9 m, respectivamente.

O modelo de PNL definiu a configuração da rede hidráulica no campo, os componentes dos trechos em aclives e declives na linha de derivação. Ao solucionar o modelo, obteve-se 27,95 m de trecho em aclive e 29,05 m de trecho em declive na linha de derivação, com diâmetro único de 0,070 m, uma vez que os tubos de PVC são fornecidos em barras de 6 m e os cálculos realizados trecho a trecho, foram adotados os comprimentos 27 e 30 m para os trechos em aclive e declive, respectivamente, com

uniformidade de emissão de 97%. Os principais dados de saída do modelo de PNL estão no Quadro 2, verifica-se que o custos de implantação e operação foi US\$ 1.000,00 ha⁻¹.ano⁻¹, valor este dividido em custo da energia elétrica (US\$ 764,19 ha⁻¹.ano⁻¹), custo do sistema de irrigação (US\$ 147,78 ha⁻¹.ano⁻¹) e custo anual com água (US\$ 88,03 ha⁻¹.ano⁻¹).

Quadro 2. Dados de saída do modelo de PNL para minimização dos custos de implantação e operação total do sistema de irrigação por microaspersão.

Item	Modelo Não-Linear: Minimização
Número de U.O	12
Número de U.O S	2
Número de linhas secundárias	4
Linha lateral	52 m DN16
Linha de derivação	Aclive:27,95 m DN70 (CP40) <u>Declive:29,05 m DN70 (CP40)</u> 57 m
Linha secundárias	
• Linha 1	270 m DN73 (CP40)
• Linha 2	270 m DN73 (CP40)
• Linha 3	270 m DN73 (CP40)
• Linha 4	270 m DN73 (CP40)
Linha auxiliar	195 m DN73 (CP80)
Linha principal	29,9 m DN140 (CP80)
Altura manométrica (ht)	29,43 m
Custo da unidade de bombeamento (US\$)	1.467,06
Custo anual de bombeamento (US\$.ano ⁻¹)	6.239,47
Custo da energia elétrica (US\$.ha ⁻¹ .ano ⁻¹) – (A)	764,19
Custo do sis.de irrigação (US\$.ha ⁻¹ .ano ⁻¹) – (B)	147,78
Custo anual com água (US\$.ha ⁻¹ .ano ⁻¹) – (C)	88,03
Custo total (US\$.ha⁻¹.ano⁻¹)-(A + B + C)	1.000,00

UO= unidade operacional; UOS= unidades operacionais trabalhando simultaneamente; DN = diâmetro nominal; CP = classe de pressão do tubo.

Este modelo foi capaz de dimensionar a linha de derivação, quando disposta na mesma direção do declive do terreno, definindo o ponto ótimo de inserção da linha secundária e definindo o comprimento dos trechos em aclave e declive, bem como a combinação de diâmetros que assegurem o nível de uniformidade desejado, semelhantes aos resultados encontrados por Saad (1993), que desenvolveu um modelo de PNL para a região de Limeira – SP.

Na Figura 5 são apresentados os perfis de pressão dos trechos em aclave e declive na linha de derivação, definidos pelo modelo desenvolvido. O modelo de PNL obteve uma solução com uniformidade de emissão de 97%, correspondente ao máximo valor da variação de carga hidráulica permitido na linha de derivação de 2,0 m. Pode-se verificar que não há diferença de carga hidráulica entre duas saídas quaisquer da linha de derivação que ultrapasse o valor limite de 2,0 m. Para a linha de distribuição no modelo PNL foi adotado diâmetro único, não apresentando assim, mudança brusca na variação de pressão ou a existência de pontos de inflexão.

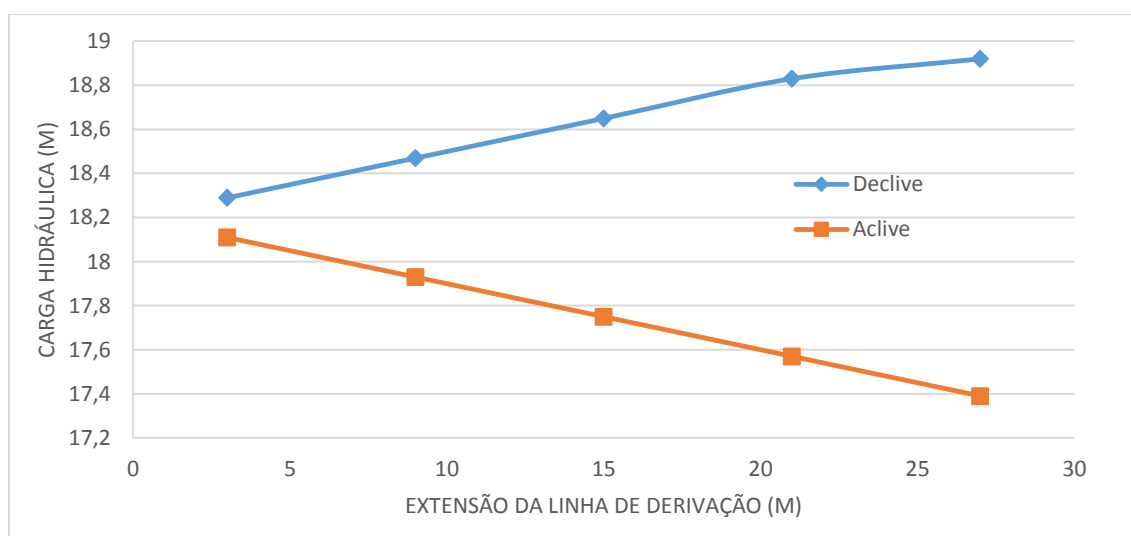


Figura 5. Representação gráfica do perfil de carga hidráulica nos trechos em aclave e declive da linha de derivação, definido pelo modelo de PNL para minimização dos custos implantação e operação total do sistema de irrigação por microaspersão.

Holzapfel et al (1990) desenvolveram para áreas planas, um modelo de PNL para otimização de sistemas de irrigação por gotejamento em um pomar de peras nos EUA. As variáveis de decisão foram: diâmetro e comprimento do tubo, número de emissores, linha laterais, unidades operacionais, tempo de irrigação e vazão dos emissores. Obtendo resultados em que os custos do sistema e seu funcionamento são relativamente

pequenos em comparação com o benefício obtido. O modelo mostrou que os resultados não produzem o custo mínimo do sistema quando o benefício marginal é maior que o custo marginal.

Lucena et al (2006) analisaram o dimensionamento ótimo de sistemas de microaspersão, através de um modelo de otimização utilizando PNL com o objetivo de minimizar os custos de investimento e operacional, em Iguatu, CE e João Pessoa, PB. Os resultados evidenciaram que, não há diferenças importantes no dimensionamento do sistema com as demandas obtidas através do balanço hídrico anual ou mensal. O custo de investimento não foi afetado pelas demandas, mas apenas os custos operacional e total do sistema. O sistema com dimensionamento ótimo depende da análise conjunta do número de subunidades e de unidades operacionais do sistema e não se pode desprezar o custo da energia.

Como o modelo trabalha com variáveis contínuas e discretas foi utilizado um procedimento adotado por Saad (2002), que consiste na solução envolvendo duas etapas: uma com resolução de um modelo de PNL contendo variáveis contínuas; e outra com resolução de um modelo de PL elaborado com base nos resultados gerados pelo modelo de PNL. Devido à dificuldade do “solver” em resolver equações não-lineares com variáveis inteiras discretas. Para solucionar o problema trabalhou-se no modelo de PNL com variáveis discretas confinadas em equações lineares.

O procedimento alternativo, citado por Saad (2002) no caso de modelos de PNL, é a identificação de todas as variáveis discretas que são definidas por equações lineares e resolver. Em uma segunda etapa, utilizando dados gerados pelo modelo de PNL, formula-se um modelo de PL em que o “*lay-out*” as condições operacionais já estejam definidas, somente otimizando o dimensionamento hidráulico com diâmetros comerciais e respeitando os limites de variação de carga hidráulica identificados na primeira etapa (modelo de PNL).

4.1.3 Comparação do desempenho entre os Modelos

Após proceder as aproximações nos dados de saída do modelo ótimo da PNL, formulou-se um novo modelo de PL complementar com base no “*lay-out*”

estabelecido na solução ótima para identificar a combinação de diâmetros comerciais que minimizem os custos de implantação e operação (Quadro 3).

O modelo de PNL definiu 12 unidades operacionais, com o funcionando simultâneo de 2 unidades, da mesma forma que no modelo de PL. Na solução dos modelos para a configuração das unidades operacionais obteve-se dimensões semelhante de 63 x 108 m para os modelos de PL e PNL, com uma área de 6.804 m². A principal limitação no desempenho dos modelos foram: o tempo de operação de 20 horas.dia⁻¹ e a disponibilidade de água para os lotes, que pela solução dos modelos irrigam 1/6 da área total por vez (13.608 m²).

Para o funcionamento das unidades operacionais com a eficiência adotado no modelo projetado (UE = 90%), calculou-se uma altura manométrica total de 36,45 m e custo anual da unidade de bombeamento de US\$ 2.086,55 para o modelo de PL e 37,18 m e custo anual da unidade de bombeamento de US\$ 2.068,01 para o modelo de PNL (Quadro 3).

Na composição do custo anual de bombeamento, trabalhou-se com duas tarifas para o mês de maior demanda de água (outubro) e um total de 20 horas de operação por dia, em que: 8,5 horas de tarifa reduzida e 11,5 horas a tarifa normal, sendo uma redução de 70% nos gastos para os horários pré-estabelecidos nas rotinas operacionais em um lote de 8,0 ha. Para o modelo de PL o custo anual de bombeamento foi de US\$ 8.919,19 e US\$ 9.976,67 para o modelo de PNL.

No Quadro 3 tem-se um resumo dos dados de saída para o modelo de PL para minimização do custo anual do sistema de irrigação por microaspersão e para o modelo de PNL. Verifica-se um custo total no modelo PL de US\$ 1.588,06 ha⁻¹.ano⁻¹, valor este 7,2% menor que os encontrados no modelo de PNL, que foi de US\$ 1.702,68 ha⁻¹.ano⁻¹. Para o custo com energia no modelo PL de US\$ 1.092,36 ha⁻¹.ano⁻¹, valor este 11,7% menor que os encontrados no modelo de PNL, que foi de US\$ 1.221,91 ha⁻¹.ano⁻¹. Já para o custo com o sistema de irrigação no modelo PL de US\$ 407,63 ha⁻¹.ano⁻¹, valor este 3,6% maior que os encontrados no modelo de PNL, que foi de US\$ 392,73 ha⁻¹.ano⁻¹.

Quadro 3. Dados de saída do modelo de PNL para minimização dos custos de implantação e operação total do sistema de irrigação por microaspersão e para o modelo linear decorrente.

Item	Modelo Linear: Minimização	Modelo Não-Linear: Minimização
Número de U.O	12	12
Número de U.O.S	2	2
Número de linhas secundárias	2	4
Linha lateral	54 m DN16	52 m DN16
Linha de derivação	45 m DN75 (CP40) 18 m DN50 (CP40) 63m	27 m DN50 (CP40) 30 m DN50 (CP40) 57 m
Linha secundárias		
• Linha 1	270 m DN75 (CP40)	270 m DN75 (CP40)
• Linha 2	270 m DN75 (CP40)	270 m DN75 (CP40)
• Linha 3	-	270 m DN75 (CP40)
• Linha 4	-	270 m DN75 (CP40)
Linha auxiliar	126 m DN75 (CP80)	195 m DN75 (CP80)
Linha principal	63 m DN100 (CP80)	29,9 m DN100 (CP80)
Altura manométrica (ht)	36,45 m	37,18 m
Custo da unidade de bombeamento (US\$)	2.086,55	2.068,01
Custo anual de bombeamento (US\$.ano ⁻¹)	8.919,19	9.976,67
Custo da energia elétrica (US\$.ha ⁻¹ .ano ⁻¹) – (A)	1.092,39	1.221,91
Custo do sistema de irrigação (US\$.ha ⁻¹ .ano ⁻¹) – (B)	407,63	392,73
Custo anual com água (US\$.ha ⁻¹ .ano ⁻¹) – (C)	88,03	88,03
Custo total (US\$.ha⁻¹.ano⁻¹) (A + B + C)	1.588,06	1.702,68

UO= unidade operacional; UOS= unidades operacionais trabalhando simultaneamente; DN = diâmetro nominal; CP = classe de pressão do tubo.

Existem diferenças relevantes entre os modelos lineares e não-lineares. Nos modelos de PL a necessidade de definição prévia do “*lay-out*” da rede hidráulica limita o universo de busca no processo de otimização, que fica restrita ao dimensionamento da tubulação, ou seja, combinação de diâmetros comerciais nas linhas do sistema de irrigação. Desta forma, parte do processo é totalmente dependente da experiência do projetista e suas decisões, havendo sempre uma dose de subjetividade. Porém a PL resulta em ótimo global, desde que exista solução ótima viável. A solução encontrada é melhor dentro do universo de soluções possíveis. Para Saad (2002) o modelo de PNL define o “*lay-out*”, as condições operacionais e dimensionamento do sistema de irrigação, porém o resultado é ótimo local, podendo haver soluções melhores.

4.2 Análise comparativa dos modelos de PL e PNL na otimização do uso da água

4.2.1 Modelo de Programação Linear - Maximização

No Perímetro Irrigado Tabuleiro de Russas para o ano de 2013/2014 segundo o Relatório de Operação e Manutenção do DISTAR/DNOCS, o volume anual de água ofertado aos pequenos produtores foi 246.412,80 m³ e um volume mensal foi 20.534,40 m³. Para o desenvolvimento das atividades agrícolas utilizaram-se estas restrições de água e satisfazendo as exigências de áreas mínimas e máximas de algumas culturas, como descrito no calendário anual de cultivo (Tabela 3).

O modelo de PL para a otimização da receita líquida do pequeno produtor que contempla o maior nível de renda líquida sugere o cultivo de banana, feijão verde *Vigna* 1 e de melão para o lote em estudo. O modelo sugere que as culturas recomendadas ocupem individualmente 50% da área do lote de 8,0 ha. Nesta condição, tem-se aplicação de uma lâmina total de água de irrigação de 1.184,75; 0,00 e 610,06 mm, respectivamente, para as culturas de banana, feijão verde *Vigna* 1 e do melão, apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Solução ótima para o modelo de PL.

Modelo de Programação Linear			
Culturas	Lâmina Total (mm)	RL (US\$.ha ⁻¹)	Área (ha)
Bananeira	1.184,75	6.740,30	4,0
Feijão <i>Vigna</i> 1	0,00	2.664,00	4,0
Meloeiro	610,06	9.819,70	4,0
Receita Líquida Total (US\$.ano ⁻¹): 74.986,16			

Dantas Neto (1994) e Frizzone (1996), no estudo da otimização do uso da água utilizando PL no perímetro irrigado Senador Nilo Coelho – PE, verificaram que a cultura da banana foi opção de plantio na solução ótima, em todos modelos analisados, semelhante a resultados encontrados por Carvalho et al (2000) em Gorutuba – MG; Rodrigues (2000) em Morada Nova – CE; e Santos Junior (2011) em Formoso Formoso – BA.

Em Morada Nova no Estado do Ceará Rodrigues (2000) utilizando PL na otimização do uso da água no perímetro irrigado Morada Nova, observou que a cultura da feijão *Vigna* apresentou-se como opção de plantio na solução ótima, em todos modelos analisados.

Santos (2002) e Santos et al (2009), utilizaram um modelo de PL, visando otimizar o uso da água no perímetro irrigado Baixo Acaraú – CE, verificaram que a cultura do melão foi opção de plantio na solução ótima, maximizando a renda líquida do pequeno produtor.

4.2.2 Modelo de Programação Não-Linear - Maximização

No modelo de PNL para a otimização da receita líquida do pequeno produtor que contempla o maior nível de renda líquida sugere o cultivo de banana, feijão verde *Vigna* 1 e de feijão verde *Vigna* 2 para o lote em estudo. O modelo sugere que as culturas recomendadas ocupem individualmente 50% da área do lote de 8,0 ha. Nesta condição, tem-se aplicação de uma lâmina total de água de irrigação de 814,18; 0,00 e 240,27 mm, respectivamente, para as culturas de banana, feijão verde *Vigna* 1 e do feijão verde *Vigna* 2, apresentado na Tabela 7. Para a cultura do feijão verde *Vigna* 1, no período

recomendado para os modelos a precipitação foi superior as necessidades hídricas da cultura, gerando um valor negativo no que reflete em aplicação de lâmina nula.

Tabela 7. Solução ótima para o modelo de PNL.

Modelo de Programação Não-Linear			
Culturas	Lâmina Total (mm)	RL (US\$.ha ⁻¹)	Área (ha)
Bananeira	814,18	5.197,29	4,0
Feijão <i>Vigna</i> 1	0,00	7.073,58	4,0
Feijão <i>Vigna</i> 2	240,27	7.073,58	4,0
Receita Líquida Total (US\$.ano ⁻¹): 77.377,88			

Nos modelos de PL e PNL considerou-se a área total cultivada com as culturas exploradas no Perímetro Irrigado Tabuleiro de Russas. O retorno financeiro anual no modelo de PNL foi US\$ 77.377,88, valor 3,18 % maior em relação ao retorno financeiro no modelo de PL.

Monteiro (2014) utilizando PNL para propor planos ótimos de cultivos, que proporcionassem a maximização do retorno líquido em Paranapanema – SP, verificou a indicação da cultura do feijão *Phaseolus* na solução ótima, com redução de 55,3% de sua área devido à oferta de água no mês de plantio não ser suficiente para suprir as necessidades hídricas da cultura.

4.2.3 Análise de sensibilidade dos modelos

Frizzzone e Andrade Junior (2005) afirmam que os coeficientes de um modelo de decisão estão sujeitos a variações. Após a resolução de problemas que envolvam programação linear ou não-linear, além da solução ótima obtida, deseja-se saber o que aconteceria com essa solução se ocorressem mudanças nos coeficientes da função objetivo ou nos níveis das restrições; para isso executa-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo.

Para Dantas Neto (1994), os coeficientes técnicos do modelo de PL são muitas vezes estimados, estando assim sujeitos à variações, sendo dessa forma de grande interesse não apenas uma solução básica ótima, mas o conhecimento dos intervalos destes coeficientes nos quais a solução se mantém ótima. E isto é viável pelo estudo denominado análise de sensibilidade ou de pós-otimidade dos parâmetros do modelo de PL.

De acordo com Arce (1990), uma vez que a solução encontrada pelo modelo de PL é ótima, a análise de sensibilidade é muito útil para observar o comportamento das variáveis que estão na solução.

Esta análise nada mais é do que a sensibilidade dos efeitos das mudanças dos parâmetros do modelo, sobre o plano ótimo de cultivos. A análise de sensibilidade de uma variável é válida, somente quando todas as demais variáveis e seus coeficientes permanecem constantes (ARCE, 1990; DANTAS NETO, 1994; RODRIGUES, 2000; SANTOS et al 2009; SANTOS JUNIOR 2011).

4.2.3.1 Análise de sensibilidade da função objetivo dos modelos

Na Tabela 8 estão relacionados os valores mínimos da contribuição ao lucro atribuídos às culturas, os quais representam os valores mínimos para que seus cultivos possam ser indicados na solução ótima.

Após encontrar a solução ótima nos modelos de PL e PNL, a análise de sensibilidade da função objetivo é muito útil para se observar o comportamento das variáveis que não estão na solução. Os resultados da análise de sensibilidade da função objetivo para os modelos estão apresentados na Tabela 8. Considerando-se a cultura da banana, observa-se que o retorno financeiro por unidade produzida desta cultura pode ser alterado para valores compreendidos no intervalo de US\$ 6.081,00 ha⁻¹ a “Infinito” no modelo de PL e US\$ 4.253,22 ha⁻¹ a “Infinito” no modelo de PNL, sem que a solução ótima seja alterada.

Tabela 8. Análise de sensibilidade da receita líquida das variáveis básicas para os modelos PL e PNL.

Variável	Área da variável (ha)	Receita líquida (US\$.ha ⁻¹)		
		Mínimo	Atual	Máximo
Modelo de Programação Linear				
Bananeira	4,0	6.081,00	6.740,30	Infinito
Feijão <i>Vigna</i> 1	4,0	1.510,00	2.186,53	Infinito
Meloeiro	4,0	6.740,30	9.820,70	Infinito
Modelo de Programação Não-Linear				
Bananeira	4,0	2.308,75	5.197,29	Infinito
Feijão <i>Vigna</i> 1	4,0	1.921,18	7.073,59	Infinito
Feijão <i>Vigna</i> 2	4,0	1.921,18	7.073,59	Infinito

Santos et al (2009) destacam a importância dos custos marginais e os valores mínimos da contribuição das culturas não recomendadas para cultivo na análise de sensibilidade (FRIZZONE, 1996; RODRIGUES 2000 e SANTOS 2002).

As culturas não recomendadas para o cultivo, denominadas variáveis não básica dos modelos, apresentam custos marginais, os que se referem a redução da receita líquida por unidade de área cultivada. Na Tabela 9 são apresentados os custos marginais das referidas culturas. Para os modelos em estudo, não foram indicados os cultivos da melancia e do milho 1 com semeadura em setembro e outubro, neste caso existe um custo marginal associado a essa atividade, isto é, para cada hectare cultivado com melancia nesta época promoverá uma redução de US\$ 6.799,17 ha⁻¹ e US\$ 5.457,03 ha⁻¹ nos modelos de PL e PNL respectivamente; cultivando-se o milho 1 a redução será de US\$ 676,32 ha⁻¹ no modelo de PL e US\$ 1.921,18 ha⁻¹ no modelo de PNL.

O valor mínimo da contribuição ao lucro que deve proporcionar a cultura irrigada, para que possa ser indicada o cultivo esta apresentado na Tabela 9. A cultura do milho 2 não deve ser recomendada enquanto sua contribuição for inferior a US\$ 9.819,70 ha⁻¹ no modelo de PL e US\$ 7.073,59 ha⁻¹ no modelo de PNL. O laranja só participará da solução ótima se sua contribuição ao lucro for superior a US\$ 9.819,70 ha⁻¹ e US\$ 7.073,59 ha⁻¹, respectivamente nos modelos de PL e PNL.

