

**AVALIAÇÃO DE MODELOS EMPÍRICOS
PARA ESTIMATIVA DAS PERDAS DE ÁGUA
POR EVAPORAÇÃO E ARRASTE EM
SISTEMAS DE ASPERSÃO CONVENCIONAL**

SAMUEL BESKOW

2006

SAMUEL BESKOW

**AVALIAÇÃO DE MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DAS
PERDAS DE ÁGUA POR EVAPORAÇÃO E ARRASTE EM SISTEMAS
DE ASPERSÃO CONVENCIONAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientadores:

Dr. Alberto Colombo (Orientador)

Dr. Geraldo Magela Pereira (Co-orientador)

**LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2006**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Beskow, Samuel

Avaliação de modelos empíricos para estimativa das perdas de água por evaporação e arraste em sistemas de aspersão convencional / Samuel Beskow. --
Lavras : UFLA, 2006.

94 p. : il.

Orientador: Alberto Colombo.
Dissertação (Mestrado) - UFLA.
Bibliografia.

1. Irrigação por aspersão. 2. Perdas de água. 3. Simulação. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.587

SAMUEL BESKOW

**AVALIAÇÃO DE MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DAS
PERDAS DE ÁGUA POR EVAPORAÇÃO E ARRASTE EM SISTEMAS
DE ASPERSÃO CONVENCIONAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 21 de julho de 2006.

Prof. Dr. Geraldo Magela Pereira

UFLA

Prof. Dr. Jarbas Honório de Miranda

ESALQ

Prof. Dr. Alberto Colombo
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

À minha esposa, Daniele, pelo amor e compreensão.
Aos meus pais, Gílson e Maria, pela educação e ensinamentos recebidos.
Aos meus irmãos, Michel e Raquel, e aos meus avós, Zilda, Ernesto (*in
memoriam*), Lili e Udo (*in memoriam*), pelo incentivo e amizade.
Aos meus sobrinhos, Pedro Henrique, João Antônio e Valentina, pela inspiração
e carinho.

OFEREÇO

À professora e amiga Angela Pinto Maestrini que, com sua dedicação e
profissionalismo ao ramo da Hidráulica, estimulou-me a trabalhar nesta área.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, por intermédio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Aos Professores Alberto Colombo e Geraldo Magela Pereira, pelos ensinamentos e pela valiosa orientação.

Ao Professor Jarbas Honório de Miranda, membro da banca examinadora, pelas sugestões e observações.

Aos professores do Departamento de Engenharia pelos ensinamentos.

Aos Professores Angela Pinto Maestrini e Alfredo Luís Mendes d'Ávila, da Universidade Federal de Pelotas, pelo incentivo.

A todos os meus parentes e amigos, pelo estímulo e apoio.

À Empresa AGROPOLO Implementos Agrícola LTDA de Diadema, SP, na pessoa de Pedro Garcia, por disponibilizar os aspersores para os ensaios técnicos.

À Professora Myriane Stella Scalco, do Departamento de Agricultura, pelo empréstimo das tubulações.

Aos estagiários Raitanni e Liamara, da Universidade Federal de Pelotas e aos estagiários José Henrique, Célio e Elaine, da Universidade Federal de Lavras, pela valiosa ajuda durante os testes de campo.

Aos funcionários “Nenê” e José Luís, do Laboratório de Hidráulica da UFLA, pela importante colaboração.

Aos colegas de mestrado, em especial Moisés, Gustavo e Débora, pela amizade, pela ajuda nos testes de campo e pelo agradável convívio.

Aos inesquecíveis amigos da turma de graduação, Fábio, Fabrício e Volnei, pela amizade e incentivo.

BIOGRAFIA

SAMUEL BESKOW, filho de Gílson Beskow e Maria de Lourdes Casarin Beskow, nasceu em Pelotas, RS, em 31 de julho de 1982.

Em fevereiro de 2000 concluiu o segundo grau no Conjunto Agrotécnico Visconde da Graça (CAVG), em Pelotas, RS.

Em março de 2000 iniciou o Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Pelotas, em Pelotas, RS. Durante a graduação foi bolsista do Programa Especial de Treinamento (PET), participando de projetos de pesquisa, extensão e ensino ligados à área de Engenharia Agrícola. Também participou de estágios extracurriculares na área de irrigação na Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG e nas empresas Hidrosistemas, situada em Maringá, PR e JIMA Ltda., localizada em Jales, SP. Gradou-se Engenheiro Agrícola em março de 2005.