Tabela 9. Custos marginais associados às atividades não básica e o valor mínimo da contribuição ao lucro.

Culturas	Custo marginal (US\$.ha ⁻¹)	Mínima contribuição ao lucro (US\$.ha ⁻¹)
Modelo de Programação Linear		
Abacaxi	4.286,94	9.819,70
Feijão <i>Vigna</i> 2	4.553,77	6.740,30
Laranja	2.109,13	9.819,70
Limão	967,30	6.740,30
Mamão	1.949,46	6.740,30
Maracujá	659,50	9.819,70
Melancia	6.799,17	9.819,70
Milho 1	676,32	9.819,70
Milho 2	5.230,09	9.819,70
Modelo de Programação Não-Linear		
Abacaxi	5.166,17	7.073,59
Laranja	5.441,44	7.073,59
Limão	4.857,14	6.740,30
Mamão	8.750,42	6.740,30
Maracujá	8.714,98	7.073,59
Melão	10.129,25	7.073,59
Melancia	5.457,03	7.073,59
Milho 1	1.921,18	7.073,59
Milho 2	1.921,18	7.073,59

4.2.3.2 Análise de sensibilidade do recurso terra dos modelos

Os resultados da análises de sensibilidade do recurso terra para os modelos de PL e PNL estão apresentados na Tabela 10, os valores demonstram que nos meses de fevereiro a abril; e setembro a novembro, toda a área foi ocupada atingindo o valores máximos de área disponível, que é de 8,0 ha, não tendo folga e portanto apresentando um preço-sombra, que no caso corresponde a US\$ 6.740,30 ha⁻¹ para o modelo de PL e para o modelo PNL nos meses de fevereiro a abril; e agosto a outubro, toda área foi ocupada e um preço-sombra de US\$ 7.073,59 ha⁻¹. Observa-se que o recurso terra é restritivo para os modelos analisados. Para os demais meses do ano nos modelos, as áreas ocupadas não atingiram o valor da área máxima disponível, apresentando folga, com preço-sombra igual a zero, significando que a terra não é restritiva para os modelos. Resultados semelhantes foram encontrados por Santos (2002) e Santos et al (2009) no perímetro irrigado Baixo Acaraú – CE. Verifica-se, ainda, que os modelos apresentam limites de áreas mínimas para os meses de janeiro, maio a agosto; e dezembro correspondente a 4,0 ha, ou seja, mínimo

valor que pode ser utilizado pelas restrições sem que as variáveis básicas da solução ótima dos modelos de PL e PNL sejam alteradas.

Santos Junior (2011) executando análises de sensibilidade em modelos de PL obteve preço sombra zero para o recurso terra, concluindo que o recurso não foi restritivo para obtenção de um maior retorno financeiro no perímetro irrigado Formoso – BA. Rodrigues (2000) constatou baixa intensidade do uso da terra no planejamento da irrigação do perímetro irrigado Morada Nova – CE, resultado semelhante encontrado por Dantas Neto (1994) no perímetro irrigado Senador Nilo Coelho – PE.

Tabela 10. Análise de sensibilidade do recurso terra, em condição de não restrição de água.

Mês	Área ocupada (ha)	Quantidade folga (ha)	Preço sombra (US\$.ha ⁻¹)	Área mínima. (ha)	Área máxima. (ha)
Modelo de Programação Linear					
Janeiro	4,0	4,0	0,00	4,0	Infinito
Fevereiro	8,0	0,0	6.740,30	8,0	Infinito
Março	8,0	0,0	6.740,30	8,0	Infinito
Abril	8,0	0,0	6.740,30	8,0	Infinito
Maio	4,0	4,0	0,00	4,0	Infinito
Junho	4,0	4,0	0,00	4,0	Infinito
Julho	4,0	4,0	0,00	4,0	Infinito
Agosto	4,0	4,0	0,00	4,0	Infinito
Setembro	8,0	0,0	6.740,30	8,0	Infinito
Outubro	8,0	0,0	6.740,30	8,0	Infinito
Novembro	8,0	0,0	6.740,30	8,0	Infinito
Dezembro	4,0	4,0	0,00	4,0	Infinito
Taxa de ocupação				6,0	75 %
Modelo de Programação Não-Linear					
Janeiro	4,0	4,0	0,00	4,0	Infinito
Fevereiro	8,0	0,0	7.073,59	8,0	Infinito
Março	8,0	0,0	7.073,59	8,0	Infinito
Abril	8,0	0,0	7.073,59	8,0	Infinito
Maio	4,0	4,0	0,00	4,0	Infinito
Junho	4,0	4,0	0,00	4,0	Infinito
Julho	4,0	4,0	0,00	4,0	Infinito
Agosto	4,0	4,0	0,00	4,0	Infinito
Setembro	8,0	0,0	7.073,59	8,0	Infinito
Outubro	8,0	0,0	7.073,59	8,0	Infinito
Novembro	8,0	0,0	7.073,59	8,0	Infinito
Dezembro	4,0	4,0	0,00	4,0	Infinito
Taxa de ocupação				6,0	75 %

4.2.3.3 Análise de sensibilidade do volume de água dos modelos

As análises de sensibilidade do volume de água dos modelos estudados estão apresentadas na Tabela 11, considerando-se uma disponibilidade mensal máxima de 20.534,40 m³.

A disponibilidade mensal de água não foi limitante. O volume de água utilizado mensalmente nos modelos de PL e PNL, apresentaram folga e preço sombra igual a zero, indicando que o recurso volume máximo mensal de água destinado ao lote não foi restritivo. Para o mês de maior demanda observa-se uma pequena folga de 49,90 e 381,60 m³ para os modelos de PL e PNL, respectivamente. Segundo Frizzzone (1996), em razão da água ser um recurso escasso, logo o que estima sua produtividade é o preço-sombra, que para o usuário de um projeto de irrigação é representado pelo custo unitário, já que ao se desperdiçar uma unidade de volume de água, o benefício sacrificado é sua produtividade.

O fator de produção água não foi restritivo ou limitante à produção das culturas. Verifica-se o preço sombra é zero, em razão da folga no volume de água disponível, além do excesso de recurso não ser utilizado para incrementar a renda. Comparando-se os modelos, observa-se os volumes mensais utilizados de água podem variar entre 2824,00 m³ e 20.484,10 m³ no modelo de PL; 3265,70 m³ e 20.152,40 m³ no modelo de PNL, sem que a solução ótima e o preço sombra de altere. Verifica-se que o volume de água utilizada para suprir as necessidades das culturas foi menor no modelo de PL do que no modelo de PNL. Paz et al. (2002) afirmam que o manejo adequado de um sistema de irrigação deverá ser capaz de propiciar ao agricultor o uso eficiente da água, para aumentar a produtividade das culturas, reduzir os custos de produção e, conseqüentemente, maximizar o retorno dos investimentos.

Tabela 11. Análise de sensibilidade do volume de água mensal.

Mês	Estado	Vol. Disp. (m ³)	Vol. Utí. (m ³)	Folga (m ³)	P. sombra (US\$.m ³)
Modelo de Programação Linear					
Janeiro	Não lim.	20534,40	3986,30	16547,70	0,00
Fevereiro	Não lim.	20534,40	0,00	20534,00	0,00
Março	Não lim.	20534,40	0,00	20534,00	0,00
Abril	Não lim.	20534,40	0,00	20534,00	0,00
Maio	Não lim.	20534,40	0,00	20534,00	0,00
Junho	Não lim.	20534,40	2824,00	17710,00	0,00
Julho	Não lim.	20534,40	4783,80	15750,20	0,00
Agosto	Não lim.	20534,40	6367,30	14166,70	0,00
Setembro	Não lim.	20534,40	9179,60	11354,40	0,00
Outubro	Não lim.	20534,40	20484,10	49,90	0,00
Novembro	Não lim.	20534,40	17389,70	3144,30	0,00
Dezembro	Não lim.	20534,40	6778,30	13755,70	0,00
Total			71.79310		
Modelo de Programação Não-Linear					
Janeiro	Não lim.	20534,40	4537,80	15996,20	0,00
Fevereiro	Não lim.	20534,40	0,00	20534,00	0,00
Março	Não lim.	20534,40	0,00	20534,00	0,00
Abril	Não lim.	20534,40	0,00	20534,00	0,00
Maio	Não lim.	20534,40	0,00	20534,00	0,00
Junho	Não lim.	20534,40	3265,70	17268,30	0,00
Julho	Não lim.	20534,40	6040,10	14493,90	0,00
Agosto	Não lim.	20534,40	9711,30	10822,70	0,00
Setembro	Não lim.	20534,40	15704,10	4829,90	0,00
Outubro	Não lim.	20534,40	20152,40	381,60	0,00
Novembro	Não lim.	20534,40	16654,10	3879,90	0,00
Dezembro	Não lim.	20534,40	8609,70	11924,30	0,00
Total			84.675,20		

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

O menor custo anual de implantação e operação do sistema de irrigação foi obtido com o modelo de PL, com o valor de US\$ 1.588,06 ha⁻¹.ano⁻¹, já o modelo de PNL obteve um valor de US\$ 1.702,68 ha⁻¹.ano⁻¹. Verificou-se uma diferença de 7,2% entre os modelos testados. O modelo não-linear forneceu menor custo do sistema de irrigação US\$ 392,73 ha⁻¹.ano⁻¹, quando comparado com seu respectivo linear (US\$ 407,63 ha⁻¹.ano⁻¹), correspondendo uma diferença de 3,6%.

O modelo não-linear foi economicamente mais eficiente na definição do “*lay-out*” e das condições operacionais do sistema de irrigação, comparativamente ao modelo linear, no qual tais características foram previamente definidas no projeto de engenharia, e também em definir o ponto de inserção da linha secundária na linha de derivação, quando esta se encontrava na direção da declividade do terreno.

A análise de sensibilidade do recurso água apresentou preço sombra igual a zero, indicando que esse recurso, previsto para o Perímetro de Irrigação do Tabuleiro de Russas para lotes de pequenos produtores, não se mostrou limitante.

A maximização da receita líquida no Perímetro Irrigado Tabuleiro de Russas foi obtida no modelo de PNL utilizando a combinação do cultivo constituída por

4,0 ha de bananeira e 4,0 ha de feijoeiro no primeiro semestre e 4,0 ha no segundo semestre, para lotes de pequeno produtor, correspondente a US\$ 77.377,88 ano⁻¹. Para o modelo de PL a combinação de 4,0 ha de bananeira, 4,0 ha de feijoeiro no primeiro semestre e 4,0 ha de meloeiro no segundo semestre resultou num total de US\$ 74.986,16 ano⁻¹.

O retorno financeiro anual no modelo de PNL foi 3,18 % maior em relação ao retorno financeiro no modelo de PL para o ano agrícola 2013/2014. Os modelos propostos nesta pesquisa mostraram-se eficientes na otimização dos recursos terra e água.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADECE – Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará. **Agronegócio Cearense**. Governado do Estado do Ceará. Conselho de Desenvolvimento Econômico, Disponível em: <http://www.pecnordestefaec.org.br/2013/wpcontent/uploads/2013/09/PRATICAAGRONEGOCIO.pdf2013>>. Acesso em: 07 ago.2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: **Informe 2013**. Brasília: ANA, 2014, 432p.

ANDRADE, P. R. G. S. **Estudo para alocação ótima das águas de um sistema de reservatórios em série e em paralelo, para usos e objetivos múltiplos, na bacia do rio capibaribe, PE**. 2006, 248f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Pernambuco, 2006.

ALMEIDA, M. A. **Estimativa da receita líquida e empregos com uso da água otimizado de um reservatório no semi-árido paraibano**. 117 p. Dissertação (Mestrado) UFPB - Campina Grande: – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Área de Concentração: Recursos Hídricos, 2001.

ALVES JÚNIOR, J. **Necessidade hídrica e resposta da cultura de lima ácida ‘Tahiti’ a diferentes níveis de irrigação**. 2006. 100 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

ANDRADE, P. R. G. S., CURI, W. F., CURI, R. C. ORNAP na Otimização da receita de três perímetros irrigados abastecidos por dois reservatórios conectados em série. **Revista Engenharia Agrícola**, v.22, n.1, p.22-32, 2002a.

ARAÚJO, P. C. **Combinação de exploração agropecuárias em propriedades agrícolas da região dos cocais, Estado do Maranhão**, Viçosa, UFV. 1972, 89p. (Tese de mestrado).

ARCE, R. A. B. **Otimização de um projeto hidroagrícola, no município de Guaíra (SP), utilizando programação linear**. 1990. 76f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – ESALQ/Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

AUTRAN, H. R. C., **Determinação da combinação ótima de atividades no perímetro irrigado de Morada Nova, Ceará, através da programação linear**. Fortaleza: UFC, 1978. 130p. Dissertação (Mestrado em Economia Agrícola. Universidade Federal do Ceará, 1978).

BACHLER G. et al. **Environmental Degradation as a Cause of War**. V. 02 Zurich: Verlag Ruegger Ag, 1996.

BALARINE, S. J. **Alocação de recursos e combinação de atividades na agricultura de limoeiro, Estado de Pernambuco**, Recife, UFV. 1975. 130p. (Tese de mestrado).

BARBOSA, D. L., CURI, R. C., CURI, W. F. Um estudo de caso da operação integrada ótima de três reservatórios em paralelo com usos múltiplos. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa**. Aracajú – SE, 2001.

BARROS, M. T. L. **A programação dinâmica aplicada à engenharia de recursos hídricos** In: Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Editora da Universidade/UFRGS–ABRH. Porto Alegre, p.239-277, 1997.

BARTH, F. T. **Fundamentos para a gestão dos recursos hídricos**. In: Modelos para o gerenciamento de recursos hídricos. NOBEL/ABRH (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 1). São Paulo, p.1-91, 1987.

BENAMI, A. e OFEN, A. **Irrigation engineering**. Haifa, IESP, 1984. 257p.

BERNEDINI, M. Developments and possibilities of optimization models. **Agricultural water management**. Amsterdam, v. 13, p. 329-358. 1988.

BERNARDO, D. J.; WHITTLESEY, N. K.; SAXTON, K. E.; BASSET, D. L. Irrigation optimization under limited water supply. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.31, n.3, p.712-719, 1988.

BERTONHA, A. **Funções de resposta da laranja pêra a irrigação complementar e nitrogênio**. 1997. 113f. Tese (Doutorado em Agronomia / Irrigação e Drenagem) – ESALQ/Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

BOLLER, W., GAMERO, C.A. E PEREIRA, J.O. Avaliação de diferentes sistemas de preparo e de condições de cobertura do solo. **Anais do XXV CONBEA**, p. 160, 1996.

BOMAN, B. J., HILL, R. W. LP operation model for on-demand canal systems. **Journal irrigation and drainage engineering**, New York, v. 115, p. 687-700. 1989.

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; MANTOVANI, E. C. Desenvolvimento de um Programa para Avaliação da Irrigação por Sistemas Pressurizados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 2001, Araguari – MG. **Anais** Viçosa – MG: Universidade Federal de Viçosa, 2001. p. 42-48.

BRAGA JR., B. P. F. **Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos**. In: Modelos para o gerenciamento de recursos hídricos. NOBEL/ABRH (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 1). São Paulo, p.427-518, 1987.

CABRAL, W. S.; CURI, R. C.; CURI, W. F., ALENCAR, V. C. Análise das variações na receita líquida otimizada de uma área irrigada sujeita a manejo convencional e ecológico **Revista Brasileira de Agroecologia**, v.6, p.30-39, 2011.

CARVALHO, D. F. C. et al. Otimização do uso da água no perímetro irrigado do Gorutuba, utilizando-se a técnica da programação linear. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH)**, vol. 4, n. 2, p. 203-209, 2000.

CARVALLO, H. O.; HOLZAPFEL, E. A.; LOPEZ, M. A.; MARIÑO, M. A. Irrigated cropping optimization. **Jornal of Irrigation and Drainage Engineering**, vol. 124, n. 2. 1998.

CARVALLO, M. A.; MÉLLO JÚNIOR, A. V.; SCHARDONG, A.; PORTO, R. L. L. Sistema de suporte à decisão para alocação de água em projetos de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.10-17, 2009.

CIRILO, J. A. **Programação não linear aplicada a recursos hídricos**. In: Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS - ABRH. Porto Alegre, p.305-359, 1997.

COELHO, E.F.; COSTA, E.C.; TEIXEIRA, A.H.C. Irrigação. In: BORGES, A.L. (Ed.). **O cultivo da bananeira**. Cruz das Almas: EMBRAPA, 2004. p. 122-145.

CURI, R. C., CURI, W. F., BARBOSA, A. C. L. Uma avaliação quantitativa de impactos sócio-ambientais devido a irrigação. **Anais** do XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Fortaleza – CE, 2000.

CURI, W. F., CURI, R. C. e BATISTA, A. C. Alocação ótima da água do reservatório Engenheiro Arco Verde para irrigação via Programação Não-Linear. **Anais** do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória-ES, 1997.

CURI, W.F., GOMES, H. P. Um dimensionamento ótimo para redes de distribuição de água para irrigação. **Anais** do III Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ABRH. p.171- 177, 1996.

CURI, R. C.; CURI, W. F.; OLIVEIRA M. B. A. Análise de alterações na receita líquida de um perímetro irrigado no semi-árido sob condições de variações hídricas e econômicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 39-53, 2005.

CHIANG, A.C. **Matemática para economistas**. São Paulo, McGraw-Hill, 1982. 684p.

CRISTANCHO, C. M., **Maximização do lucro na empresa agrícola pela programação linear**. Viçosa, UFV. Imprensa Universitária, 1965, 71p. (tese de mestrado).

DANTAS NETO, J., AZEVEDO, C. A. V., FRIZZONE, J. A. Uso de programação linear para estimar a demanda de água e o padrão de cultura no perímetro irrigado Nilo Coelho. **Anais do XXV CONBEA** p. 507, 1996.

DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, C. A. V.; FRIZZONE, J. A. Uso da programação linear para estimar o padrão de cultura do perímetro irrigado Nilo Coelho. **Rev. Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, p. 9-12, 1997.

DANTAS NETO, J.; FARIAS, M. S. S. **Eficiência do uso da água na agricultura**. In: AGUIAR NETTO, A. O.; BASTOS, E. A. (Ed.). **Princípios agronômicos da Irrigação**. Brasília, DF. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA, 2013. p. 245-262.

DANTAS NETO, J. **Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo, em áreas irrigadas, baseados nas funções de resposta das culturas à água**. 125 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1994.

DELGADO, A. R. S. et al. Planejamento da agricultura irrigada no norte fluminense, utilizando diferentes técnicas de programação matemática. **Rev. Ele. Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**. Rio de Janeiro, v. 4, n. 3, p. 249-256, 2012.

DINAR, A.; TIWARI, DIRGHA. Balancing Future Food Demand and Water Supply: The Role of Economic Incentives in Irrigated Agriculture. **Quarterly Journal of International Agriculture**, 41(1/2):77-97, 2002.

FANG, H.; CHENG, Y.; YAN, S. Optimization on Water Resource System Operation Policy During Drought. **Journal of Water Resource and Protection**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 140-146, 2011.

FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC/E..> Acesso em: 10 ago. 2014.

FORD, S., BUTCHER, G., EDMONDS, K., BRAGGINGS, A.; “Economics Efficiency of Water Allocation”. **Ministry of Agriculture and Florestry**. Nova Zelandia. 2001.

FREITAS, M.A.S. & LOPES, A.V. Avaliação da Demanda de Água para Irrigação: Aplicação à Bacia do Rio São Francisco, **Anais do XIII CONIRD**, Juazeiro, 2003.

FREITAS, M.A.S.; VASCONCELOS, A.B. Os instrumentos de gestão dos recursos hídricos no estado do Ceará. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO À PESQUISA NA UNIFOR, 4., 1998, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: Ed. da UNIFOR. v. 1, 1998.

FRIZZONE, J. A. **Modelo de programação linear para otimizar o uso da água em Perímetros Irrigados e sua aplicação no Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho**. 1996. 57f. Tese (Livre Docente) – ESALQ/Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

FRIZZONE, J. A. **Funções de resposta das culturas à irrigação**. ESALQ/USP (Série didática nº 006), Piracicaba. 42p, 1993.

FRIZZONE, J. A. Programação matemática aplicada a projetos hidroagrícolas. **Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, Viçosa - MG. p.29, 1995.

FRIZZONE, J. A, SAAD, J. C. C. Modelo de programação não-linear para o dimensionamento e operação de sistemas de irrigação localizada, **Anais do XXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. p. 271, 1996.

FRIZZONE, J.A.; COELHO, R.D.; DOURADO-NETO, D.; SOLIANI, R. Linear programming model to optimize the water resource use in irrigation projects: an application to the Senador Nilo Coelho Project. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 54, p. 136-148, 1997.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JUNIOR, A. S. **Planejamento de Irrigação: Análise de decisão de investimento**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005, 626 p.

GARJULLI, R.; OLIVEIRA, J.L.F.; ALVAREZ, U.P.; BEZERRA, H.E.R. **Proposta metodológica para a organização de usuários de água: a experiência do Ceará**. Disponível em: <http://www.cogerh.com.br/gestão/metodologia.html>. Acesso em: 11 abr. 2014.

GIL, P. E.; MURRAY, W.; WRIGTH, M. H. **Practical optimization**. New York, Academic Press, 401p. 1981.

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento**. Editora Universitária da Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 3a. edição, 412 p, 1999.

GOMES, U.; ESPINOZA, W. Resposta de variedades de feijoeiro a níveis de fósforo e lâminas de água sob aspersão no perímetro irrigado Formoso A, Bom Jesus da Lapa. IN: COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DO VALE DO SÃO FRANCISCO. **Unidades de observação e demonstração: relatório técnico 1986-1989**. Brasília, 1990b. p. 93-94.

GONÇALVES, R.W.; PINHEIRO, P.R.; FREITAS, M.A.S. Métodos multicritérios como auxílio à tomada de decisão na bacia hidrográfica do rio Curu – estado do Ceará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba. **Anais**. Curitiba: ABRH. 1 CD-ROM.

HALL, W. B., DRACUP, J. **Water resources system engineering**. New York. Mc Graw-Hill. 372 p. 1970.

HATCH, L. U., HARDY Jr., W. E., ROCHESTER, E. W. Optimal irrigation pivot location on irregularly shaped fields. **Journal of agricultural economics**, Alabama, n. 1, p. 163-170. 1985.

HILLIER, W. Y. & LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: EDUSP, 1988. 1996.

HOMER-DIXON, T. F. On The Threshold: Environmental Changes as Cause of Acute Conflict. **International Recturity**, v. 16, n. 2, 1991. P. 76-116.

HOFFMANN, R. et. Al. Administração da empresa agrícola. 3. ed. São Paulo: Pioneira, Editora, 1976. 325p.

HOLZAPFEL, E.A.; MARINO, M.A.; VALENZUELA, A. Drip irrigation nonlinear optimization model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. New York, 116(4):479-96, 1990.

HUANG, W. Y., LIANG, T. WU, I-pai. Optimizing water utilization through multiple crops scheduling. **Transations of the ASSE**, St. Joseph. V. 18, p293-298. 1975.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>> Acesso em: 20 ago. 2014.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Estatística e Geografia. Disponível em <<http://www.ipece.ce.gov.br>>. Acesso em 17 ago. de 2014.

KARMELI, D. & ORON, G. Analysis of closed conduit irrigation system and its subdivision. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v.105, n.2, p187-96, 1969.

LABADIE, J. W. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130(2), p.93-111, 2004.

LABADIE, J. W. Reservoir System Optimization Models. In: LABADIE, J. W. **Decision Support Systems Applied to Water Resources Engineering**. São Paulo, Brasil, 1998. p.83-110.

LANNA, A. E. L. Introdução. In: **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos**. Porto Alegre. Editora da Universidade / UFRGS – ABRH, p.15-41, 1997.

LANZER, E.A. **Programação linear; conceitos e aplicações**. 2.ed. Rio de Janeiro, IPEA/INPES, 1988. 270p.

LIMA, G. P. B., AGUIAR, J. V., COSTA, R. N. T. **Rendimento de cultivares de caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) submetidas a diferentes lâminas de irrigação**. Revista Irriga, Botucatu, SP, v.4, n.3, 1999.

LIMA, H. V. C., LANNA, A. E. L. Modelos para operação de sistemas de reservatórios: atualização do estado da arte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n. 3, p.5-22, 2005.

LIMA, C. A.G.; CURI, W. F.; CURI, R. C. Reativação do Perímetro Irrigado de Gravatá: Uma abordagem otimizante sobre agricultura irrigada e sustentabilidade hídrica **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.157-165, 2008.

LYRA, G. B., PONCIANO, N. J., SOUSA, E. F., BERNARDO, S., DAHER, R. F., PEREIRA, M. G., MARINHO, A. B. **Estimativa dos níveis ótimos e econômicos de irrigação no mamoeiro (*Carica papaya* L.) cultivar Golden nas condições do norte do Espírito Santo**. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, SP, v.30, n.2, p. 390-395, Junho 2008.

LOUCKS, D. P., STEDINGER, J. R., HAITH, D. A. **Water resource systems planning and analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981.

LUCENA, K. F. M.; GALVÃO, C. O.; GOMES, H. P. Dimensionamento de sistemas de microirrigação através de programação não linear considerando-se diferentes demandas hídricas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n. 2, p. 252-260, 2006.

LUCENA, K. F. M. **Modelo de otimização para o dimensionamento e operação de sistemas de microirrigação** 187 f. Teses (Doutorado em Recursos Naturais e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2003.

LUCENA, K. F. M., MATOS, J. A. Análise econômica em sub-unidades de irrigação localizada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, 2001. Foz do Iguaçu, PR: **Anais** Associação Brasileira de Engenharia Agrícola.

LUENBERGER, D. G., **Introduction to Linear and Nonlinear Programming**. Addison-Wesley, London 1973.

MAGALHÃES, G.P ; LOPES, M.A.; **Análise da rentabilidade da terminação de bovinos de corte em condições de confinamento: um estudo de caso**. Arq. Bras. Med. Vet. Zootec., v.57, n.3, 374-379, 2005.

MAGALHÃES, C. A. **Análise econômica da pecuária leiteira em competição com outros empreendimentos agropecuários, através da programação linear, Zona da Mata de Minas Gerais**, Viçosa. UFV. 1971, 1965p. (Tese de mestrado).

MAINÍÉ, P. **Cálculo económico en agricultura; aplicacion de los programas lineals y de juegos**. Zaragoza: Acribia, 1969. 192p.

MAINUDDIN, N. M., Das GUPTA, A. ONTA, P. R. Optimal crop planning model for an existing groundwater irrigation project in Thailand. **Agricultural water management**. Amsterdam, n. 33, p. 43-62, 1997.

MAHER, M. **Contabilidade de custos: criando valor para a administração**. São Paulo: Atlas, 2001.

MANNOCCI, F., MECARELLI, P. Optimization analysis of deficit irrigation systems. **Journal of irrigation and drainage engineering**, New York, v. 120, n. 3, p. 484-503, 1994.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. atual. e ampl. Viçosa, UFV. 2009. 355p.

MARTINS, Eliseu. **Contabilidade de custos**. 9. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2003.

MARINO, M.; KEMPER, K.E. **Institutional framework in successful water markets: Brazil, Spain, and Colorado, USA**. Washington: The World Bank. (Technical Paper, 427), 1999.

MARQUES, P. A. A.; FRIZZONE, J. A.; CAIXETA FILHO, J. V.; Estudo de ocupação econômica em área agrícola na região de Piracicaba – SP, incluindo riscos através de programação linear. **Bioscience Journal**, v.25, p.30-41, 2009.

MARTINS, D. P. **Resposta do maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis* Sims var. *flavicarpa*) a lâminas de irrigação e dose de nitrogênio e potássio**. 1998. 84 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, 1998.

MAASS, A. et al. **Desing of water resource systems**. Cambridge: Harvard University, 1962.

MATANGA, G.B.; MARIÑO, M. A. **Irrigation planning 1**. Cropping pattern. Water Resources Research, Washington, v. 15, n. 3, p. 672-678, 1979.

MATOS, J.A. **Aplicação da programação não linear para dimensionamento de projetos de irrigação localizada**. 2000. 89f. Tese (Doutorado) - UNESP, Botucatu, 2002.

MELLO JR., A.V. E BRAGA JR., B.P.F. Análise multiobjetivo aplicada a um sistema de produção agrícola. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol 1, no. 1, p.11- 27, 1996.

MELO, D. M. **Estudo da otimização do uso dos recursos hídricos dos açudes Bruscas, Cachoeira dos Alves, Saco de Nova Olinda, Canoas e Queimadas na bacia do Rio Piancó – PB**. 202 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2004.

MENEGATTI, A. L. A. C.; **Custo de produção para soja convencional e transgênica a luz das metodologias utilizadas pelos órgãos públicos no Brasil e nos Estados Unidos: um estudo para o estado do Mato Grosso do Sul**. 123 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2006.

MONTEIRO, R. O. C. **Função de resposta da cultura do meloeiro aos níveis de água e adubação nitrogenada no Vale do Curu, CE**. Fortaleza: UFC, 2004. 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Ceará, 2004).

MONTEIRO, R. N. F. **Modelo de programação não-linear para otimização do padrão de cultivo e retorno financeiro em áreas irrigadas** 74 p. Tese (Doutorado em agronomia: Irrigação e Drenagem) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2014.

MOORE, C. V. A general analytical framework for estimating the production function for crops using irrigation water, 1, J. **Farm Econ.** XLIII (4), p.876-888, 1961.

PANAGIDES, S. S. **Estudos sobre uma região agrícola: zona da mata de Minas Gerais.** IPEA/INEPS, Monografia n. 09, Rio de Janeiro. 1973.

OJIMA, A. L. R. O., MIGUEL, F. B., BÁRBARO, I. M.; TICELLI, M.; Custo rodoviário como ferramenta de gerenciamento logístico para o transporte de soja: o caso da rota Barretos-Santos¹. **Revista Informações Econômicas**, v. 37, n. 5, p.64-69, 2007.

OHLSSON, L. **Environment, Scarcity and Conflict – A Study of Malthusian Concerns.** PhD Thesis. Dept. of Peace and Development Research, University of Goteborg, 1999.

ORON, G. & KARMELI, D. Solid set irrigation system design using linear programming. **Water Resources Bulletin**, Urbana, 17(4):565-70, 1981.

ORON, G. & WALKER, W.R. Optimal design and operation of permanent irrigation systems. **Water Resources Research**, Washington, 17(1):11-7, 1981.

PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos Hídricos, Agricultura irrigada e Meio Ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n. 3, p. 465-473, 2000.

PAZ, V. P. S. et al. Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 404-408, 2002.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia: Goteo, microaspersión, exudación.** 2. ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 461p.1990.

PLEBAN, S.; AMORIM, I. An interactive computerized aid for the design of branching irrigating networks. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.24, n. 2, p. 358-61, 1981.

REGO FILHO, L. M. **Respostas do Abacaxizeiro “Pérola” a diferentes lâminas de irrigação no norte Fluminense.** 2002. 150 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, 2002.

ROBERTO, A. N., PORTO, R. L. L. Alocação da água entre múltiplos usos em uma bacia hidrográfica. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte – MG, 1999.

RICHETTI, A. **Custo de produção de mandioca industrial, safra. Dourados:** Embrapa Agropecuária Oeste, 5p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado técnico, 133), 2007.

RODRIGUES, J, A, L, **Plano ótimo de cultivo no Projeto de Irrigação Morada Nova, Ceará, utilizando programação linear.** 81 p Dissertação (Mestrado) UFC – Fortaleza – CE, DENA/UFC, 2000.

SAAD, J.C.C.; TOMAZELA, C.; PERES, J.G.; PERES, F.C.; FRIZZONE, J.A. Otimização de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando programação Linear. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 29(5):797-805. 1994.

SAAD, J.C.C.; FRIZZONE, J.A. Desing and management optimization of trickle irrigation system using nonlinear programming. **Journal of Agricultural Engineerring Research**, v.64, p. 109-118, 1996.

SAAD, J.C.C. **Modelos de programação linear e não linear para otimização do dimensionamento e operação de sistemas de irrigação localizada**. 2002. 129f. Tese (Livre-docência) - UNESP, Botucatu, 2002.

SAAD, J.C.C.; MARIÑO, M. A. Optimum desing of microirrigation systems in-sloping lands. **Journal of Irrigation and Drainaige Engineering**, v.128, n.2 p.116-24, 2002.

SANTOS, M. A. L. **Modelo de programação linear para otimização econômica do projeto de irrigação Baixo Acaraú – CE**. 91 p Dissertação (Mestrado) UFC – Fortaleza – CE, DENA/UFC, 2002

SANTOS, M. A. L. et al. Modelo de programação linear para otimização econômica do projeto de irrigação Baixo Acaraú – CE. **Caatinga**, Mossoró, v.22, n.1, p.06-19, 2009.

SANTOS JÚNIOR, J. L. C. **Otimização do uso da água no Perímetro Irrigado Formoso utilizando a técnica da programação linear**. 2011. 127f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – ESALQ/Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SCHARDONG, A.; MÉLLO JÚNIOR, A. V.; ROBERTO, A. N.; PORTO, R. L. L. Desempenho do modelo acquanetxl na alocação de água em sistemas de recursos hídricos complexos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v.29, p.705-715, 2009.

SCHONWALD, C.; SAMPAIO, S. C.; SATO, M.; FRIGO, E. P.; SUSZEK, M.; FRIGO, J. P. Avaliação econômica de sistemas de irrigação em estabelecimentos rurais familiares na região oeste do Paraná. **Irriga**, v.13, p.128-138, 2008.

SIMONOVIC, S. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. **Journal Water Resources Planning and Management**, New York, v. 118, n. 3, p. 262-280, 1992.

SINHA, A. K.; RAO, B. V.; BISCHOF, C. H. Nonlinear optimization model for screening multipurpose reservoir systems. **Jornal of Water Resources Planning and Management**, v. 125, n 4. 1999.

SOARES, J. I. **Função de produção da melancia aos níveis de água e adubação nitrogenada no vale do Curu**. Fortaleza: UFC, 2000. 65p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Ceará, 2000).

SOUZA FILHO, F.A.; PORTO, R.L.L. Aprimoramento do processo de alocação de água de curto prazo no Ceará através da utilização da informação climática. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba. **Anais**. Curitiba: ABRH. 1 CD-ROM.

SUGAI, Y. **Planejamento básico de uma empresa agrícola pela programação linear**. Viçosa, UFV. 1976, 86p. (Tese de mestrado).

TAVARES, B. S. et al. Análise de risco e otimização de recursos hídricos e retorno financeiro em nível de fazenda. **Rev. Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 338–346, 2011.

TELLES, D. D. **Água na agricultura e pecuária**. In: Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. Escrituras Editora. São Paulo. p.305-336, 1999.

TRAVA, Y. J., HEERMAN, D. F. LABADIE, J. W. Optimal on-form allocation of irrigation water. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 20, n. 1, p 85-95. 1977.

TSAKIRIS, G., KIOUNTOUZIS, E. A model for the optimal operation of an irrigation system. **Agricultural water management**. Amsterdam, n. 5, p. 241-252. 1982.

TSAI, Y. J., JONES, J. W. MISHOE, J. W. Optimizing multiplecropping systems: approach. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 30, n. 6, p. 1554-1561, 1987.

TUNDISI, J. G. Recursos Hídricos no Século XXI. Nova Edição Ampliada e Atualizada. São Paulo: **Oficina de texto**, 2011. 328p.

TSUR, Y., DINAR, A. The Relative Efficiency and Implementation Costs of Alternative Methods for Pricing Irrigation Water. Washington, DC: **World Bank**, 1997. (World Bank Economic Review, v.11, n.2, p.243-262).

VALENCIA, J. C. **Programação linear para la formulación de planos de cultivos em los distritos de Riego de México**. Recursos Hidráulicos, México, v.4 m.4. 562-77. 1975.

VIEIRA, V.; CAMPOS, N.; STUDART, T. Análise de Risco. In: **Gestão de Águas: Princípios e Práticas**. 2. Ed. Porto Alegre: ABRH, 2003.

WOLF, A. T. **Hydropolitics Along the Jordan River: Scarce Water and its Impacts on the Arab-Israeli conflict**, New York: United Nations University Press, 1995.

YEH, W. W. G. Reservoir management and operations models: a state – of – the – art review. **Water Resources Research**, Washington. Vol. 21, nº 12, p.1797-1818, 1985.

WU, I-pai., LIANG, T. Optimal irrigation quantity and frequency. **Journal of the irrigation and Drainage Division**. New York, v.98, n.IR1, p.117-133. 1972.

WURBS, R. A. Reservoir-system simulation and optimization models. **Journal of Water Resources Planning and Management**. 119(4), p.455-472.1993.

YARON, D., BRESLER, E. Economic analyses of an-farm irrigation using response functions of crop. **Adv. Irrig.**, New York, v.2, p. 223-255. 1983.

ZOCOLER, J.L.; HERNANDEZ, F.B.T.; FRIZZONE, J.A.; COELHO, R.D. Análise dos custos de um sistema elevatório de água em função do diâmetro da tubulação de recalque e modalidade de aplicação das tarifas de energia elétrica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.4, n.3, p.53-67, Jul/Set 1999.

ZOCOLER, J.L.; BAGGIO FILHO, F.C.; OLIVEIRA, L.A.F.; HERNANDEZ, F.B.T. Modelo para determinação do diâmetro e velocidade de escoamento econômico em sistemas elevatórios de água. **Anais** do 3º Congresso Temático de Dinâmica e Controle da SBMAC. Ilha Solteira, 2004.

ANEXOS

ANEXO 01

Aplicação do modelo

Os dados de entrada utilizados na comparação entre os modelos desenvolvidos são referentes aos pomares de fruticultura do projeto de irrigação do Perímetro Irrigado Tabuleiro de Russas localizados nos municípios de Russas, Limoeiro do Norte e Morada Nova no Estado do Ceará.

Os preços estão em dólar americano e a cotação, na época do levantamento dos dados, foi de US\$ 1,0000 = R\$ 2,2195 (Julho – 2014).

1. Área

Para proceder a análise comparativa, utilizou-se uma área cultivada com fruticultura (banana), com dimensões de 252 m por 324 m (Figura 6), com declividade uniforme de 3% na direção do menor comprimento. As linhas de plantio estão em nível, na direção da maior dimensão (324 m). O espaçamento de 4,0 x 2,0 x 2,0 m e 6,0 x 4,0 m para o sistema de irrigação. A evapotranspiração de referência para o mês de maior demanda (outubro) foi de 5,97 mm.dia⁻¹ e o número de irrigações durante o ciclo (ou ano) de 245 dias. O volume anual de água aplicado por planta foi de 39.043,20 L.planta⁻¹.ano⁻¹.

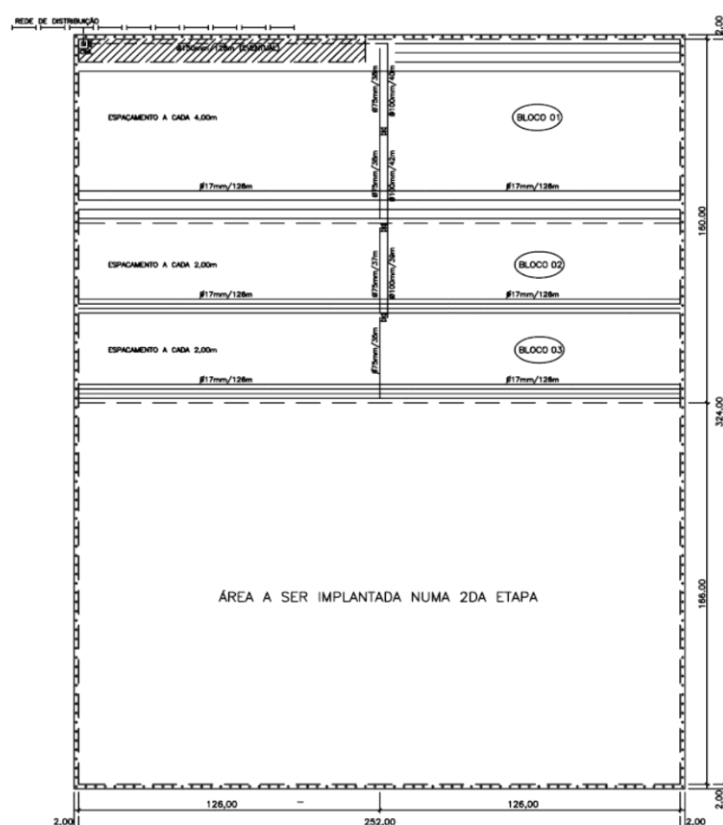


Figura 6: “Lay-out” da área a ser irrigada.

2. Emissor utilizado

Foi selecionado um microaspersor não-autocompensante cujas as características encontram-se no Quadro 4.

Quadro 4. Características do microaspersor.

Características	Microaspersor fixo (não autocompensante)
Pressão de operação (mca)	15,2
Vazão correspondente à pressão de operação (L.h ⁻¹)	48,0
Diâmetro molhado (m)	7,0
Coeficiente de variação de fabricação (CVF) - %	4,0
Relação vazão - pressão	$q = 13,5 \cdot h^{0,50}$ $R^2 = 0,99$
Preço unitário (US\$) US\$ 1,0000 = R\$ 2,2195	0,89

A representação gráfica da relação entre a vazão e a pressão no microaspersor selecionado encontra-se na Figura 7.

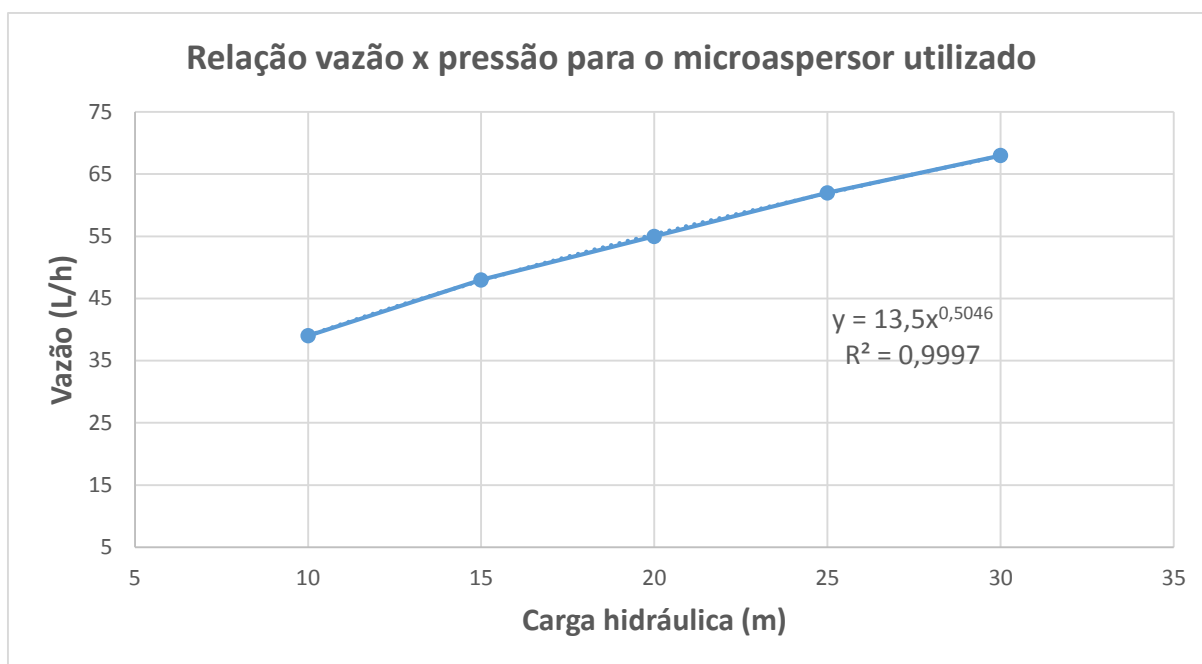


Figura 7. Relação entre vazão e pressão para o microaspersor utilizado.