Em março de 2005, iniciou o Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, área de concentração em Irrigação e Drenagem, concluindo-o em julho de 2006

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT	iii
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 Irrigação por aspersão convencional	4
2.2 Perdas de água por evaporação e arraste	6
2.3 Estimativa das perdas por evaporação e arraste na aspersão.....	8
2.4 Modelos para estimativa de perdas de água por evaporação e arraste na aspersão	12
2.4.1 Modelo de Trimmer (1987).....	14
2.4.2 Modelo de Yazar (1984)	16
2.4.3 Modelo de Tarjuelo et al. (2000).....	17
2.4.4 Modelo de Seginer et al. (1991).....	18
2.4.5 Modelo de Playán et al. (2005)	20
3 MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 Aspersores ensaiados.....	21
3.2 Estação agrometeorológica.....	22
3.3 Testes com um único aspersor.....	24
3.3.1 Quantificação das perdas de água por evaporação e arraste	28
3.4 Testes com laterais de aspersores	28
3.4.1 Quantificação das perdas de água por evaporação e arraste	30
3.5 Simulação das perdas de água por evaporação e arraste	30
3.6 Aplicativos computacionais.....	30
3.7 Modelagem dos valores de perdas de água por evaporação e arraste.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1 Perdas de água por evaporação e arraste	35
4.1.1 Aspersor NY-7 ER (4,6 mm x 4,0 mm)	36

4.1.2 Aspersor NY-12 (3,5 mm)	40
4.1.3 Aspersor Naan-12 (3,0 mm).....	42
4.1.4 Aspersor NY-25 (2,8 mm x 2,5 mm)	45
4.2 Simulação das perdas de água por evaporação e arraste	48
4.2.1 Modelo de Trimmer (1987).....	48
4.2.2 Modelo de Yazar (1984)	52
4.2.3 Modelo de Tarjuelo et al. (2000).....	54
4.2.4 Modelo de Seginer et al. (1991).....	57
4.2.5 Modelo de Playán et al. (2005)	59
4.3 Modelagem dos valores de perdas de água por evaporação e arraste.....	61
5 CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
ANEXOS	83

RESUMO

BESKOW, Samuel. **Avaliação de modelos empíricos para estimativa das perdas de água por evaporação e arraste em sistemas de aspersão convencional.** 2006. 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

Os objetivos deste trabalho foram: (i) determinar as perdas de água por evaporação e arraste durante ensaios de campo com um único aspersor e também com laterais de aspersores, sob diferentes condições climáticas, com diferentes modelos de aspersores operando a diferentes pressões; (ii) comparar os valores observados de perdas de água por evaporação e arraste com os valores previstos por cinco modelos empíricos; (iii) identificar características do aspersor (ângulo do jato, diâmetro de bocal e pressão de operação) que podem ser usadas para identificar aqueles modelos empíricos que fornecem aproximação adequada das perdas observadas; (iv) analisar a necessidade de ajustar parâmetros dos modelos específicos a fim de apresentar melhores predições do que as obtidas pelos modelos empíricos selecionados. Quatro diferentes modelos de aspersores, representando diferentes combinações de diâmetro de bocal e ângulo de jato, foram usados: 1 - Agropolo NY-7 ER (4,6 mm x 4 mm e 7°); 2- Agropolo NY-12 (3,5 mm e 12°); 3 - Naan (3,0 mm e 12°), e 4 - Agropolo NY-25 (2,8 mm x 2,5 mm e 25°). Valores observados e estimados de perdas de água por evaporação e arraste foram computadas com o auxílio de dois aplicativos computacionais, escritos em Object Pascal (ambiente gráfico Delphi 6.0), um para a determinação das perdas de água por evaporação e arraste durante testes de campo e o outro, para determinação das perdas de água por evaporação e arraste segundo os cinco diferentes modelos empíricos considerados. Testes de campo mostraram que as perdas observadas em ensaios com um único aspersor (valores médios de 8,5, 36,5, 40,3 e 39,8% para, respectivamente, aspersor 1, 2, 3 e 4) foram maiores do que as perdas observadas em ensaios com laterais de aspersores (valores médios de 4,7, 13,6, 20,2 e 18,9% para, respectivamente, aspersor 1, 2, 3 e 4). Os valores observados e os previstos não apresentaram boa correlação. Algumas exceções a esta tendência geral foram observadas. Para o aspersor 1, os modelos empíricos de Trimmer (1987) e Yazar (1984) foram capazes de aproximar as perdas observadas durante os testes com laterais de aspersores, enquanto os modelos de Tarjuelo et al. (2000) e Playán et al. (2005) foram capazes de aproximar as perdas obtidas em testes com um único aspersor.