3. Tubulação

As linhas são constituídas por tubo de polietileno linear cujas características na Tabela 12.

Tabela 12. Especificações dos tubos de polietileno.

Diâmetro Nominal (DN)	Diâmetro Interno (DI) (m)	Pressão Nominal (PN) (mca)	Preço (R\$/m)	Preço (US\$/m)
13	0,0130	40	0,49	0,22
16	0,0160	40	0,58	0,26
20	0,0206	40	0,89	0,40
26	0,0269	40	1,34	0,60
32	0,0310	40	1,85	0,83

DN = Diâmetro nominal; PN = Pressão Nominal; US\$ 1,0000 = R\$ 2,2195

Utilizando-se dados da Tabela 12 fez-se uma regressão para obtenção dos coeficientes C1 e C2 da eq. 39, cuja representação se encontra na Figura 8.

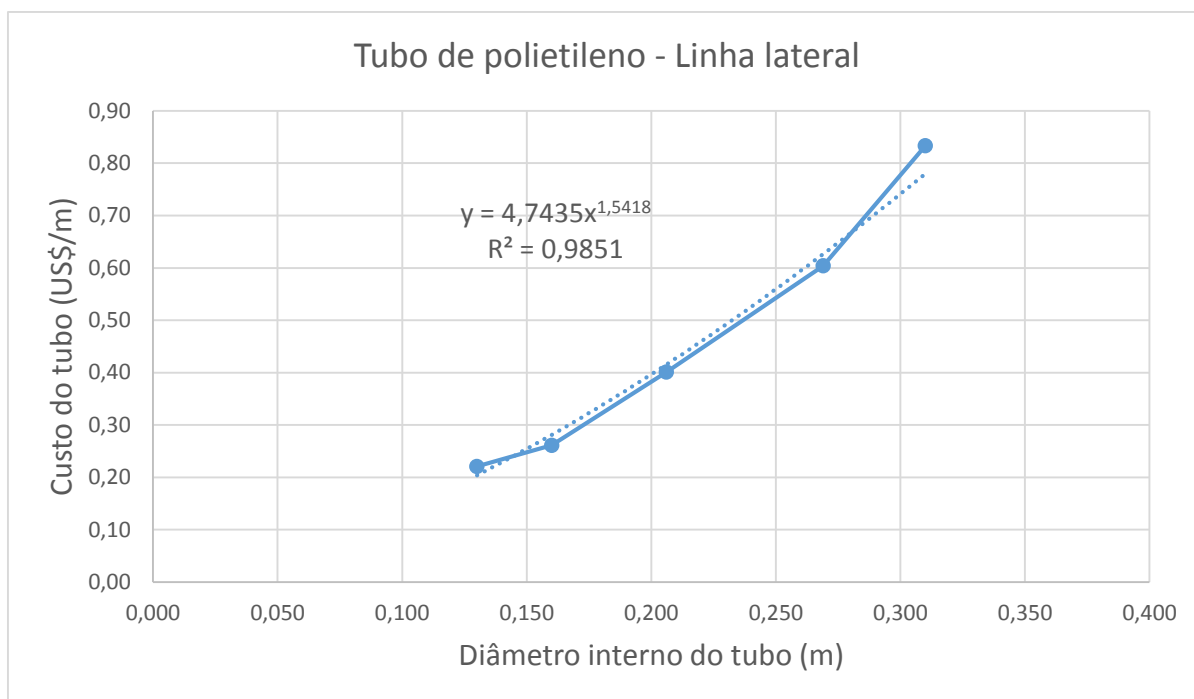


Figura 8. Regressão envolvendo custo do tubo de polietileno e seu diâmetro interno, para uso nas linhas laterais.

As linhas de derivação, secundária, auxiliar e principal são de PVC. Foram avaliadas duas classes de pressão 40 e 80 (40 mca e 80 mca, respectivamente).

Os tubos de classe 40 foram adotados nas linhas de derivação, sendo que suas especificações estão na Tabela 13.

Tabela 13. Especificações dos tubos de PVC de PN 40 (40 mca), do tipo bolsa e anel.

Diâmetro Nominal (DN)	Diâmetro Interno (DI) (m)	Preço (R\$/m)	Preço (US\$/m)
50	0,0481	2,72	1,23
75	0,0725	5,33	2,40
100	0,0976	8,48	3,82
125	0,1200	13,30	5,99
150	0,1440	17,43	7,85

DN = Diâmetro nominal; PN = Pressão Nominal; US\$ 1,0000 = R\$ 2,2195

Com os dados da Tabela 13, faz-se uma regressão para obtenção dos coeficientes C3 e C4 da eq. 40, cuja a representação se encontra na Figura 9.

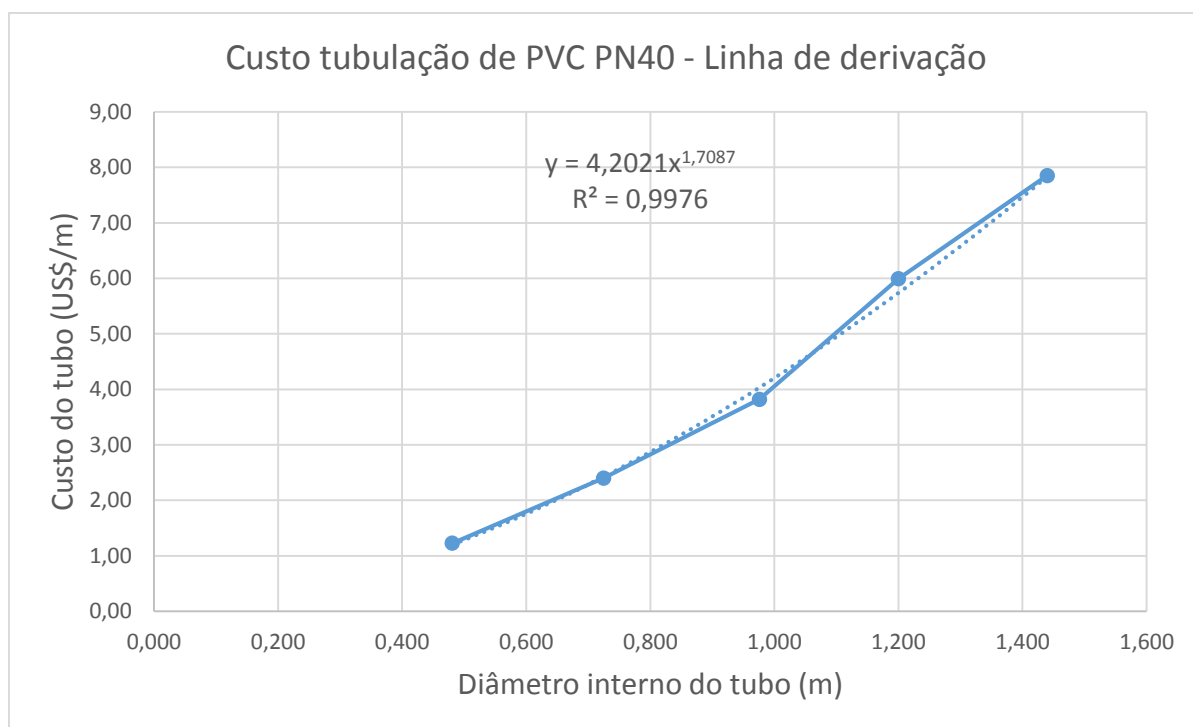


Figura 9. Regressão envolvendo custo do tubo de PVC PN40 e seu diâmetro interno, para uso nas linhas de derivação.

Os tubos de classe 80 foram empregados nas linhas secundária, auxiliar e principal, sendo que as especificações encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14. Especificações dos tubos de PVC de PN 80 (80 mca), do tipo bolsa e anel.

Diâmetro Nominal (DN)	Diâmetro Interno (DI)(m)	Preço (R\$/m)	Preço (US\$/m)
50	0,0467	4,07	1,83
75	0,0705	7,07	3,18
100	0,0944	14,12	6,36
125	0,1166	19,42	8,75
150	0,1400	26,48	11,93

DN = Diâmetro nominal; PN = Pressão Nominal; US\$ 1,0000 = R\$ 2,2195

Na Figura 10 tem-se a representação da regressão feita com os dados da Tabela 14. Neste caso, tal regressão é válida para tubos de PVC PN80 são empregados nas linhas secundária, auxiliar e principal.

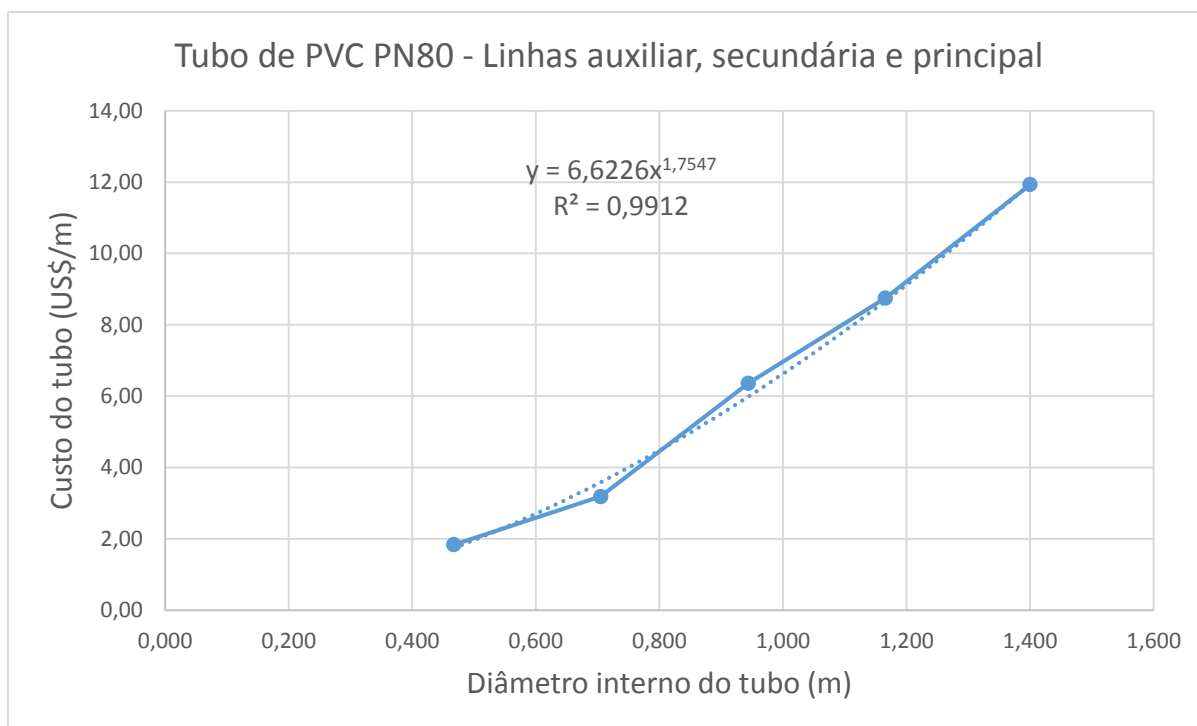


Figura 10. Regressão envolvendo custo do tubo de PVC PN80 e seu diâmetro interno, para uso nas linhas auxiliar, secundária e principal.

4. Painel de controle

O painel de controle é especificado em função do número de válvulas sob o seu comando, sendo que se utiliza uma válvula por unidade operacional (Tabela 15).

Tabela 15. Preço do painel de controle em função do número de unidades operacional

Unidades operacionais	Preço (R\$)	Preço (US\$)
4	1803,44	812,54
6	2616,33	1178,79
8	3391,68	1528,13
10	4384,60	1975,49
12	5245,52	2363,38
18	7787,78	3508,80

UO = Unidades operacionais; US\$ 1,0000 = R\$ 2,2195

Com os dados da Tabela 15 fez-se a regressão entre o custo do painel de controle e o número de unidades operacionais (Figura 11).

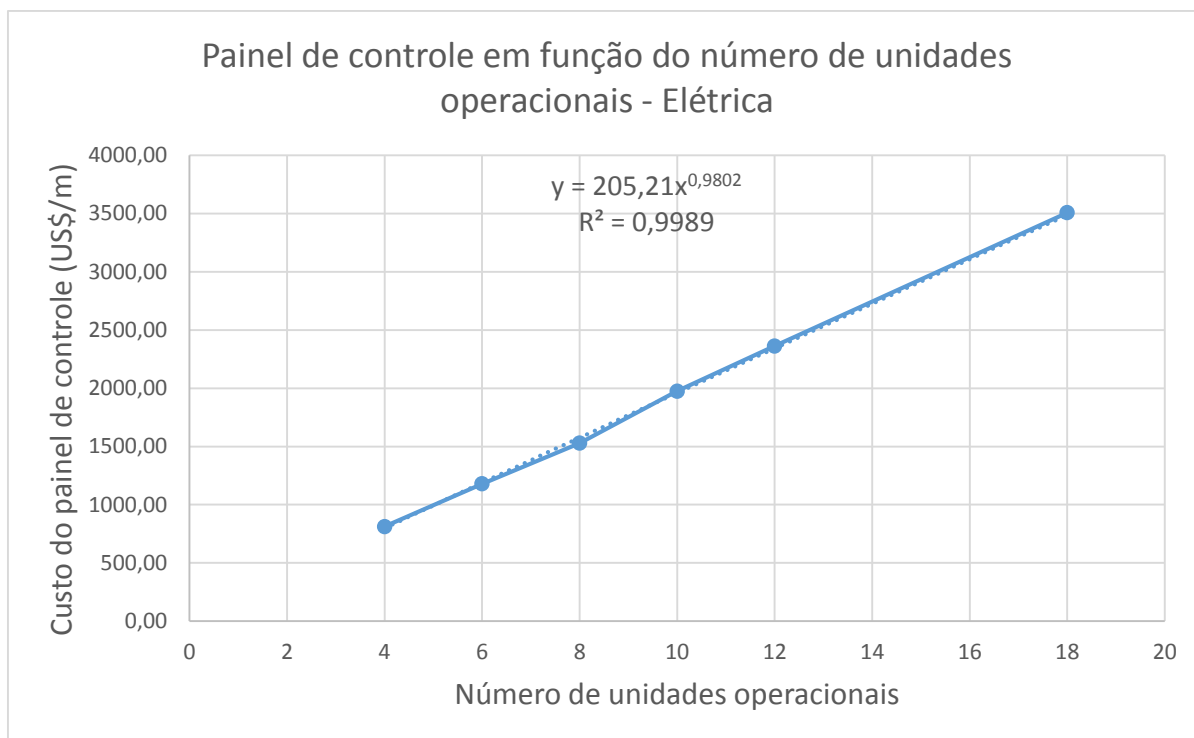


Figura 11. Regressão envolvendo custo do painel de controle e o número de unidades operacionais.

5. Sistema de filtragem

O sistema de filtragem considerado é composto por filtros de tela e válvulas de retrolavagem. O custo do sistema de filtragem foi dividido em duas faixas (Tabela 16).

Tabela 16. Sistema de filtragem

Filtros de disco 120 meche	Preço (R\$)	Preço (US\$)
2" - até 50 m ³ /h	833,03	375,32
3" - entre 50 e 100 m ³ /h	1649,34	743,11

FD = Filtro de disco; US\$ 1,0000 = R\$ 2,2195

6. Válvulas elétricas

Instaladas no início de cada unidade operacional e ligadas ao painel de controle, realizam a função de controle de operação e de regulação de pressão. Dois modelos foram selecionados, em função da faixa de operação (Tabela 17).

Tabela 17. Válvulas elétricas

Válvula do cavalete	Preço (R\$)	Preço (US\$)
2" - 6,0 - 42,0 m ³ /h	516,63	232,77
3" - 36,0 - 68,4 m ³ /h	815,89	367,60

VE = Válvula elétrica; US\$ 1,0000 = R\$ 2,2195

7. Conjunto motobomba

Para as faixas de vazão (em torno de 40 m³·h⁻¹) e de altura manométrica (entre 30 e 80 mca) em que se encontravam os sistemas de irrigação avaliados, foram suficientes dois modelos de bomba centrífuga e três modelos (Tabela 20).

Tabela 18. Conjunto motobomba trifásica

Modelo KSB	CV	Preço (R\$)	Preço (US\$)
40 - 125	3,0	1711,58	771,16
40 - 125	5,0	3578,58	1612,33
40 - 160	7,5	4386,31	1976,26
40 - 160	10,0	5827,97	2625,80
40 - 160	12,5	6748,17	3040,40
40 - 200	15,0	7326,63	3301,03
40 - 200	20,0	9921,85	4470,31

CV = Cavalo vapor; US\$ 1,0000 = R\$ 2,2195

Para se calcular o custo com o sistema de bombeamento, fez-se uma regressão envolvendo este custo (motobomba + conexões de sucção e recalque) e a potência instalada.

Para aplicação do modelo no projeto de irrigação utilizou-se uma unidade de bombeamento de 12,0 CV.

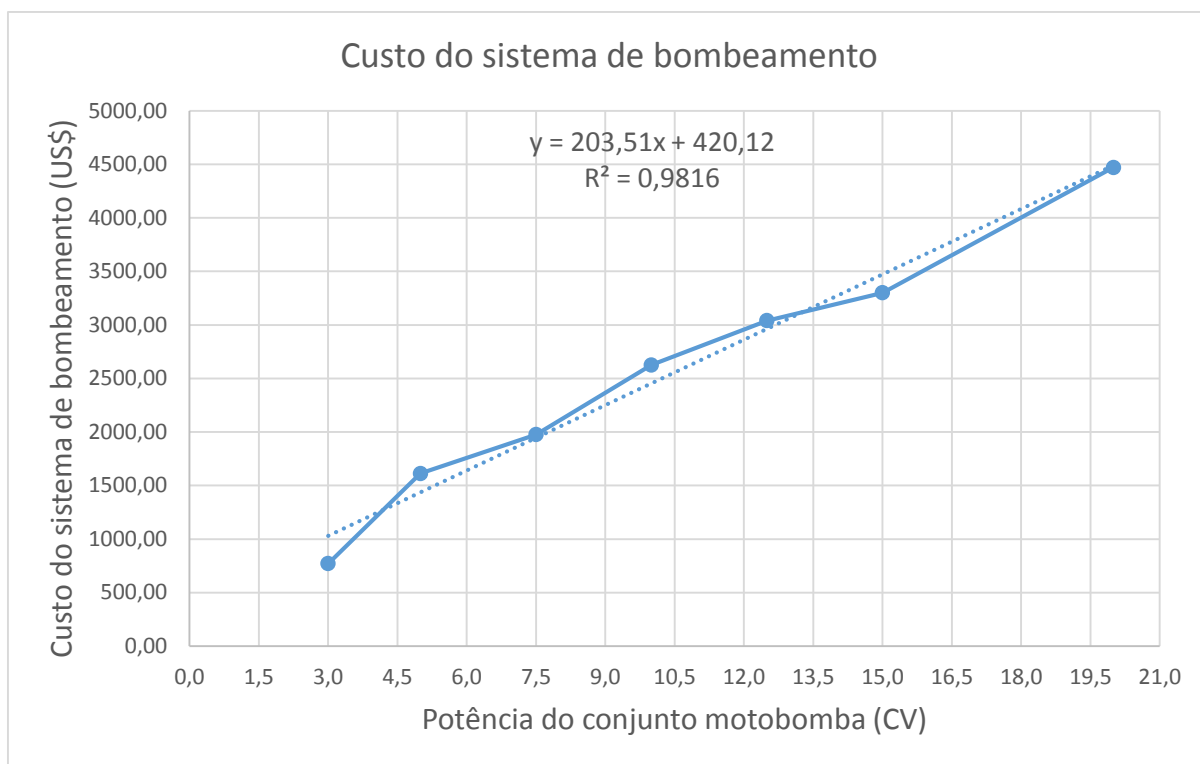


Figura 12. Representação gráfica da relação entre o custo do sistema de bombeamento e a potência requerida.