¹ Comitê Orientador: Alberto Colombo – UFLA (Orientador) e Geraldo Magela Pereira – UFLA (Co-orientador)

Para o aspersor 2, o modelo de Playán et al. (2005) foi capaz de aproximar as perdas observadas durante testes com laterais de aspersores, enquanto o modelo de Seginer et al. (1991) conseguiu aproximar bem as perdas observadas durante os testes com um único aspersor. O modelo de Seginer et al. (1991) representou bem também as perdas observadas durante os testes com laterais de aspersores quando da utilização do aspersor 3. Para cada um dos quatro modelos de aspersores testados, foram desenvolvidos dois modelos específicos, um para representar as perdas obtidas em testes com um único aspersor e outro para representar as perdas obtidas em testes com laterais de aspersores. Um processo de regressão múltipla foi usado para gerar as equações para cada condição específica. A seleção dos melhores modelos empíricos para a estimativa das perdas de água por evaporação e arraste em irrigação por aspersão, deve considerar o modelo do aspersor (ângulo do jato, diâmetro de bocal e pressão de operação) e a condição operacional (operação de um aspersor ou laterais de aspersores).

ABSTRACT

BESKOW, Samuel. **Evaluation of empirical models for estimating evaporation and wind drift losses in conventional sprinkler systems.** 2006. 94p. Dissertation (Master of Science in Agricultural Engineering, Irrigation and Drainage) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil.²

The objectives of this work were: (i) to determine evaporation and drift losses during single-sprinkler and block irrigation outdoor tests held at different climatic conditions, with different sprinkler models operating at different pressures; (ii) to compare observed values of evaporation and wind drift losses with values predicted by five different empirical models; (iii) to identify sprinkler characteristics (jet angle, nozzle size and operational pressure) that may be used to identify those empirical models that provide adequate approximation of the observed losses; (iv) to analyze the need to fit parameters of specific models in order to perform better predictions than the ones provided by the selected empirical models. Four different sprinkler models, representing different combinations of nozzle size and jet angles, were used: 1 - Agropolo NY-7 ER (4.6 x 4 mm and 7°); 2- Agropolo NY-12 (3.5 mm and 12°); 3 - Naan (3.0 mm and 12°), and 4 - Agropolo NY-25 (2.8 mm x 2.5 mm and 25°). Observed and estimated values of evaporation and wind drift losses were computed with the help of two softwares, written in Object Pascal (Delphi 6.0 graphic environment), one for the computation of evaporation and drift losses during outdoor tests and other for computation of evaporation and drift losses according to the five different empirical models considered. Field trials showed that losses observed at single tests (average values of 8.5, 36.5, 40.3, and 39.8% for, respectively, sprinkler 1, 2, 3, and 4) are greater than the ones observed on block irrigation tests (average values of 4.7, 13.6, 20.2, and 18.9% for, respectively, sprinkler models 1, 2, 3, and 4). There is no good correlation between observed and predicted values. Some exceptions to this general trend were observed. For the sprinkler 1, Trimmer (1987) and Yazar (1984) empirical models were able to approximate losses observed during block irrigation tests, while Tarjuelo et al. (2000) and Playán et al. (2005) models were able to approximate losses observed during single sprinkler tests. For the sprinkler 2, Playán et al. (2005) model was able to approximate losses observed during block irrigation tests, while Seginer et al. (1991) model was able to approximate losses observed during single sprinkler tests. Seginer et al. (1991) model was also able to approximate losses observed during block irrigation tests held with the sprinkler 3. For each one of the four sprinkler models tested, it was developed two specific models, one for single-sprinkler and other for block-irrigation. A

² Guidance Committee: Alberto Colombo – UFLA (Major Professor) and Geraldo Magela Pereira – UFLA.

multiple regression technique was used to develop equations for each specific condition. Selection of the best empirical models for estimating drift and evaporation losses under set sprinkler systems must consider sprinkler model (jet angle, nozzle size and pressure) and operational condition (single sprinkler or block operation).

INTRODUÇÃO

A escassez cada vez maior de água certamente será um grande desafio tanto para agricultores quanto para pesquisadores, em busca do desenvolvimento de novos conceitos e estratégias para reduzir o consumo de água e energia, e, como consequência, aumentando a eficiência de utilização de tal recurso natural.

A irrigação por aspersão é uma prática cultural que tem sido utilizada em grande escala na agricultura irrigada brasileira, porém necessita de recursos limitados como água e energia, os quais estão cada vez mais escassos e de custo elevado. Como consequência, haverá a necessidade do uso mais eficiente dos recursos naturais (neste caso, a água) a serem utilizados em irrigação.

As perdas de água por evaporação e arraste pelo vento, além de prejudicarem a uniformidade de distribuição de água dos sistemas de irrigação por aspersão, também influenciam diretamente a eficiência de aplicação de água.

Hoje em dia, muitos profissionais ligados à área de irrigação estão, frequentemente, projetando e manejando sistemas de irrigação por aspersão, considerando que o sistema vai operar sem que ocorram perdas ou que estas serão mínimas. Ou seja, não se está conferindo a devida importância a aspectos de grande valia, como, por exemplo, a escolha ideal de um aspersor (combinação entre diâmetro de bocal, inclinação do jato e pressão de operação) e fatores ambientais adversos (principalmente o vento), resultando, muitas vezes, em sistemas operando em condições propícias a uma má distribuição de água e a grandes perdas por evaporação e arraste pelo vento.

Testes de campo para a avaliação das perdas de água por evaporação e arraste pelo vento são demorados e necessitam de vários equipamentos específicos e de mão-de-obra especializada. No entanto, existem alguns modelos empíricos que relacionam a perda de água por evaporação e arraste com algumas variáveis climatológicas, do aspersor e operacionais. Porém, estes modelos

foram desenvolvidos, na sua maioria, em condições específicas de países como Espanha, Estados Unidos e Israel, e também com aspersores equipados com um determinado diâmetro de bocal, ângulo de inclinação do jato e operando a uma pressão específica.

A desvantagem de modelos empíricos é que eles têm validade (ou seja, tem aplicação aceitável) apenas para condições semelhantes às quais eles foram desenvolvidos, como por exemplo, diâmetro de bocal, ângulo de inclinação do jato, pressão de operação e variabilidade de parâmetros ambientais (temperatura e umidade relativa do ar e velocidade do vento). Em contrapartida, tais modelos apresentam a vantagem de requererem um número reduzido de parâmetros para simulação das perdas, eliminando a necessidade do conhecimento da distribuição do tamanho de gotas de um dado aspersor, que é um parâmetro de difícil obtenção.

É possível, então, notar a importância de uma estimativa confiável de perda total de água, não só para determinar a eficiência de aplicação da água, mas também para possibilitar o planejamento (horário de irrigação, escolha do aspersor, etc.) da irrigação, a fim de otimizar a utilização de um recurso tão precioso como a água.

Diante do exposto, este trabalho teve os seguintes objetivos:

- quantificar as perdas de água por evaporação e arraste, durante ensaios de campo, tanto utilizando um único aspersor como também laterais de aspersores, de diferentes modelos, operados em diferentes condições climáticas e operacionais;
- comparar os resultados obtidos mediante testes de campo com os resultados previstos por cinco modelos empíricos;
- apresentar características do aspersor (ângulo do jato, diâmetro do bocal e pressão de operação) capazes de identificar aqueles modelos empíricos que fornecem aproximação adequada das perdas observadas em ensaios de campo;

- ajustar os modelos ou desenvolver outros modelos, com o intuito de adaptá-los às condições locais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Irrigação por aspersão convencional

Segundo Telles (1998), a irrigação por aspersão diz respeito a um método em que, sob uma dada pressão, um jato de água é aspergido de forma uniforme sobre a superfície do solo; o fracionamento do jato ocorre por meio de um emissor (aspersor, spray, etc.) em gotas de pequeno tamanho.

Durante a irrigação por aspersão, um jato de água é emitido a uma alta velocidade no ar e a fricção entre ele e o ar causa a sua divisão em gotas de água, as quais caem sobre a superfície de forma semelhante à da chuva (Smajstrla & Zazueta, 2003).

Estimativas para o ano de 1999 indicam que o método de irrigação por aspersão é o segundo mais utilizado no Brasil, em termos de área irrigada (contabilizando-se a área irrigada por todos os sistemas que compõem o método de irrigação por aspersão, ele supera 1 milhão de hectares irrigados), perdendo apenas para a irrigação por superfície (Christofidis, 2001).

Entre os diferentes sistemas de irrigação por aspersão, cada um com suas vantagens e desvantagens, entre os mais utilizados, destacam-se os sistemas de aspersão convencional, aos quais somam-se os sistemas portátil, semiportátil e fixo (Marouelli et al., 2001).