ANEXO 02

Listagem do Modelo de Programação Linear para Minimização dos Custos de implantação e operação de sistema de irrigação localizada (microaspersão) para a cultura da banana

*** Tese de doutorado: Wlisses Matos Maciel**

*** Modelo de Programação Linear – Minimização**

SETS

I diâmetro nominal tubo de pvc PN40 para linha de derivação /50,75,100,125/

G diâmetro nominal tubo de pvc PN40 /50,75,100,125,150/

F diâmetro nominal tubo de pvc PN80 /50,75,100,125,150/

J trechos da linha de derivação /1*11/

B(J) trechos da linha de derivação com 6m de comprimento /2*11/

SCALARS

N número de unidades operacionais /12/

NUOS número de unidades operacionais atuando simultaneamente /2/

IFR turno de irrigação /1/

NLL número de linhas laterais na unidade operacional /22/

NE número de emissores por linha lateral /14/

Cm custo unitário do microaspersor US\$ /0.89/

CL preço em US\$ por m de tubo de PE de 13mm da linha lateral /0.16/

L comprimento da linha lateral em m /54/

D comprimento da linha de derivação em m /63/

S comprimento da linha secundária em m /270/

AUX comprimento da linha auxiliar em m /126/

P comprimento da linha principal em m /63/

dz gradiente de declividade em m por m /0.03/

HFL perda de carga na linha lateral em mca /2.40/

He perda de carga na estação de controle em mca /12/

Hu altura geométrica de sucção em mca /3/

Hv perda de carga na válvula reguladora de pressão em mca /2/

hm carga hidráulica de operação do microaspersor em mca /15.2/

E custo da energia elétrica em US\$ por kwh /0.10356/

EE custo da energia elétrica em US\$ por kwh /0.027961/

DI dias de irrigação no ciclo /245/

HI horas de irrigação por dia /11.5/

HI1 horas de irrigação por dia /8.5/

EF rendimento do conjunto moto e bomba 70% /0.7/

FRC fator de recuperação de capital com juros de 12% aa e 10 anos vida útil /0.17698/

VL perda de carga permitida na linha de derivação em mca /2.40/

VV custo unitário da válvula elétrica da unidade operacional em US\$ /367.80/

PC custo em US\$ do painel de controle da 12 válvulas /2363.38/

W lâmina aplicada em mm ano /1462.65/

Cw custo da água em US\$ por 1000 m³ /0.13/

A área total /81648/

FI custo do sistema de filtragem /743.11/

Q vazão na saída da bomba em m³ por s /7.56E-03/

PARAMETERS

CD(I) preço em US\$ por m do tubo de pvc PN40

/50 1.23

75 2.40

100 3.82

125 5.99/

C40(G) preço em US\$ por m do tubo de pvc PN40

/50 1.23

75 2.40

100 3.82

125 5.99

150 7.85/

C80(F) preço em US\$ por m do tubo de pvc PN80

/50 1.83

75 3.18

100 6.36

125 8.75

150 11.93/

JLS(G) perda de carga em m por 100m da linha secundária PN40 com vazão Q

/50 0.816

75 0.116

100 0.028

125 0.010

150 0.004/

JLA(F) perda de carga em m por 100m da linha auxiliar PN80 com vazão Q

/50 0.9399

75 0.132

100 0.033

125 0.012

150 0.005/

JLP(F) perda de carga em m por 100m da linha principal PN80 com vazão 2Q

/50 3.161

75 0.446

100 0.111

125 0.040

150 0.017/

Table JD(J,I) perda de carga em m por 100m no trecho J da linha de derivação com diâmetro I

	50	75	100	125
1	0.8169245	0.1163498	0.0283455	0.0106233
2	0.6914246	0.0984755	0.0239909	0.0089913
3	0.5750019	0.0818942	0.0199513	0.0074773
4	0.4678994	0.0666402	0.0162351	0.0060846
5	0.3703964	0.0527534	0.0128520	0.0048166
6	0.2828200	0.0402804	0.0098132	0.0036778
7	0.2055622	0.0292770	0.0071326	0.0027136
8	0.1391077	0.0198123	0.0048267	0.0018090
9	0.0840832	0.0119755	0.0029175	0.0010934
10	0.0413572	0.0058903	0.0014350	0.0005378

11 0.0122957 0.0017512 0.0004266 0.0001599;

VARIABLES

LD(J,I) comprimento em m da tubulação de diâmetro i no trecho j da linha de derivação

LS(G) comprimento em m da linha secundária com diâmetros G

LA(F) comprimento em m da linha auxiliar com diâmetros F

LP(F) comprimento em m da linha principal com diâmetros F

CET custo em dólar com consumo de energia

CE1 custo em dólar com consumo de energia

CE2 custo em dólar com consumo de energia

MAN altura manométrica total por unidade operacional em mca

HMED carga hidráulica média na linha de derivação mca

HD(J) carga hidráulica nas saídas da linha de derivação em mca

HUO carga hidráulica mínima na entrada da UO antes das válvulas em mca

Ho carga hidráulica na saída da estação de controle em mca

H1 carga hidráulica no trecho 1 em mca

H2 carga hidráulica no trecho 2 em mca

H3 carga hidráulica no trecho 3 em mca

HFA perda de carga na linha auxiliar em mca

HFP perda de carga na linha principal em mca

HFD perda de carga na linha de derivação em mca

CB custo em dólar do conjunto motobomba para man entre 30 e 50 mca

HDo carga hidráulica na entrada na linha de derivação em mca

Z custo total do sistema de irrigação em dólar

POSITIVE VARIABLES HDo, HD, HFD, HMED, LD(J,I), LS(G), LA(F), LP(F), MAN,

Ho, H1, H2, H3, HUO, CET, CE1, CE2, CB;

EQUATIONS

FO Função objetivo

TRED1 trecho da derivada 1

TRED(J) trecho da derivada J

SEC linha secundária

AU linha auxiliar

PRI linha principal

EHD1 carga hidráulica do trecho 1 da linha derivada

EHD(J) carga hidráulica do trecho J da linha derivada

EHM carga hidráulica na saída da linha derivada

EHUO carga hidráulica mínima na da UO

EHDo carga hidráulica na entrada da linha de derivação

EHFD perda de carga na linha de derivação em mca

EMAN altura manométrica total por bloco operacional em mca

PN40 pressão nominal da tubulação de PN40

PN80 pressão nominal da tubulação de PN80

ECET custo em dólar com consume de energia

ECE1 custo em dólar com consume de energia

ECE2 custo em dólar com consume de energia

EHo carga hidráulica na saída da estação de controle em mca

EH1 carga hidráulica na linha principal em mca

EH2 carga hidráulica na linha auxiliar em mca

EH3 carga hidráulica na linha auxiliar em mca

ECB custo em dólar do conjunto motobomba para man em 30 e 60 mca

ECB1 altura manométrica máxima de 80 mca

ECB2 altura manométrica mínima de 40 mca

E1

E2

E3

E4

E5

E6

E7

E8

E9

E10

E11

E12

E13

E14

EVLOX(J) perda de carga permitida na linha de derivação do final ao início

EVL1(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 1

EVL2(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 2

EVL3(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 3

EVL4(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 4

EVL5(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 5

EVL6(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 6

EVL7(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 7

EVL8(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 8

EVL9(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 9

EVL10(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 10

EVL11(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 11

ELS linha secundária

ELA linha auxiliar

ELP linha principal;

TRED1.. $SUM((I), LD('1', I)) = E = 3.0;$

TRED(B(J)).. $SUM((I), LD(J, I)) = E = 6.0;$

E1.. $LD('1', '50') = E = 0;$

E2.. $LD('2', '50') = E = 0;$

E3.. $LD('3', '50') = E = 0;$

E4.. $LD('4', '50') = E = 0;$

E5.. $LD('5', '50') = E = 0;$

E6.. $LD('6', '50') = E = 0;$

E7.. $LD('7', '50') = E = 0;$

E8.. $LD('8', '50') = E = 0;$

E9.. $LD('10', '125') = E = 0;$

E10.. $LD('11', '125') = E = 0;$

E11.. $LS('50') = E = 0;$

E12.. $LA('50') = E = 0;$

E13.. $LP('50') = E = 0;$

E14.. $LP('75') = E = 0;$

EHD0.. $HDo = E = HUO - Hv;$

EHD1.. $HD('1') = E = HDo - 1.05 * SUM((I), (JD('1', I) / 100) * LD('1', I)) + 3.0 * dz;$

```

EHD(B(J)).. HD(J) =E= HD(J-1) - SUM((I),(JD(J,I)/100)*LD(J,I))*1.05+6.0*dz;
EVLOX(J).. HD(J) - HD0 =L= VL;
EVL1(J).. HD('1') - HD(J) =L= VL;
EVL2(J).. HD('2') - HD(J) =L= VL;
EVL3(J).. HD('3') - HD(J) =L= VL;
EVL4(J).. HD('4') - HD(J) =L= VL;
EVL5(J).. HD('5') - HD(J) =L= VL;
EVL6(J).. HD('6') - HD(J) =L= VL;
EVL7(J).. HD('7') - HD(J) =L= VL;
EVL8(J).. HD('8') - HD(J) =L= VL;
EVL9(J).. HD('9') - HD(J) =L= VL;
EVL10(J).. HD('10') - HD(J) =L= VL;
EVL11(J).. HD('11') - HD(J) =L= VL;
EHM.. HMED =E= SUM(J,HD(J))/(NLL/2);
EHFD.. HFD =E= 1.05*(SUM((J,I),(JD(J,I)/100)*LD(J,I)));
SEC.. SUM((G),LS(G)) =E= S;
AU.. SUM((F),LA(F)) =E= AUX;
PRI.. SUM((F),LP(F)) =E= P;
EHUO.. HUO =E= (0.75*HFL) + hm + Hv + 0.63*SUM((J,I),(JD(J,I)/100)*LD(J,I))*1.05
+ (0.5*D*dz);
EMAN.. MAN =E= (0.75*HFL) + hm + Hv + (0.63*SUM((J,I),(JD(J,I)/100)*LD(J,I)) +
SUM((G),(JLS(G)/100)*LS(G)) + SUM((F),(JLA(F)/100)*LA(F)) +
SUM((F),(JLP(F)/100)*LP(F))*1.05) + (0.5*(D+P+AUX)*dz) + He + Hu;
ECB.. CB =E= (15.869*MAN)+1477.9;
ECB1.. MAN =L= 82;
ECB2.. MAN =G= 35;
PN80.. Ho =L= 80;
PN40.. H2 =L= 40;
ECET.. CET =E= CE1+CE2;
ECE1.. CE1 =E= ((9.80665*1.1*Q*MAN*N*DI*HI)/(NUOS*IFR*EF))*E;
ECE2.. CE2 =E= ((9.80665*1.1*Q*MAN*N*DI*HI1)/(NUOS*IFR*EF))*EE;
EHo.. Ho =E= MAN - He - Hu;
EH1.. H1 =E= Ho - P*dz - 1.05*SUM((F),(JLP(F)/100)*LP(F));
EH2.. H2 =E= H1 - AUX*dz - 1.05*SUM((F),(JLA(F)/100)*LA(F));
EH3.. H3 =E= H2 - 1.05*SUM((G),(JLS(G)/100)*LS(G));
ELS.. SUM((G),(JLS(G)/100)*LS(G)*1.05) =L= H2 - H3;
ELA.. SUM((F),(JLA(F)/100)*LA(F)*1.05) =L= H1 - H2;
ELP.. SUM((F),(JLP(F)/100)*LP(F)*1.05) =L= Ho - H1;
FO.. Z =E=
(((N*NLL*NE*Cm)+(N*NLL*L*CL)+(N*VV)+N*SUM((J,I),CD(I)*LD(J,I))+SUM((G)
,C40(G)*LS(G))+SUM((G),C40(G)*LS(G))+SUM((F),C80(F)*LA(F))+SUM((F),C80(F)*
LP(F)))+CB+PC+FI)*FRC+CET)*(10000/A)+(W*10*Cw/(0.9*24));
OPTION LIMROW = 200;
MODEL PLMIN /ALL/;
SOLVE PLMIN USING LP MINIMIZING Z;

```

ANEXO 03

Listagem do Modelo de Programação Não-Linear para Minimização dos Custos de implantação e operação de sistema de irrigação localizada (microaspersão) para a cultura da banana

*** Tese de doutorado: Wlisses Matos Maciel**

*** Modelo de Programação Não-Linear – Minimização**

SCALAR

NPE Número de plantas por ha /416/
 NE Número de emissores por planta /1/
 FR Frequência de irrigação /1/
 QE Vazão emissor em m³ s⁻¹ /1.3333E-5/
 EE Espaçamento entre grupo de emissores /4/
 EL Espaçamento entre linhas laterais /6/
 EA Eficiência de aplicação /0.90/
 TD Tempo disponível para irrigação por dia /20/
 TD1 Tempo disponível para irrigação por dia 1 /8.5/
 TD2 Tempo disponível para irrigação por dia 2 /11.5/
 CE Custo microaspersor em US\$ /0.89/
 FRC Fator de recuperação do capital /0.17698/
 LX Comprimento do campo na direção x em m /252/
 LY Comprimento do campo na direção y em m /324/
 A Área total em m² /81648/
 CKWH1 Custo unitário do kwh em US\$ /0.027961/
 CKWH2 Custo unitário do kwh em US\$ /0.10356/
 NBM Rendimento motobomba /0.70/
 DECX Declividade na direção x /0.03/
 DECY Declividade na direção y /0.00/
 CVF Coeficiente variação fabricação /0.02/
 HM Pressão de serviço em mca /13.5/
 QDISP Vazão disponível em m³ s⁻¹ /9.2E-3/
 HEC Perda de carga na estação de controle /15/
 HV Perda de carga na válvula /2/
 CW custo da água em US\$ por 1000 m³ /0.13/
 DI Número de dias de irrigação por ciclo /245/
 VARIABLES
 FO Função objetivo
 CSIS Parcial de CSIST
 CSIS1 Parcial CSIST
 CSIST Custo sistema irrigação
 CENET Custo anual com bombeamento (US\$.ano-1)
 CENE1 Custo anual com bombeamento (US\$.ano-1)
 CENE2 Custo anual com bombeamento (US\$.ano-1)
 CEB Custo estação de bombeamento (US\$)
 CVR Custo válvula e registros (US\$)
 CPC Custo painel de controle (US\$)

CEC Custo estação de controle(filtros)(US\$)
 FL f Christiansen para a linha lateral
 FDA f Christiansen para a linha derivação aclave
 FDD f Christiansen para a linha derivação declive
 FS f Christiansen para a linha secundária
 FA f Christiansen para a linha auxiliar
 FP f Christiansen para a linha principal
 LL Comprimento da linha lateral (m)
 LD Comprimento da linha de derivação (m)
 LDA Comprimento da linha de derivação em aclave (m)
 LDD Comprimento da linha de derivação em declive (m)
 LDD1 Comprimento da linha de derivação em declive (m)
 LS Comprimento da linha secundária (m)
 LA Comprimento da linha auxiliar (m)
 LP Comprimento da linha principal (m)
 TLL Comprimento total de linha lateral
 TLD Comprimento total de linha de derivação
 TLDA Comprimento total de linha de derivação aclave
 TLDD Comprimento total de linha de derivação declive
 TLS Comprimento total de linha secundária
 TLA Comprimento total de linha auxiliar
 TLP Comprimento total de linha principal
 HL Perda carga na linha lateral (mca)
 HD Perda de carga na linha de derivação (mca)
 HDA Perda carga na linha derivação em aclave (mca)
 HDD Perda carga na linha derivação em declive (mca)
 HS Perda de carga na linha secundária (mca)
 HA Perda carga na linha auxiliar (mca)
 HP Perda carga na linha principal (mca)
 DL Diâmetro da linha lateral (m)
 DD Diâmetro da linha de derivação (m)
 DS Diâmetro da linha secundária (m)
 DA Diâmetro da linha auxiliar (m)
 DP Diâmetro da linha principal (m)
 NGE Número de grupos de emissores na linha lateral
 NLL Número de saídas na linha de derivação
 NLLA Número de saídas na linha de derivação em aclave
 NLLD Número de saídas na linha de derivação em declive
 NLS Número de linhas secundárias
 NLA Número de linhas auxiliar
 NLP Número de linhas principal
 NSS Número de saídas na linha secundária
 NSA Número de saídas na linha auxiliar
 NSP Número de saídas na linha principal
 QL Vazão da linha lateral (l.h-1)
 QDA Vazão da linha de derivação em aclave (l.h-1)
 QDD Vazão da linha de derivação em declive (l.h-1)
 QS Vazão da linha secundária (l.h-1)
 QA Vazão da linha auxiliar (l.h-1)

QP Vazão da linha principal (l.h-1)
 QT Vazão total na saída da bomba (l.h-1)
 QUO Vazão da unidade operacional (l.h-1)
 HT Perda carga total (mca)
 HMIN Pressão mínima do microaspersor
 DHUO Perda de carga total na unidade operacional (mca)
 NUO Número total de unidades operacionais
 NUOS Número de unidades operacionais atuando simultaneamente
 VS Velocidade na linha secundária (m.s-1)
 VA Velocidade na linha auxiliar (m.s-1)
 VP Velocidade na linha principal (m.s-1)
 LUOX Comprimento na UO na direção x
 LUOY Comprimento na UO na direção y
 TE Total de emissores
 UE Uniformidade de emissão
 I Tempo de irrigação por unidade operacional
 AV Variável artificial
 JC Ponto de inserção;
 FREE VARIABLES FO;
 POSITIVE VARIABLES CSIS, CSIS1, CSIST, CENET, CENE1, CENE2, CEB, CVR,
 CPC, CEC, FL, FDA, FDD, FS, FA, FP, LL, LD, LDA, LDD, LDD1, LS, LA, LP, TLL,
 TLD, TLDA, TLDD, TLS, TLA, TLP, HL, HD, HDA, HDD, HS, HA, HP, DL, DD, DS,
 DA, DP, NGE, NLL, NLLA, NLLD, NLS, NLA, NLP, NSS, NSA, NSP, QL, QDA, QDD,
 QS, QA, QP, QT, QUO, HT, HMIN, DHUO, NUO, NUOS, VS, VA, VP, LUOX, LUOY,
 TE, UE, I, AV, JC;
 * LIMITES INFERIOR E SUPERIOR; VALOR INICIAL
 * CUSTO DOS COMPONENTES
 FO.LO = 700;
 CSIS.LO = 300;
 CSIS1.LO = 400;
 CSIST.LO = 500;
 CENET.LO = 700;
 CENE1.LO = 700;
 CENE2.LO = 700;
 CEB.LO = 1;
 CVR.LO = 1;
 CPC.LO = 1;
 CEC.LO = 1;
 * DIAMETRO DAS LINHAS
 DL.LO = 0.016; DL.UP = 0.016;
 DD.LO = 0.0481; DD.UP = 0.1440;
 DS.LO = 0.0481; DS.UP = 0.1440;
 DA.LO = 0.0467; DA.UP = 0.1400;
 DP.LO = 0.0467; DP.UP = 0.1400;
 * VAZÃO DAS LINHAS
 QL.LO = 1.3333E-5;
 QUO.LO = 2.7777E-4;
 QP.LO = 2.7777E-3;
 QT.LO = 2.7777E-3;

* COMPRIMENTO TOTAIS DAS LINHAS

TLD.LO = 100; TLD.L = 700; TLD.UP = 2000;

TLS.LO = 100; TLS.L = 300; TLS.UP = 10000;

* PERDA DE CARGA DAS LINHAS

* LATERAL

HL.LO = 0.01;

HD.LO = 0.01;

NGE.LO = 1; NGE.L = 13; NGE.UP = 20;

* DERIVADA EM ACLIVE

NLLA.LO = 1;

* DERIVADA EM DECLIVE

NLLD.LO = 1;

* DERIVADA

LDA.L = 1;

LDD.L = 1;

LDD1.L = 1;

* SECUNDÁRIA

HS.LO = 0.01;

FS.LO = 0.1;

NSS.LO = 1;

* AUXILIAR

HA.LO = 1;

FA.LO = 0.1;

NSA.LO = 1; NSA.UP = 4;

* PRINCIPAL

HP.LO = 0.01; HP.UP = 30;

FP.LO = 0.1;

NSP.LO = 1; NSP.L = 2;

* NÚMERO DE LINHAS

NLS.L = 1;

NLA.LO = 1; NLA.UP = 4;

NLP.LO = 1;

* OUTRAS VARIÁVEIS

HT.L = 55;

DHUO.LO = 2;

NUO.L = 1; NUO.UP = 12;

NUOS.LO = 1;

UE.LO = 0.9;

HMIN.LO = 11;

I.LO = 1; I.L = 12; I.UP = 20;

JC.LO = 0.59;

EQUATIONS

* CUSTOS DOS COMPONENTES

EFO Eq. da função objetivo

ECSIS Eq. CSIS - Emissores PE e PVC

ECSIS1 Eq. CSIS1 - Total

ECSIST Eq. custo do sistema de microaspersão

ECVR Eq. custo de válvulas e registros

ECPC Eq. custo de painel de controle

ECEC Eq. custo da estação de controle
 ECEB Eq. custo de estação de bombeamento
 ECENET Eq. custo da energia elétrica
 ECENE1 Eq. custo da energia elétrica
 ECENE2 Eq. custo da energia elétrica
 RTDISP Restrição referente ao tempo disponível
 RTDISP1 Restrição referente ao tempo disponível 1
 * LAY-OUT
 ETE Eq. total microaspersores
 ETLL Eq. comprimento total de linhas laterais
 ELL Eq. cálculo de LL
 ETLD Eq. comprimento total da linha de derivação
 ETLDA Eq. comprimento total da linha de derivação aclave
 ETLDD Eq. comprimento total da linha de derivação declive
 ELD Eq. cálculo de LD
 ELDA Eq. cálculo de LDA
 ELDD Eq. cálculo de LDD
 ELDD1 Eq. cálculo de LDD com JC
 ETLS Eq. comprimento total da linha secundária
 ELS Eq. cálculo de LS
 ETLA Eq. comprimento total da linha auxiliar
 ELA Eq. cálculo de LA
 ETLP Eq. comprimento total da linha principal
 ELP Eq. cálculo de LP
 RNUOS Restrição relativa ao NUOS
 ENLL Eq. cálculo de NLL
 ENLS Eq. cálculo de NLS
 ENLA Eq. cálculo de NLA
 ENLP Eq. cálculo de NLP
 ENSS Eq. cálculo de NSS
 ENSA Eq. cálculo de NSA
 ENSP Eq. cálculo de NSP
 ELUOX Eq. comprimento na UO na direção x
 ELUOY Eq. comprimento na UO na direção y
 * VAZÃO DAS LINHAS
 EQL Eq. cálculo de QL
 EQDA Eq. cálculo de QDA
 EQDD Eq. cálculo de QDAD
 EQS Eq. cálculo de QS
 EQA Eq. cálculo de QA
 EQP Eq. cálculo de QP
 EQT Eq. vazão total
 EQUO Eq. vazão da UO
 RQDISP Restrição quanto à vazão disponível
 * PERDA DE CARGA NA LINHA LATERAL
 EHL Eq. cálculo de HL
 EFL Eq. cálculo de FL
 ENGE Eq. cálculo de NGE

* PERDA DE CARGA NAS LINHAS DERIVADA, SECUNDÁRIA, AUXILIAR E PRINCIPAL

EHDA Eq. cálculo de HDA

EFDA Eq. cálculo de FDA

EHDD Eq. cálculo de HDD

EFDD Eq. cálculo de FDD

EHD Eq. cálculo de HD

EHS Eq. cálculo de HS

EFS Eq. cálculo de FS

EHA Eq. cálculo de HA

EFA Eq. cálculo de FA

EHP Eq. cálculo de HP

EFP Eq. cálculo de FP

* LIMITES DE VELOCIDADE NAS LINHA SECUNDÁRIA, AUXILIAR E PRINCIPAL

EVS Eq. cálculo de VS

EVA Eq. cálculo de VA

EVP Eq. cálculo de VP

RVS1 Restrição relativa a VS min

RVS2 Restrição relativa a VS max

RVA1 Restrição relativa a VA min

RVA2 Restrição relativa a VA max

RVP1 Restrição relativa a VP min

RVP2 Restrição relativa a VP max

* RESTRIÇÕES ASSOCIADAS A PRESSÃO

EJC Eq.ponto de inserção

EAV Eq. variável artificial

EHT Eq. cálculo da perda de carga total

EUE Eq. cálculo UE

RPRES Eq. cálculo de DHUO

RPRES1 1° restrição pressão na linha lateral

RPRES2 2° restrição pressão na linha lateral

RPRES3 1° restrição pressão na linha derivação em aclave

RPRES4 2° restrição pressão na linha derivação em aclave

RPRES5 Restrição quanto à variação pressão

RAREA Restrição quanto à área total;

* CUSTOS DOS COMPONENTES

EFO.. FO =E= ((CSIST*FRC)+CENET)*(10000/A);

ECSIS.. CSIS =E= ((CE*TE)+

(4.7435*(DL**1.5418)*TLL)+(4.202*(DD**1.708)*TLD)+(4.202*(DS**1.708)*(3*LS))
+(6.622*(DA**1.754)*LA)+(6.622*(DP**1.754)*LP));

ECSIS1.. CSIS1 =E= CVR+CPC+CEC+CEB;

ECSIST.. CSIST =E= CSIS+CSIS1;

ECEB.. CEB =E= 339.73*((2*QE*NE*NGE*NLL*NUOS)*(HM+HT)/(NBM))**0.9739;

ECENE1.. CENE1 =E= CKWH1*((10.787*QUO*HT*DI*TD1*NUO)/(NBM*FR));

ECENE2.. CENE2 =E= CKWH2*((10.787*QUO*HT*DI*TD2*NUO)/(NBM*FR));

ECENET.. CENET =E= CENE1+CENE2;

ECEC.. CEC =E= 314.02 + 12.26*QT;

ECPC.. CPC =E= 205.21*(NUO**0.9802);

ECVR.. CVR =E= 403.43*NUO;
 RTDISP.. (NUO*I)/(NUOS*FR) =L= TD;
 RTDISP1.. (NUO*I)/(NUOS*FR) =G= 18;
 * LAY-OUT
 ELL.. LL =E= (NGE-0.5)*EE;
 ELD.. LD =E= LDA + LDD;
 ELDA.. LDA =E= (NLLA-0.5)*EL\$(NLLA.L GE 1)+0\$(NLLA.L LT 1);
 ELDD.. LDD =E= (NLLD-0.5)*EL;
 ELDD1.. LDD =E= JC*LD;
 ELS.. LS =E= LY - (NGE*EE);
 ELA.. LA =E= 2*(NLL*EL);
 ELP.. LP =E= NLL*EL;
 ETLL.. TLL =E= NUO*NLL*EE*((2*NGE)-1);
 ETLD.. TLD =E= (NLL-1)*EL*NUO;
 ETLDA.. TLDA =E= (A/(2*NGE*EE))-(A/(4*NGE*EE*NLLA));
 ETLDD.. TLDD =E= (A/(2*NGE*EE))-(A/(4*NGE*EE*NLLD));
 ETLS.. TLS =E= (A/(4*NGE*EE))-((LY*NLLA*EL)/(4*EE*NGE));
 ETLA.. TLA =E= LX - (2*NLL*EL);
 ETLP.. TLP =E= LX - (3*NLL*EL);
 ENLL.. NLL =E= NLLA + NLLD;
 ENGE.. NGE =E= (LL/EE)+0.5;
 ENLA.. NLA =E= NSA;
 ENLP.. NLP =E= NSP;
 ENLS.. NLS =E= 3;
 ENSS.. NSS =E= NUO/(2*NLS);
 ENSA.. NSA =E= NLS/2;
 ENSP.. NSP =E= NSA;
 ETE.. TE =E= (A*NE)/(EE*EL);
 RNUOS.. NUOS =G= 2;
 ELUOX.. LUOX =E= NLL*EL;
 ELUOY.. LUOY =E= 2*NGE*EE;
 * VAZÃO DAS LINHAS
 EQL.. QL =E= NGE*QE;
 EQDA.. QDA =E= 2*NLLA*QL;
 EQDD.. QDD =E= 2*NLLD*QL;
 EQS.. QS =E= 2*QE*NE*NUOS*NLL*NGE/NLS;
 EQA.. QA =E= QE*NE*NUOS*NLL*NGE;
 EQP.. QP =E= 2*QA;
 EQT.. QT =E= QP;
 EQUO.. QUO =E= QA;
 RQDISP.. (2*QE*NE*NGE*NLL*NUOS)/UE =L= QDISP;
 * PERDA DE CARGA NA LINHA LATERAL
 EHL.. HL =E= 0.00081267*LL*(QL**1.75)*FL/(DL**4.75);
 EFL.. FL =E= ((0.72*NGE)+(0.28/NGE))/((2*NGE)-1);
 * PERDA DE CARGA NAS LINHAS DERIVADA, SECUNDÁRIA, AUXILIAR E PRINCIPAL
 EHDA.. HDA =E= 0.000789*LDA*(QDA**1.75)*FDA/(DD**4.75);
 EFDA.. FDA =E= ((0.72*NLLA)+(0.28/NLLA))/((2*NLLA)-1);
 EHDD.. HDD =E= 0.000789*LDD*(QDD**1.75)*FDD/(DD**4.75);

```

EFDD.. FDD =E= ((0.72*NLLD)+(0.28/NLLD))/((2*NLLD)-1);
EHD.. HD =E= 0.000789*(LDA+LDD)*((QDA+QDD)**1.75)*0.36/(DD**4.75);
EHS.. HS =E= 0.000789*LS*(QS**1.75)*FS/(DS**4.75);
EFS.. FS =E= ((0.72*NSS)+(0.28/NSS))/((2*NSS)-1);
EHA.. HA =E= 0.000789*LA*(QA**1.75)*FA/(DA**4.75);
EFA.. FA =E= ((0.72*NSA)+(0.28/NSA))/((2*NSA)-1);
EHP.. HP =E= 0.000789*LP*(QP**1.75)*FP/(DP**4.75);
EFP.. FP =E= ((0.72*NSP)+(0.28/NSP))/((2*NSP)-1);
* LIMITES DE VELOCIDADE NAS LINHA SECUNDÁRIA, AUXILIAR E
PRINCIPAL
EVS.. VS =E= 1.27324*(QS/(DS**2));
EVA.. VA =E= 1.27324*(QA/(DA**2));
EVP.. VP =E= 1.27324*(QP/(DP**2));
RVS1.. VS =G= 0.2;
RVS2.. VS =L= 2.0;
RVA1.. VA =G= 0.2;
RVA2.. VA =L= 2.0;
RVP1.. VP =G= 0.2;
RVP2.. VP =L= 2.0;
* RESTRIÇÕES ASSOCIADAS A PRESSÃO
EJC.. ((DECX*LD)/HD)-0.36*((DECX*LD)/HD)**1.57 =E= (JC)**2.75-(1-JC)**2.75;
EAV.. AV =E= 1 - JC;
EHT.. HT =E= 0.75*HL + HV + 0.75*HDA + HS + HA + HP + HEC +
(0.5*LDA*DECX) + (LA*DECX) + (LP*DECX);
EUE.. UE =E= (1-(1.27*CVF/(NE**0.50)))*(13.5*(HMIN**0.50))/(3600000*QE);
RPRES.. DHUO =E= 2.5*(HM-HMIN);
RPRES1.. HL+(LL*DECY) =G= 0.4*DHUO;
RPRES2.. HL+(LL*DECY) =L= 0.6*DHUO;
RPRES3.. HDA+(LDA*DECX) =G= 0.4*DHUO;
RPRES4.. HDA+(LDA*DECX) =L= 0.6*DHUO;
RPRES5.. HL+HDA+(LDA*DECX) =E= DHUO;
RAREA.. 2*NGE*NLL =E= A/(EE*EL*NUO);
MODEL NLMIN /ALL/;
SOLVE NLMIN MINIMIZING FO USING NLP;
SOLVE NLMIN MINIMIZING FO USING NLP;

```

ANEXO 04

Listagem do Modelo de Programação Linear Complementar ao Modelo de Programação Não-Linear para Minimização dos Custos de implantação e operação de sistema de irrigação localizada (microaspersão) para a cultura da banana

*** Tese de doutorado: Wlisses Matos Maciel**

*** Modelo de Programação Linear Complementar – Minimização**

SETS

I diâmetro nominal tubo de pvc PN40 para linha de derivação /50,75,100,125/

G diâmetro nominal tubo de pvc PN40 /50,75,100,125,150/

F diâmetro nominal tubo de pvc PN80 /50,75,100,125,150/

J trechos da linha de derivação em aclave /1*5/

B(J) trechos da linha de derivação em aclave com 6m de comprimento /2*5/

R trechos da linha de derivação em declive /1*7/

O(R) trechos da linha de derivação em declive com 6m de comprimento /2*7/

SCALARS

N número de unidades operacionais /12/

NUOS número de unidades operacionais atuando simultaneamente /2/

IFR turno de irrigação /1/

NLL número de linhas laterais na unidade operacional /22/

NE número de emissores por linha lateral /12/

Cm custo unitário do microaspersor US\$ /0.89/

CL preço em US\$ por m de tubo de PE de 13mm da linha lateral /0.16/

L comprimento da linha lateral em m /47.7/

D comprimento da linha de derivação em m /62/

NLLA número de linhas laterais em aclave /5/

NLLD número de linhas laterais em declive /7/

S comprimento da linha secundária em m /274/

AUX comprimento da linha auxiliar em m /137/

P comprimento da linha principal em m /68/

dz gradiente de declividade em m por m /0.03/

HFL perda de carga na linha lateral em mca /2.65/

He perda de carga na estação de controle em mca /12/

Hu altura geométrica de sucção em mca /3/

Hv perda de carga na válvula reguladora de pressão em mca /2/

hm carga hidráulica de operação do microaspersor em mca /13.3/

E custo da energia elétrica em US\$ por kwh /0.10356/

EE custo da energia elétrica em US\$ por kwh /0.027961/

DI dias de irrigação no ciclo /245/

HI horas de irrigação por dia /11.5/

HI1 horas de irrigação por dia /8.5/

EF rendimento do conjunto moto e bomba 70% /0.7/

FRC fator de recuperação de capital com juros de 12% aa e 10 anos vida útil /0.17698/

VL perda de carga permitida na linha de derivação em mca /4/

VV custo unitário da válvula elétrica da unidade operacional em US\$ /367.80/

PC custo em US\$ do painel de controle da 12 válvulas /2363.38/

W lâmina aplicada em mm ano /1462.65/

Cw custo da água em US\$ por 1000 m³ /0.13/

A área total /81648/

FI custo do sistema de filtragem /743.11/

Q vazão na saída da bomba em m³ por s /8.29E-03/

PARAMETERS

CD(I) preço em US\$ por m do tubo de pvc PN40

/50 1.23

75 2.40

100 3.82

125 5.99/

C40(G) preço em US\$ por m do tubo de pvc PN40

/50 1.23

75 2.40

100 3.82

125 5.99

150 7.85/

C80(F) preço em US\$ por m do tubo de pvc PN80

/50 1.83

75 3.18

100 6.36

125 8.75

150 11.93/

JLS(G) perda de carga em m por 100m da linha secundária PN40 com vazão Q

/50 0.816

75 0.116

100 0.028

125 0.010

150 0.004/

JLA(F) perda de carga em m por 100m da linha auxiliar PN80 com vazão Q

/50 0.9399

75 0.132

100 0.033

125 0.012

150 0.005/

JLP(F) perda de carga em m por 100m da linha principal PN80 com vazão 2Q

/50 3.161

75 0.446

100 0.111

125 0.040

150 0.017/

Table JDA(J,I) perda de carga em m por 100m no trecho J da linha de derivação em aclave com diâmetro I

	50	75	100	125
1	0.8469245	0.1463498	0.0583455	0.0406233
2	0.7214246	0.1284755	0.0539909	0.0389913
3	0.6050019	0.1118942	0.0499513	0.0374773
4	0.4978994	0.0966402	0.0462351	0.0360846
5	0.4003964	0.0827534	0.0428520	0.0348166;

Table JDD(R,I) perda de carga em m por 100m no trecho R da linha de derivação em declive com diâmetro I

	50	75	100	125
1	0.7869245	0.0863498	0.0000000	0.0000000
2	0.6614246	0.0684755	0.0000000	0.0000000
3	0.5450019	0.0518942	0.0000000	0.0000000
4	0.4378994	0.0366402	0.0000000	0.0000000
5	0.3403964	0.0227534	0.0000000	0.0000000
6	0.2528200	0.0102804	0.0000000	0.0000000
7	0.1755622	0.0000000	0.0000000	0.0000000;

VARIABLES

LDA(J,I) comprimento em m da tubulação de diâmetro i no trecho j da linha de derivação em aclave

LDD(R,I) comprimento em m da tubulação de diâmetro i no trecho r da linha de derivação em declive

LS(G) comprimento em m da linha secundária com diâmetros G

LA(F) comprimento em m da linha auxiliar com diâmetros F

LP(F) comprimento em m da linha principal com diâmetros F

CE custo em dólar com consumo de energia

MAN altura manométrica total por unidade operacional em mca

HMED carga hidráulica média na linha de derivação em aclave mca

HMED1 carga hidráulica média na linha de derivação em declive mca

HDA(J) carga hidráulica nas saídas da linha de derivação em aclave em mca

HDD(R) carga hidráulica nas saídas da linha de derivação em declive em mca

HUO carga hidráulica mínima na entrada da UO antes das válvulas em mca

Ho carga hidráulica na saída da estação de controle em mca

H1 carga hidráulica no trecho 1 em mca

H2 carga hidráulica no trecho 2 em mca

HFA perda de carga na linha auxiliar em mca

HFP perda de carga na linha principal em mca

HFD perda de carga na linha de derivação em mca

CB custo em dólar do conjunto motobomba para man entre 30 e 50 mca

HDo carga hidráulica na entrada na linha de derivação em mca

Z custo total do sistema de irrigação em dólar;

FREE VARIABLE Z;

POSITIVE VARIABLES HDo, HDA, HDD, HFD, HMED, LDA(J,I), LDD(R,I), LS(G),

LA(F), LP(F), MAN, Ho, H1, H2, HUO, CET, CE1, CE2, CB;

EQUATIONS

FO Função objetivo

TRED1 trecho da derivada 1

TRED(J) trecho da derivada J

TREC1 trecho da derivada 2

TREC(R) trecho da derivada R

SEC linha secundária

AU linha auxiliar

PRI linha principal

EHD1 carga hidráulica do trecho 1 da linha derivada em aclave

EHDA(J) carga hidráulica do trecho J da linha derivada

EHD2 carga hidráulica do trecho 1 da linha derivada em declive

EHDD(R) carga hidráulica do trecho R da linha derivada
 EHM carga hidráulica na saída da linha derivada em aclave
 EHM1 carga hidráulica na saída da linha derivada em declive
 EHM2 carga hidráulica na saída da linha derivada em regra
 EHUO carga hidráulica mínima na da UO
 EHDo carga hidráulica na entrada da linha de derivação
 EHDA perda de carga na linha de derivação em aclave em mca
 EHDD perda de carga na linha de derivação em declive em mca
 EMAN altura manométrica total por bloco operacional em mca
 PN40 pressão nominal da tubulação de PN40
 PN80 pressão nominal da tubulação de PN80
 ECET custo em dólar com consume de energia
 ECE1 custo em dólar com consume de energia
 ECE2 custo em dólar com consume de energia
 EHo carga hidráulica na saída da estação de controle em mca
 EH1 carga hidráulica na linha principal em mca
 EH2 carga hidráulica na linha auxiliar em mca
 ECB custo em dólar do conjunto motobomba para man em 30 e 60 mca
 ECB1 altura manométrica máxima de 80 mca
 ECB2 altura manométrica mínima de 40 mca
 EDA1
 EDA2
 EDA3
 EDA4
 EDA5
 EDD1
 EDD2
 EDD3
 EDD4
 EDD5
 EDD6
 EDD7
 E11
 E12
 E13
 E14
 EVLOX(J) perda de carga permitida na linha de derivação em aclave do final ao início
 EVLA1(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 1
 EVLA2(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 2
 EVLA3(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 3
 EVLA4(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 4
 EVLA5(J) perda de carga na linha de derivação no trecho 5
 EVLOX1(R) perda de carga permitida na linha de derivação em declive do final ao início
 EVLD1(R) perda de carga na linha de derivação no trecho 1
 EVLD2(R) perda de carga na linha de derivação no trecho 2
 EVLD3(R) perda de carga na linha de derivação no trecho 3
 EVLD4(R) perda de carga na linha de derivação no trecho 4
 EVLD5(R) perda de carga na linha de derivação no trecho 5
 EVLD6(R) perda de carga na linha de derivação no trecho 6

EVLD7(R) perda de carga na linha de derivação no trecho 7

ELS linha secundária;

TRED1.. $\text{SUM}((I), \text{LDA}(1', I)) = E = 3.0;$

TRED(B(J)).. $\text{SUM}((I), \text{LDA}(J, I)) = E = 6.0;$

EDA1.. $\text{LDA}(1', 100') = E = 0;$

EDA2.. $\text{LDA}(2', 100') = E = 0;$

EDA3.. $\text{LDA}(3', 100') = E = 0;$

EDA4.. $\text{LDA}(4', 100') = E = 0;$

EDA5.. $\text{LDA}(5', 100') = E = 0;$

TREC1.. $\text{SUM}((I), \text{LDD}(1', I)) = E = 3.0;$

TREC(O(R)).. $\text{SUM}((I), \text{LDD}(R, I)) = E = 6.0;$

EDD1.. $\text{LDD}(1', 100') = E = 0;$

EDD2.. $\text{LDD}(2', 100') = E = 0;$

EDD3.. $\text{LDD}(3', 100') = E = 0;$

EDD4.. $\text{LDD}(4', 100') = E = 0;$

EDD5.. $\text{LDD}(5', 100') = E = 0;$

EDD6.. $\text{LDD}(6', 100') = E = 0;$

EDD7.. $\text{LDD}(7', 100') = E = 0;$

E11.. $\text{LS}(50') = E = 0;$

E12.. $\text{LA}(50') = E = 0;$

E13.. $\text{LP}(50') = E = 0;$

E14.. $\text{LP}(75') = E = 0;$

EHD0.. $\text{HDo} = E = \text{HUO} - \text{Hv};$

EHD1.. $\text{HDA}(1') = E = \text{HDo} - 1.05 * \text{SUM}((I), (\text{JDA}(1', I)/100) * \text{LDA}(1', I)) + 3.0 * \text{dz};$

EHDA(B(J)).. $\text{HDA}(J) = E = \text{HDA}(J-1) - \text{SUM}((I), (\text{JDA}(J, I)/100) * \text{LDA}(J, I)) * 1.05 + 6.0 * \text{dz};$

EVLOX(J).. $\text{HDA}(J) - \text{HDo} = L = \text{VL};$

EVLA1(J).. $\text{HDA}(1') - \text{HDA}(J) = L = \text{VL};$

EVLA2(J).. $\text{HDA}(2') - \text{HDA}(J) = L = \text{VL};$

EVLA3(J).. $\text{HDA}(3') - \text{HDA}(J) = L = \text{VL};$

EVLA4(J).. $\text{HDA}(4') - \text{HDA}(J) = L = \text{VL};$

EVLA5(J).. $\text{HDA}(5') - \text{HDA}(J) = L = \text{VL};$

EHD2.. $\text{HDD}(1') = E = \text{HDo} - 1.05 * \text{SUM}((I), (\text{JDD}(1', I)/100) * \text{LDD}(1', I)) + 3.0 * \text{dz};$

EHDD(O(R)).. $\text{HDD}(R) = E = \text{HDD}(R-1) -$

$\text{SUM}((I), (\text{JDD}(R, I)/100) * \text{LDD}(R, I)) * 1.05 + 6.0 * \text{dz};$

EVLOX1(R).. $\text{HDD}(R) - \text{HDo} = L = \text{VL};$

EVLD1(R).. $\text{HDD}(1') - \text{HDD}(R) = L = \text{VL};$

EVLD2(R).. $\text{HDD}(2') - \text{HDD}(R) = L = \text{VL};$

EVLD3(R).. $\text{HDD}(3') - \text{HDD}(R) = L = \text{VL};$

EVLD4(R).. $\text{HDD}(4') - \text{HDD}(R) = L = \text{VL};$

EVLD5(R).. $\text{HDD}(5') - \text{HDD}(R) = L = \text{VL};$

EVLD6(R).. $\text{HDD}(6') - \text{HDD}(R) = L = \text{VL};$

EVLD7(R).. $\text{HDD}(7') - \text{HDD}(R) = L = \text{VL};$

EHM.. $\text{HMED} = E = \text{SUM}(J, \text{HDA}(J)) / (\text{NLLA});$

EHM1.. $\text{HMED1} = E = \text{SUM}(R, \text{HDD}(R)) / (\text{NLLD});$

EHM2.. $\text{HMED1} = L = 1.2 * \text{HMED};$

SEC.. $\text{SUM}((G), \text{LS}(G)) = E = S;$

AU.. $\text{SUM}((F), \text{LA}(F)) = E = \text{AUX};$

PRI.. $\text{SUM}((F), \text{LP}(F)) = E = P;$

```

EHUO.. HUO =E= (0.75*HFL) + hm + Hv +
0.63*SUM((J,I),(JDA(J,I)/100)*LDA(J,I))*1.05 + (0.5*20*dz);
EMAN.. MAN =E= (0.75*HFL) + hm + Hv + (0.63*SUM((J,I),(JDA(J,I)/100)*LDA(J,I))
+ SUM((G),(JLS(G)/100)*LS(G)) + SUM((F),(JLA(F)/100)*LA(F)) +
SUM((F),(JLP(F)/100)*LP(F))*1.05) + (0.5*(20+P+AUX)*dz) + He + Hu;
ECB.. CB =E= (15.869*MAN)+1477.9;
ECB1.. MAN =L= 82;
ECB2.. MAN =G= 35;
PN80.. Ho =L= 80;
PN40.. H2 =L= 40;
ECET.. CET =E= CE1+CE2;
ECE1.. CE1 =E= ((9.80665*1.1*Q*MAN*N*DI*HI)/(NUOS*IFR*EF))*E;
ECE2.. CE2 =E= ((9.80665*1.1*Q*MAN*N*DI*HI1)/(NUOS*IFR*EF))*EE;
EHo.. Ho =E= MAN - He - Hu;
EH1.. H1 =E= Ho - P*dz - 1.05*SUM((F),(JLP(F)/100)*LP(F));
EH2.. H2 =E= H1 - AUX*dz - 1.05*SUM((F),(JLA(F)/100)*LA(F));
ELS.. SUM((G),(JLS(G)/100)*LS(G))*1.05 =L= H1 - HUO;
FO.. Z =E=
(((N*NLL*NE*Cm)+(N*NLL*L*CL)+(N*VV)+N*(SUM((J,I),CD(I)*LDA(J,I))+SUM((
R,I),CD(I)*LDD(R,I)))+SUM((G),C40(G)*LS(G))+SUM((G),C40(G)*LS(G))+SUM((F),
C80(F)*LA(F))+SUM((F),C80(F)*LP(F)))+CB+PC+FI)*FRC+CET)*(10000/A)+(W*10*
Cw/(0.9*24));
OPTION LIMROW = 200;
MODEL PLMIN /ALL/;
SOLVE PLMIN USING LP MINIMIZING Z;

```

ANEXO 05

Listagem do Modelo de Programação Linear para Maximização da Renda Líquida de culturas irrigadas

*** Tese de doutorado: Wlisses Matos Maciel**

*** Modelo de Programação Linear – Maximização**

Set

i culturas /X1*X12/

j meses /M1*M12/

option decimals=2;

variable

Z função objetivo

X(i,j) quanto de área plantar da cultura i para a disponibilidade de água j

positive variable X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10, X11, X12;

equation

Funcao função objetivo

A1

A2

A3

A4

A5

A6

A7

A8

A9

A10

A11

A12

A13

A14

A15

A16

A17

A18

I1

I2

I3

I4

I5

I6

I7

I8

I9

I10

I11

I12;

A1.. $X1+X2+X5+X6+X7+X8 = L = 8.0;$
 A2.. $X1+X2+X3+X5+X6+X7+X8+X11 = L = 8.0;$
 A3.. $X1+X2+X3+X5+X6+X7+X8+X11 = L = 8.0;$
 A4.. $X1+X2+X3+X5+X6+X7+X8+X11 = L = 8.0;$
 A5.. $X1+X2+X5+X6+X7+X8 = L = 8.0;$
 A6.. $X1+X2+X5+X6+X7+X8 = L = 8.0;$
 A7.. $X1+X2+X5+X6+X7+X8 = L = 8.0;$
 A8.. $X1+X2+X4+X5+X6+X7+X8+X9+X10 = L = 8.0;$
 A9.. $X1+X2+X4+X5+X6+X7+X8+X9+X10+X12 = L = 8.0;$
 A10.. $X1+X2+X4+X5+X6+X7+X8+X9+X10+X12 = L = 8.0;$
 A11.. $X1+X2+X5+X6+X7+X8+X12 = L = 8.0;$
 A12.. $X1+X2+X5+X6+X7+X8 = L = 8.0;$
 A13.. $X1+X7 = L = 4.0;$
 A14.. $X2+X8 = L = 4.0;$
 A15.. $X5+X6 = L = 2.0;$
 A16.. $X9+X10 = L = 4.0;$
 A17.. $X3+X11 = L = 4.0;$
 A18.. $X4+X12 = L = 4.0;$
 I1..
 $107.31*X1+99.66*X2+0*X3+0*X4+47.51*X5+64.89*X6+104.29*X7+30.12*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 = L = 2053.40;$
 I2.. $0*X1+0*X2+0*X3+0*X4+0*X5+0*X6+0*X7+0*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 = L = 2053.40;$
 I3.. $0*X1+0*X2+0*X3+0*X4+0*X5+0*X6+0*X7+0*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 = L = 2053.40;$
 I4.. $0*X1+0*X2+0*X3+0*X4+0*X5+0*X6+0*X7+0*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 = L = 2053.40;$
 I5.. $0*X1+0*X2+0*X3+0*X4+0*X5+0*X6+0*X7+0*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 = L = 2053.40;$
 I6..
 $75.75*X1+70.60*X2+0*X3+0*X4+35.50*X5+47.20*X6+73.72*X7+23.80*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 = L = 2053.40;$
 I7..
 $125.62*X1+119.59*X2+0*X3+0*X4+78.52*X5+92.21*X6+123.25*X7+64.83*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 = L = 2053.40;$
 I8..
 $166.33*X1+159.18*X2+0*X3+150.80*X4+110.43*X5+126.68*X6+163.52*X7+94.18*X8+0*X9+0*X10+0*X11+0*X12 = L = 2053.40;$
 I9..
 $188.58*X1+180.53*X2+0*X3+274.91*X4+125.71*X5+143.98*X6+185.41*X7+107.43*X8+48.95*X9+97.69*X10+0*X11+217.20*X12 = L = 2053.40;$
 I10..
 $205.19*X1+196.45*X2+0*X3+299.04*X4+136.85*X5+156.72*X6+201.75*X7+116.98*X8+315.65*X9+358.03*X10+0*X11+263.99*X12 = L = 2053.40;$
 I11..
 $197.71*X1+189.28*X2+0*X3+0*X4+131.83*X5+150.98*X6+194.39*X7+112.68*X8+245.46*X9+179.07*X10+0*X11+263.99*X12 = L = 2053.40;$

I12..

$177.72 \cdot X_1 + 169.46 \cdot X_2 + 0 \cdot X_3 + 0 \cdot X_4 + 113.11 \cdot X_5 + 131.89 \cdot X_6 + 174.47 \cdot X_7 + 94.32 \cdot X_8 + 0 \cdot X_9 + 0 \cdot X_{10} + 0 \cdot X_{11} + 0 \cdot X_{12} = L = 2053.40;$

Funcao..Z =E= $2453.36 \cdot X_1 + 6740.30 \cdot X_2 + 2186.53 \cdot X_3 + 2186.53 \cdot X_4 + 4631.17 \cdot X_5 + 5773.00 \cdot X_6 + 4790.84 \cdot X_7 + 6080.80 \cdot X_8 + 9819.71 \cdot X_9 + 3020.54 \cdot X_{10} + 1510.21 \cdot X_{11} + 1510.21 \cdot X_{12};$

model PLMAX /ALL/;

option LP = CPLEX;

PLMAX.DICTFILE = 4;

PLMAX.OPTFILE =1;

solve PLMAX using LP maximizing Z;

ANEXO 06

Listagem do Modelo de Programação Não-Linear para Maximização da Renda Líquida de culturas irrigadas

*** Tese de doutorado: Wlisses Matos Maciel**

*** Modelo de Programação Linear – Maximização**

scalars

CP1 Custo de produção para a cultura 1 US\$ /11466.33/
 CP2 Custo de produção para a cultura 2 US\$ /18619.57/
 CP3 Custo de produção para a cultura 3 US\$ /3854.99/
 CP4 Custo de produção para a cultura 4 US\$ /3854.99/
 CP5 Custo de produção para a cultura 5 US\$ /12077.29/
 CP6 Custo de produção para a cultura 6 US\$ /10780.43/
 CP7 Custo de produção para a cultura 7 US\$ /19421.56/
 CP8 Custo de produção para a cultura 8 US\$ /19342.91/
 CP9 Custo de produção para a cultura 9 US\$ /22481.89/
 CP10 Custo de produção para a cultura 10 US\$ /12111.90/
 CP11 Custo de produção para a cultura 11 US\$ /4264.08/
 CP12 Custo de produção para a cultura 12 US\$ /4264.08/
 AT Área total da fazenda ha /8/
 VDJAN Volume de água disponível em janeiro mm /2053.440/
 VDFEV Volume de água disponível em fevereiro m3 /2053.440/
 VDMAR Volume de água disponível em março m3 /2053.440/
 VDABR Volume de água disponível em abril m3 /2053.440/
 VDMAI Volume de água disponível em maio m3 /2053.440/
 VDJUN Volume de água disponível em junho m3 /2053.440/
 VDJUL Volume de água disponível em julho m3 /2053.440/
 VDAGO Volume de água disponível em agosto m3 /2053.440/
 VDSET Volume de água disponível em setembro m3 /2053.440/
 VDOUT Volume de água disponível em outubro m3 /2053.440/
 VDNNOV Volume de água disponível em novembro m3 /2053.440/
 VDDEZ Volume de água disponível em dezembro m3 /2053.440/
 P1 Preço da cultura 1 US\$ kg-1 /0.6156/
 P2 Preço da cultura 2 US\$ kg-1 /0.6700/
 P3 Preço da cultura 3 US\$ kg-1 /3.1100/
 P4 Preço da cultura 4 US\$ kg-1 /3.1100/
 P5 Preço da cultura 5 US\$ kg-1 /1.0350/
 P6 Preço da cultura 6 US\$ kg-1 /1.800/
 P7 Preço da cultura 7 US\$ kg-1 /1.1000/
 P8 Preço da cultura 8 US\$ kg-1 /1.2000/
 P9 Preço da cultura 9 US\$ kg-1 /1.4320/
 P10 Preço da cultura 10 US\$ kg-1 /0.4200/
 P11 Preço da cultura 11 US\$ kg-1 /0.6800/
 P12 Preço da cultura 12 US\$ kg-1 /0.6800/

variables

RL Renda Líquida,

W1 Lâmina a ser aplicada na cultura 1
 W2 Lâmina a ser aplicada na cultura 2
 W3 Lâmina a ser aplicada na cultura 3
 W4 Lâmina a ser aplicada na cultura 4
 W5 Lâmina a ser aplicada na cultura 5
 W6 Lâmina a ser aplicada na cultura 6
 W7 Lâmina a ser aplicada na cultura 7
 W8 Lâmina a ser aplicada na cultura 8
 W9 Lâmina a ser aplicada na cultura 9
 W10 Lâmina a ser aplicada na cultura 10
 W11 Lâmina a ser aplicada na cultura 11
 W12 Lâmina a ser aplicada na cultura 12
 X1 área a ser cultivada com a cultura 1
 X2 área a ser cultivada com a cultura 2
 X3 área a ser cultivada com a cultura 3
 X4 área a ser cultivada com a cultura 4
 X5 área a ser cultivada com a cultura 5
 X6 área a ser cultivada com a cultura 6
 X7 área a ser cultivada com a cultura 7
 X8 área a ser cultivada com a cultura 8
 X9 área a ser cultivada com a cultura 9
 X10 área a ser cultivada com a cultura 10
 X11 área a ser cultivada com a cultura 11
 X12 área a ser cultivada com a cultura 12
 Y1 Produtividade da cultura 1 em função da água de irrigação
 Y2 Produtividade da cultura 2 em função da água de irrigação
 Y3 Produtividade da cultura 3 em função da água de irrigação
 Y4 Produtividade da cultura 4 em função da água de irrigação
 Y5 Produtividade da cultura 5 em função da água de irrigação
 Y6 Produtividade da cultura 6 em função da água de irrigação
 Y7 Produtividade da cultura 7 em função da água de irrigação
 Y8 Produtividade da cultura 8 em função da água de irrigação
 Y9 Produtividade da cultura 9 em função da água de irrigação
 Y10 Produtividade da cultura 10 em função da água de irrigação
 Y11 Produtividade da cultura 11 em função da água de irrigação
 Y12 Produtividade da cultura 12 em função da água de irrigação
 RL1 Renda líquida unitária da cultura 1
 RL2 Renda líquida unitária da cultura 2
 RL3 Renda líquida unitária da cultura 3
 RL4 Renda líquida unitária da cultura 4
 RL5 Renda líquida unitária da cultura 5
 RL6 Renda líquida unitária da cultura 6
 RL7 Renda líquida unitária da cultura 7
 RL8 Renda líquida unitária da cultura 8
 RL9 Renda líquida unitária da cultura 9
 RL10 Renda líquida unitária da cultura 10
 RL11 Renda líquida unitária da cultura 11
 RL12 Renda líquida unitária da cultura 12;
 free variables RL;

positive variables

W1,W2,W3,W4,W5,W6,W7,W8,W9,W10,W11,W12,X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8,X9,X10,X11,X12,Y1,Y2,Y3,Y4,Y5,Y6,Y7,Y8,Y9,Y10,Y11,Y12,RL1,RL2,RL3,RL4,RL5,RL6,RL7,RL8,RL9,RL10,RL11,RL12;

W1.LO = 1; W1.UP = 2000;

W2.LO = 1; W2.UP = 2000;

W3.LO = 1; W3.UP = 2000;

W4.LO = 1; W4.UP = 2000;

W5.LO = 1; W5.UP = 2000;

W6.LO = 1; W6.UP = 2000;

W7.LO = 1; W7.UP = 2000;

W8.LO = 1; W8.UP = 2000;

W9.LO = 1; W9.UP = 2000;

W10.LO = 1; W10.UP = 2000;

W11.LO = 1; W11.UP = 2000;

W12.LO = 1; W12.UP = 2000;

X1.LO = 0; X1.UP = 4;

X2.LO = 0; X2.UP = 4;

X3.LO = 0; X3.UP = 4;

X4.LO = 0; X4.UP = 4;

X5.LO = 0; X5.UP = 4;

X6.LO = 0; X6.UP = 4;

X7.LO = 0; X7.UP = 4;

X8.LO = 0; X8.UP = 4;

X9.LO = 0; X9.UP = 4;

X10.LO = 0; X10.UP = 4;

X11.LO = 0; X11.UP = 4;

X12.LO = 0; X12.UP = 4;

equations

ERL, EY1, EY2, EY3, EY4, EY5, EY6, EY7, EY8, EY9, EY10, EY11, EY12, RAJAN, RAFEV, RAMAR, RAABR, RAMAI, RAJUN, RAJUL, RAAGO, RASET, RAOUT, RANOV, RADEZ, RA13, RA14, RA15, RA16, RA17, RA18, RWJAN, RWFEV, RWMAR, RWABR, RWMAI, RWJUN, RWJUL, RWAGO, RWSET, RWOUT, RWNNOV, RWDEZ, ERL1, ERL2, ERL3, ERL4, ERL5, ERL6, ERL7, ERL8, ERL9, ERL10, ERL11, ERL12;

*maximização da receita líquida

ERL.. RL =E=

(RL1*X1)+(RL2*X2)+(RL3*X3)+(RL4*X4)+(RL5*X5)+(RL6*X6)+(RL7*X7)+(RL8*X8)+(RL9*X9)+(RL10*X10)+(RL11*X11)+(RL12*X12);

*função de resposta das culturas a água

EY1.. Y1 =E= (-506.687+0.905709*W1-0.000370675*W1**2)*1000;

EY2.. Y2 =E= (1E-5*(W2**2)-0.0304*W2+41.916)*10000;

EY3.. Y3 =E= (-0.061*W3**2+29.313*W3+2092.5)*1;

EY4.. Y4 =E= (-0.061*W4**2+29.313*W4+2092.5)*1;

EY5.. Y5 =E= (-5.1466E-8*W5**2+8.1133E-4*W5+2.7334)*10000;

EY6.. Y6 =E= (0.030*W6-31.94)*1000;

EY7.. Y7 =E= (-1.649117*10**(-4)*W7**2+4.651029*W7-233.133)*1000;

EY8.. Y8 =E= (2.3931+0.049058*W8-0.0000183*W8**2)*1000;

EY9.. Y9 =E= (-0.0379*W9**2+54.132*W9+5420.3)*1;

EY10.. $Y_{10} = E = (-1.1064 * W_{10}^2 + 503.89 * W_{10} + 2931.6) * 1$;
 EY11.. $Y_{11} = E = (-10472.43 + 112.10 * W_{11} - 0.1438 * W_{11}^2) * 1000$;
 EY12.. $Y_{12} = E = (-10472.43 + 112.10 * W_{12} - 0.1438 * W_{12}^2) * 1000$;

*restrições de terra

RAJAN.. $X_1 + X_2 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 = L = AT$;
 RAFEV.. $X_1 + X_2 + X_3 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_{11} = L = AT$;
 RAMAR.. $X_1 + X_2 + X_3 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_{11} = L = AT$;
 RAABR.. $X_1 + X_2 + X_3 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_{11} = L = AT$;
 RAMAI.. $X_1 + X_2 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 = L = AT$;
 RAJUN.. $X_1 + X_2 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 = L = AT$;
 RAJUL.. $X_1 + X_2 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 = L = AT$;
 RAAGO.. $X_1 + X_2 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} = L = AT$;
 RASET.. $X_1 + X_2 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{12} = L = AT$;
 RAOUT.. $X_1 + X_2 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{12} = L = AT$;
 RANOV.. $X_1 + X_2 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_{12} = L = AT$;
 RADEZ.. $X_1 + X_2 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 = L = AT$;
 RA13.. $X_1 + X_7 = L = 4.0$;
 RA14.. $X_2 + X_8 = L = 4.0$;
 RA15.. $X_5 + X_6 = L = 2.0$;
 RA16.. $X_9 + X_{10} = L = 4.0$;
 RA17.. $X_3 + X_{11} = L = 4.0$;
 RA18.. $X_4 + X_{12} = L = 4.0$;

*restrições de água

RWJAN..
 $X_1 * (0.0862 * W_1) + X_2 * (0.0841 * W_2) + X_3 * (0 * W_3) + X_4 * (0 * W_4) + X_5 * (0.0609 * W_5) + X_6 * (0.07095 * W_6) + X_7 * (0.0854 * W_7) + X_8 * (0.0468 * W_8) + X_9 * (0 * W_9) + X_{10} * (0 * W_9) + X_{11} * (0 * W_{11}) + X_{12} * (0 * W_{12}) = L = VDJAN$;
 RWFEV..
 $X_1 * (0 * W_1) + X_2 * (0 * W_2) + X_3 * (0 * W_3) + X_4 * (0 * W_4) + X_5 * (0 * W_5) + X_6 * (0 * W_6) + X_7 * (0 * W_7) + X_8 * (0 * W_8) + X_9 * (0 * W_9) + X_{10} * (0 * W_{10}) + X_{11} * (0 * W_{11}) + X_{12} * (0 * W_{12}) = L = VDFEV$;
 RWMAR..
 $X_1 * (0 * W_1) + X_2 * (0 * W_2) + X_3 * (0 * W_3) + X_4 * (0 * W_4) + X_5 * (0 * W_5) + X_6 * (0 * W_6) + X_7 * (0 * W_7) + X_8 * (0 * W_8) + X_9 * (0 * W_9) + X_{10} * (0 * W_{10}) + X_{11} * (0 * W_{11}) + X_{12} * (0 * W_{12}) = L = VDMAR$;
 RWABR..
 $X_1 * (0 * W_1) + X_2 * (0 * W_2) + X_3 * (0 * W_3) + X_4 * (0 * W_4) + X_5 * (0 * W_5) + X_6 * (0 * W_6) + X_7 * (0 * W_7) + X_8 * (0 * W_8) + X_9 * (0 * W_9) + X_{10} * (0 * W_{10}) + X_{11} * (0 * W_{11}) + X_{12} * (0 * W_{12}) = L = VDABR$;
 RWMAI..
 $X_1 * (0 * W_1) + X_2 * (0 * W_2) + X_3 * (0 * W_3) + X_4 * (0 * W_4) + X_5 * (0 * W_5) + X_6 * (0 * W_6) + X_7 * (0 * W_7) + X_8 * (0 * W_8) + X_9 * (0 * W_9) + X_{10} * (0 * W_{10}) + X_{11} * (0 * W_{11}) + X_{12} * (0 * W_{12}) = L = VDMAI$;
 RWJUN..
 $X_1 * (0.0609 * W_1) + X_2 * (0.05959 * W_2) + X_3 * (0 * W_3) + X_4 * (0 * W_4) + X_5 * (0.04554 * W_5) + X_6 * (0.05161 * W_6) + X_7 * (0.0604 * W_7) + X_8 * (0.0369 * W_8) + X_9 * (0 * W_9) + X_{10} * (0 * W_{10}) + X_{11} * (0 * W_{11}) + X_{12} * (0 * W_{12}) = L = VDJUN$;
 RWJUL..
 $X_1 * (0.1010 * W_1) + X_2 * (0.1009 * W_2) + X_3 * (0 * W_3) + X_4 * (0 * W_4) + X_5 * (0.1007 * W_5) + X_6 * (0.$

$1008*W6)+X7*(0.1010*W7)+X8*(0.1006*W8)+X9*(0*W9)+X10*(0*W10)+X11*(0*W11)+X12*(0*W12) =L=$ VDJUL;
 RWAGO..
 $X1*(0.1337*W1)+X2*(0.1343*W2)+X3*(0*W3)+X4*(0.1987*W4)+X5*(0.1416*W5)+X6*(0.1385*W6)+X7*(0.1339*W7)+X8*(0.1462*W8)+X9*(0*W9)+X10*(0*W10)+X11*(0*W11)+X12*(0*W12) =L=$ VDAGO;
 RWSET..
 $X1*(0.1516*W1)+X2*(0.1523*W2)+X3*(0*W3)+X4*(0.3622*W4)+X5*(0.16128*W5)+X6*(0.15744*W6)+X7*(0.1519*W7)+X8*(0.1667*W8)+X9*(0.0802*W9)+X10*(0.1539*W10)+X11*(0*W11)+X12*(0.3317*W12) =L=$ VDSET;
 RWOUT..
 $X1*(0.1649*W1)+X2*(0.16581*W2)+X3*(0*W3)+X4*(0.3940*W4)+X5*(0.1757*W5)+X6*(0.17136*W6)+X7*(0.1653*W7)+X8*(0.1816*W8)+X9*(0.5174*W9)+X10*(0.5640*W10)+X11*(0*W11)+X12*(0.2651*W12) =L=$ VDOUT;
 RWNNOV..
 $X1*(0.1589*W1)+X2*(0.15977*W2)+X3*(0*W3)+X4*(0*W4)+X5*(0.16914*W5)+X6*(0.16509*W6)+X7*(0.1592*W7)+X8*(0.1749*W8)+X9*(0.4023*W9)+X10*(0.2821*W10)+X11*(0*W11)+X12*(0.4032*W12) =L=$ VDNNOV;
 RWDEZ..
 $X1*(0.1428*W1)+X2*(0.14303*W2)+X3*(0*W3)+X4*(0*W4)+X5*(0.14511*W5)+X6*(0.14421*W6)+X7*(0.1429*W7)+X8*(0.1464*W8)+X9*(0*W9)+X10*(0*W10)+X11*(0*W11)+X12*(0*W12) =L=$ VDDEZ;
 ERL1.. RL1 =E= (P1*Y1)-CP1;
 ERL2.. RL2 =E= (P2*Y2)-CP2;
 ERL3.. RL3 =E= (P3*Y3)-CP3;
 ERL4.. RL4 =E= (P4*Y4)-CP4;
 ERL5.. RL5 =E= (P5*Y5)-CP5;
 ERL6.. RL6 =E= (P6*Y6)-CP6;
 ERL7.. RL7 =E= (P7*Y7)-CP7;
 ERL8.. RL8 =E= (P8*Y8)-CP8;
 ERL9.. RL9 =E= (P9*Y9)-CP9;
 ERL10.. RL10 =E= (P10*Y10)-CP10;
 ERL11.. RL11 =E= (P11*Y11)-CP11;
 ERL12.. RL12 =E= (P12*Y12)-CP12;
 model tese /all/;
 solve tese using nlp maximizing RL;

ANEXO 07

Tabela 19 – Valores nominais do fluxo de caixa das culturas (US\$.ha⁻¹) período de 20 anos.

Culturas	Anos											Total
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 ao 19	
Abacaxi/Custo	7801,29	1041,39	7801,29	1041,39	7801,29	1041,39	7801,29	1041,39	7801,29	1041,39	44213,42	88426,83
Receita Bruta	0,00	14422,71	0,00	14422,71	0,00	14422,71	0,00	14422,71	0,00	14422,71	72113,54	144227,08
Receita Liquida	-7801,29	13381,32	-7801,29	13381,32	-7801,29	13381,32	-7801,29	13381,32	-7801,29	13381,32	27900,12	55800,25
Banana/Custo	8416,77	6857,79	7434,35	7434,35	7434,35	7434,35	7434,35	7434,35	7434,35	7434,35	74343,54	149092,92
Receita Bruta	4528,05	12074,79	15093,49	15093,49	15093,49	15093,49	15093,49	15093,49	15093,49	15093,49	150934,90	288285,65
Receita Liquida	-3888,72	5217,00	7659,14	7659,14	7659,14	7659,14	7659,14	7659,14	7659,14	7659,14	76591,36	139192,73
Feijão/Custo	1556,04	1550,06	1550,06	1550,06	1550,06	1550,06	1550,06	1550,06	1550,06	1550,06	15500,65	31007,27
Receita Bruta	3503,04	3503,04	3503,04	3503,04	3503,04	3503,04	3503,04	3503,04	3503,04	3503,04	35030,41	70060,82
Receita Liquida	1947,00	1952,98	1952,98	1952,98	1952,98	1952,98	1952,98	1952,98	1952,98	1952,98	19529,76	39053,55
Laranja/Custo	4067,68	3097,90	2896,75	4487,77	5121,63	5787,89	5787,89	5787,89	5787,89	5787,89	57878,89	106490,07
Receita Bruta	0,00	0,00	0,00	2027,48	3379,14	5406,62	15544,04	18652,85	18652,85	18652,85	186528,50	268844,33
Receita Liquida	-4067,68	-3097,90	-2896,75	-2460,29	-1742,49	-381,26	9756,15	12864,96	12864,96	12864,96	128649,61	162354,26
Limão/Custo	4013,15	2664,50	3022,23	3790,98	4411,11	5077,37	5077,37	5077,37	5077,37	5077,37	50773,65	94062,46
Receita Bruta	0,00	0,00	0,00	5676,95	8109,93	16219,87	16219,87	16219,87	16219,87	16219,87	162198,69	257084,93
Receita Liquida	-4013,15	-2664,50	-3022,23	1885,97	3698,82	11142,50	11142,50	11142,50	11142,50	11142,50	111425,04	163022,47
Mamão/Custo	10587,70	8433,94	3456,61	10587,70	8433,94	3456,61	10587,70	8433,94	3456,61	10587,70	75868,71	153891,17

Receita Bruta	4956,07	19824,28	12390,18	4956,07	19824,28	12390,18	4956,07	19824,28	12390,18	4956,07	131335,89	247803,56
Receita Líquida	-5631,63	11390,35	8933,56	-5631,63	11390,35	8933,56	-5631,63	11390,35	8933,56	-5631,63	55467,18	93912,39
Maracujá/Custo	8989,93	6427,50	8989,93	6427,50	8989,93	6427,50	8989,93	6427,50	8989,93	6427,50	77087,15	154174,31
Receita Bruta	8109,93	18923,18	8109,93	18923,18	8109,93	18923,18	8109,93	18923,18	8109,93	18923,18	135165,58	270331,16
Receita Líquida	-880,00	12495,68	-880,00	12495,68	-880,00	12495,68	-880,00	12495,68	-880,00	12495,68	58078,42	116156,85
Melão/Custo	9089,37	9089,37	9089,37	9089,37	9089,37	9089,37	9089,37	8249,98	9089,37	9089,37	90893,67	180947,96
Receita Bruta	18065,33	18065,33	18065,33	18065,33	18065,33	18065,33	18065,33	13372,38	18065,33	18065,33	180653,30	356613,65
Receita Líquida	8975,96	8975,96	8975,96	8975,96	8975,96	8975,96	8975,96	5122,40	8975,96	8975,96	89759,63	175665,69
Melancia/Custo	4872,36	4872,36	4872,36	4872,36	4872,36	4872,36	4872,36	4872,36	4872,36	4872,36	48723,55	97447,10
Receita Bruta	7569,27	7569,27	7569,27	7569,27	7569,27	7569,27	7569,27	7569,27	7569,27	7569,27	75692,72	151385,45
Receita Líquida	2696,92	2696,92	2696,92	2696,92	2696,92	2696,92	2696,92	2696,92	2696,92	2696,92	26969,17	53938,35
Milho/Custo	1715,35	1715,35	1715,35	1715,35	1715,35	1715,35	1715,35	1715,35	1715,35	1715,35	17153,47	34306,94
Receita Bruta	3063,75	3063,75	3063,75	3063,75	3063,75	3063,75	3063,75	3063,75	3063,75	3063,75	30637,53	61275,06
Receita Líquida	1348,41	1348,41	1348,41	1348,41	1348,41	1348,41	1348,41	1348,41	1348,41	1348,41	13484,06	26968,12

Fonte: AGROPOLOS-SEAGRI, EMATER/CEASA/SDR, IPECE, EMBRAPA, BANCO DO NORDESTE, DONOCS, DISTAR, Escritórios técnicos e produtores. Preços de 1995 a 2014 (Junho) 20 anos/mês, esperança estatística, atualização de ativos com base no IPCA-IPEAD, cotação do dólar para Jun/2014 do BACEN

ANEXO 08

Tabela 20 – Dados necessários ao cálculo da ETo pelo método de Penman-Montheith (2003 - 2013) Instituto Federal do Ceará IFCE/Campus Limoeiro do Norte; Altitude = 82m; Latitude (S) = 5° 37' 20"; Longitude (W) = 38° 07'08.

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura Máxima (°C)	34,72	33,53	33,01	32,19	31,70	31,02	32,34	33,72	35,29	35,82	35,76	32,34
Temperatura Mínima (°C)	24,60	23,55	22,61	22,33	21,96	21,27	20,63	20,27	20,45	21,19	21,57	22,11
Umidade Relativa (%)	68,79	74,69	78,63	82,37	79,40	84,29	68,93	63,43	59,92	61,16	62,39	64,46
Velocidade média do Vento (m/s)	6,28	5,98	5,67	5,38	5,34	5,55	5,99	6,26	6,65	6,61	6,67	6,47
Radiação Global (Tot. MJ/m2 dia)	16,71	16,37	18,60	17,03	16,74	15,68	15,92	18,24	20,69	20,39	19,04	18,16
Radiação Líquida (Tot. MJ/m2 dia)	10,26	10,81	12,12	11,74	11,00	9,02	8,96	8,84	9,77	9,80	9,47	8,35
Evapotranspiração de Referência (mm/mês)	208,6	157,9	151,6	137,1	141,4	140,4	164,3	195,0	219,3	238,4	229,8	225,4
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Precipitação (mm)	76,00	89,00	206,0	160,0	95,00	45,00	16,00	3,00	2,00	2,00	2,00	17,00
			0	0								
			138,1	119,0								
Precipitação Efetiva (mm)	66,76	76,33	0	4	80,56	41,76	15,59	2,99	1,99	1,99	1,99	16,54

ANEXO 09

Tabela 21 – Necessidade de água para a cultura do abacaxizeiro calculada com dados de ETo (2003 – 2013).

MESES	Eto (mm)	Kc	Etm (mm)	Kr	ETr (mm)	P.E. (mm)	N.I. (mm)	Ea	Lb (mm)
Janeiro	208,60	0,87	181,48	0,90	163,33	66,76	96,58	0,90	107,31
Fevereiro	157,90	0,87	137,37	0,90	123,64	76,33	47,31	0,90	52,57
Março	151,60	0,87	131,89	0,90	118,70	138,10	-19,40	0,90	-21,56
Abril	137,10	0,87	119,28	0,90	107,35	119,04	-11,69	0,90	-12,99
Mai	141,40	0,87	123,02	0,90	110,72	80,56	30,16	0,90	33,51
Junho	140,40	0,87	122,15	0,90	109,93	41,76	68,17	0,90	75,75
Julho	164,30	0,87	142,94	0,90	128,65	15,59	113,06	0,90	125,62
Agosto	195,00	0,87	169,65	0,90	152,69	2,99	149,70	0,90	166,33
Setembro	219,30	0,87	190,79	0,90	171,71	1,99	169,72	0,90	188,58
Outubro	238,40	0,87	207,41	0,90	186,67	1,99	184,67	0,90	205,19
Novembro	229,80	0,87	199,93	0,90	179,93	1,99	177,94	0,90	197,71
Dezembro	225,40	0,87	196,10	0,90	176,49	16,54	159,95	0,90	177,72

Tabela 22 – Necessidade de água para a cultura da bananeira calculada com dados de ETo (2003 – 2013).

MESES	Eto (mm)	Kc	Etm (mm)	Kr	ETr (mm)	P.E. (mm)	N.I. (mm)	Ea	Lb (mm)
Janeiro	208,60	1,00	208,60	0,75	156,45	66,76	89,69	0,90	99,66
Fevereiro	157,90	1,00	157,90	0,75	118,43	76,33	42,10	0,90	46,78
Março	151,60	1,00	151,60	0,75	113,70	138,10	-24,40	0,90	-27,11
Abril	137,10	1,00	137,10	0,75	102,83	119,04	-16,22	0,90	-18,02
Mai	141,40	1,00	141,40	0,75	106,05	80,56	25,49	0,90	28,32
Junho	140,40	1,00	140,40	0,75	105,30	41,76	63,54	0,90	70,60
Julho	164,30	1,00	164,30	0,75	123,23	15,59	107,63	0,90	119,59
Agosto	195,00	1,00	195,00	0,75	146,25	2,99	143,26	0,90	159,18
Setembro	219,30	1,00	219,30	0,75	164,48	1,99	162,48	0,90	180,53
Outubro	238,40	1,00	238,40	0,75	178,80	1,99	176,81	0,90	196,45
Novembro	229,80	1,00	229,80	0,75	172,35	1,99	170,36	0,90	189,28
Dezembro	225,40	1,00	225,40	0,75	169,05	16,54	152,51	0,90	169,46

Tabela 23 – Necessidade de água para a cultura do feijão verde para o mês de fevereiro calculada com dados de ETo (2003 – 2013).

MESES	Eto (mm)	Kc	Etm (mm)	Kr	ETr (mm)	P.E. (mm)	N.I. (mm)	Ea	Lb (mm)
Fevereiro	157,90	0,75	118,43	1,00	118,43	76,33	42,10	0,95	44,31
Março	151,60	1,20	181,92	1,00	181,92	138,10	43,82	0,95	46,12
Abril	137,10	1,20	164,52	1,00	164,52	119,04	45,48	0,95	47,87

Tabela 24 – Necessidade de água para a cultura do feijão verde para o mês de agosto calculada com dados de ETo (2003 – 2013).

MESES	Eto (mm)	Kc	Etm (mm)	Kr	ETr (mm)	P.E. (mm)	N.I. (mm)	Ea	Lb (mm)
Agosto	195,00	0,75	146,25	1,00	146,25	2,99	143,26	0,95	150,80
Setembro	219,30	1,20	263,16	1,00	263,16	1,99	261,17	0,95	274,91
Outubro	238,40	1,20	286,08	1,00	286,08	1,99	284,09	0,95	299,04

Tabela 25 – Necessidade de água para a cultura da laranjeira calculada com dados de ETo (2003 – 2013).

MESES	Eto (mm)	Kc	Etm (mm)	Kr	ETr (mm)	P.E. (mm)	N.I. (mm)	Ea	Lb (mm)
Janeiro	208,60	0,75	156,45	0,70	109,52	66,76	42,76	0,90	47,51
Fevereiro	157,90	0,75	118,43	0,70	82,90	76,33	6,57	0,90	7,30
Março	151,60	0,75	113,70	0,70	79,59	138,10	-58,51	0,90	-65,01
Abril	137,10	0,75	102,83	0,70	71,98	119,04	-47,06	0,90	-52,29
Mai	141,40	0,75	106,05	0,70	74,24	80,56	-6,33	0,90	-7,03
Junho	140,40	0,75	105,30	0,70	73,71	41,76	31,95	0,90	35,50
Julho	164,30	0,75	123,23	0,70	86,26	15,59	70,67	0,90	78,52
Agosto	195,00	0,75	146,25	0,70	102,38	2,99	99,39	0,90	110,43
Setembro	219,30	0,75	164,48	0,70	115,13	1,99	113,14	0,90	125,71
Outubro	238,40	0,75	178,80	0,70	125,16	1,99	123,17	0,90	136,85
Novembro	229,80	0,75	172,35	0,70	120,65	1,99	118,65	0,90	131,83
Dezembro	225,40	0,75	169,05	0,70	118,34	16,54	101,80	0,90	113,11

Tabela 26 – Necessidade de água para a cultura do limoeiro calculada com dados de ETo (2003 – 2013).

MESES	Eto (mm)	Kc	Etm (mm)	Kr	ETr (mm)	P.E. (mm)	N.I. (mm)	Ea	Lb (mm)
Janeiro	208,60	0,75	156,45	0,80	125,16	66,76	58,40	0,90	64,89
Fevereiro	157,90	0,75	118,43	0,80	94,74	76,33	18,41	0,90	20,46
Março	151,60	0,75	113,70	0,80	90,96	138,10	-47,14	0,90	-52,38
Abril	137,10	0,75	102,83	0,80	82,26	119,04	-36,78	0,90	-40,87
Mai	141,40	0,75	106,05	0,80	84,84	80,56	4,28	0,90	4,76
Junho	140,40	0,75	105,30	0,80	84,24	41,76	42,48	0,90	47,20
Julho	164,30	0,75	123,23	0,80	98,58	15,59	82,99	0,90	92,21
Agosto	195,00	0,75	146,25	0,80	117,00	2,99	114,01	0,90	126,68
Setembro	219,30	0,75	164,48	0,80	131,58	1,99	129,59	0,90	143,98
Outubro	238,40	0,75	178,80	0,80	143,04	1,99	141,05	0,90	156,72
Novembro	229,80	0,75	172,35	0,80	137,88	1,99	135,89	0,90	150,98
Dezembro	225,40	0,75	169,05	0,80	135,24	16,54	118,70	0,90	131,89

Tabela 27 – Necessidade de água para a cultura do mamoeiro calculada com dados de ETo (2003 – 2013).

MESES	Eto (mm)	Kc	Etm (mm)	Kr	ETr (mm)	P.E. (mm)	N.I. (mm)	Ea	Lb (mm)
Janeiro	208,60	1,10	229,46	0,70	160,62	66,76	93,86	0,90	104,29
Fevereiro	157,90	1,10	173,69	0,70	121,58	76,33	45,26	0,90	50,29
Março	151,60	1,10	166,76	0,70	116,73	138,10	-21,37	0,90	-23,74
Abril	137,10	1,10	150,81	0,70	105,57	119,04	-13,47	0,90	-14,97
Mai	141,40	1,10	155,54	0,70	108,88	80,56	28,32	0,90	31,46
Junho	140,40	1,10	154,44	0,70	108,11	41,76	66,35	0,90	73,72
Julho	164,30	1,10	180,73	0,70	126,51	15,59	110,92	0,90	123,25
Agosto	195,00	1,10	214,50	0,70	150,15	2,99	147,16	0,90	163,52
Setembro	219,30	1,10	241,23	0,70	168,86	1,99	166,87	0,90	185,41
Outubro	238,40	1,10	262,24	0,70	183,57	1,99	181,57	0,90	201,75
Novembro	229,80	1,10	252,78	0,70	176,95	1,99	174,95	0,90	194,39
Dezembro	225,40	1,10	247,94	0,70	173,56	16,54	157,02	0,90	174,47

Tabela 28 – Necessidade de água para a cultura do maracujazeiro calculada com dados de ETo (2003 – 2013).

MESES	Eto (mm)	Kc	Etm (mm)	Kr	ETr (mm)	P.E. (mm)	N.I. (mm)	Ea	Lb (mm)
Janeiro	208,60	0,75	156,45	0,60	93,87	66,76	27,11	0,90	30,12
Fevereiro	157,90	0,75	118,43	0,60	71,06	76,33	-5,27	0,90	-5,86
Março	151,60	0,75	113,70	0,60	68,22	138,10	-69,88	0,90	-77,65
Abril	137,10	0,75	102,83	0,60	61,70	119,04	-57,35	0,90	-63,72
Mai	141,40	0,75	106,05	0,60	63,63	80,56	-16,93	0,90	-18,81
Junho	140,40	0,75	105,30	0,60	63,18	41,76	21,42	0,90	23,80
Julho	164,30	0,75	123,23	0,60	73,94	15,59	58,34	0,90	64,83
Agosto	195,00	0,75	146,25	0,60	87,75	2,99	84,76	0,90	94,18
Setembro	219,30	0,75	164,48	0,60	98,69	1,99	96,69	0,90	107,43
Outubro	238,40	0,75	178,80	0,60	107,28	1,99	105,29	0,90	116,98
Novembro	229,80	0,75	172,35	0,60	103,41	1,99	101,42	0,90	112,68
Dezembro	225,40	0,75	169,05	0,60	101,43	16,54	84,89	0,90	94,32

Tabela 29 – Necessidade de água para a cultura do meloeiro para o mês de setembro calculada com dados de ETo (2003 – 2013).

MESES	Eto (mm)	Kc	Etm (mm)	Kr	ETr (mm)	P.E. (mm)	N.I. (mm)	Ea	Lb (mm)
Setembro	219,30	0,21	46,05	1,00	46,05	1,99	44,06	0,90	48,95
Outubro	238,40	1,20	286,08	1,00	286,08	1,99	284,09	0,90	315,65
Novembro	229,80	0,97	222,91	1,00	222,91	1,99	220,91	0,90	245,46

Tabela 30 – Necessidade de água para a cultura da melancia para o mês de setembro calculada com dados de ETo (2003 – 2013).

MESES	Eto (mm)	Kc	Etm (mm)	Kr	ETr (mm)	P.E. (mm)	N.I. (mm)	Ea	Lb (mm)
Setembro	219,30	0,41	89,91	1,00	89,91	1,99	87,92	0,90	97,69
Outubro	238,40	1,36	324,22	1,00	324,22	1,99	322,23	0,90	358,03
Novembro	229,80	0,71	163,16	1,00	163,16	1,99	161,16	0,90	179,07

Tabela 31 – Necessidade de água para a cultura do milho verde para o para o mês de fevereiro calculada com de dados de ETo (2003 – 2013).

MESES	Eto (mm)	Kc	Etm (mm)	Kr	ETr (mm)	P.E. (mm)	N.I. (mm)	Ea	Lb (mm)
Fevereiro	219,30	0,21	46,05	1,00	46,05	1,99	44,06	0,90	48,95
Março	238,40	1,20	286,08	1,00	286,08	1,99	284,09	0,90	315,65
Abril	229,80	0,97	222,91	1,00	222,91	1,99	220,91	0,90	245,46

Tabela 32 – Necessidade de água para a cultura do milho verde para o mês de setembro calculada com dados de ETo (2003 – 2013).

MESES	Eto (mm)	Kc	Etm (mm)	Kr	ETr (mm)	P.E. (mm)	N.I. (mm)	Ea	Lb (mm)
Setembro	219,30	0,95	208,34	1,00	208,34	1,99	206,34	0,95	217,20
Outubro	238,40	0,70	166,88	1,00	166,88	1,99	164,89	0,95	173,56
Novembro	229,80	1,10	252,78	1,00	252,78	1,99	250,79	0,95	263,99