Keller & Bliesner (1990) relatam que a aspersão convencional teve seu uso na agricultura no início do século passado e somente a partir de 1930 é que começou a ser utilizada em larga escala na agricultura. Os mesmos autores atribuem esse fato à redução de custos nos sistemas de irrigação por aspersão devido ao uso de aspersores de impacto e tubos com engate rápido.

De acordo com Pereira (2003), denomina-se de aspersão convencional o conjunto básico de irrigação por aspersão formado por, pelo menos: sistema de captação e bombeamento, tubulação de recalque ou principal, tubulação lateral e

aspersores. O mesmo autor salienta, ainda, que a classificação em portátil, semiportátil e fixo se dá em virtude da movimentação ou não, total ou parcial, de seus componentes e que a principal aplicação, no Brasil, deste sistema ocorre na irrigação de hortaliças, parques e jardins e gramados de campos esportivos.

Marouelli et al. (2001) afirmam que os sistemas de irrigação por aspersão são os mais utilizados no cultivo de hortaliças, em virtude da melhor adaptação às diferentes condições de solo, topografia e características agrônomicas da maioria das hortaliças, chegando a representar mais de 90% da área total de hortaliças irrigadas no Brasil.

Kincaid et al. (1996) e Kincaid (1996) citam que a variedade de aspersores disponíveis no mercado tem aumentado muito nos últimos anos e que existem aspersores de impacto com um ou dois bocais disponibilizados em diversos tipos, os quais influenciam diretamente nos tamanhos de gotas e perfis de distribuição de água. De acordo com von Bernuth (1988), os fabricantes têm se preocupado em oferecer uma variedade de aspersores (no que diz respeito a ângulos de trajetória), mas salienta que consideração deve ser dada à distribuição do tamanho de gotas e velocidade do vento antes de escolher qual ângulo usar.

Existem vários tamanhos de aspersores disponíveis no comércio, entretanto, os mais utilizados para irrigação por aspersão convencional são os do tipo rotativo, com movimentação pelo impacto do braço oscilante e compostos de um ou dois bocais, trabalhando com pressão entre 20 a 40 m.c.a e possibilitando um raio de alcance entre 12 e 36 m (Bernardo et al., 2005).

Conforme von Bernuth (1988), os fabricantes oferecem uma variedade de aspersores, dimensionados para amenizar os efeitos do vento. No que diz respeito ao ângulo de inclinação do bocal, encontram-se disponíveis, no mercado, ângulos variando entre 6° e 27°. O mesmo autor comenta que, obviamente, existe um mercado para aspersores de pequeno e médio tamanho, com ângulos pequenos o suficiente para reduzir o efeito do vento e grandes o

suficiente para manter diâmetro de cobertura e uniformidade tolerável de distribuição de água.

2.2 Perdas de água por evaporação e arraste

Muitos esforços são freqüentemente realizados na avaliação de sistemas de irrigação pelo tratamento com problemas de uniformidade, porém, perdas de água também reduzem a eficiência do sistema e, freqüentemente, projetistas assumem que os sistemas serão perfeitamente manejados e as perdas serão mínimas, mas isso raramente acontece (Keller & Bliesner, 1990). Os mesmos autores dizem que a irrigação em excesso seja, talvez, a maior causa de perdas em um sistema de irrigação, mas que outras fontes de perdas associadas com irrigação por aspersão são: evaporação das gotas e superfícies úmidas de solo, arraste pelo vento, vazamentos e sistema de drenagem. Relatam, ainda, que, diante de condições normais, as perdas por arraste e evaporação variam entre 5% e 10%, entretanto, sob condições severas, estas perdas podem ser consideravelmente maiores.

Smajstrla & Zazueta (2003) explicam que a perda de água por evaporação diz respeito à água que evapora das gotas pulverizadas pelo ar e a perda por arraste ocorre quando o vento carrega as gotas da área irrigada. Estes pesquisadores dizem que as gotas arrastadas pelo vento podem evaporar enquanto estão sendo transportadas ou também cair em local fora da área irrigada, mas que, em ambos os casos, a água é perdida, visto que a mesma não fica disponível para as plantas que estão sendo irrigadas.

Tarjuelo (1999) cita que as perdas de água por evaporação e arraste, na irrigação por aspersão, dependem, principalmente, dos seguintes fatores: umidade relativa do ar, temperatura do ar e da água, altura do aspersor, tamanho de gotas e velocidade do vento.

De acordo com Smajstrla & Zazueta (2003), durante a operação de um sistema de irrigação por aspersão, a água evapora do jato pulverizado através do ar e o valor correspondente de evaporação depende de três fatores, a saber:

1) demanda climática: a demanda do clima é uma medida da energia disponível para evaporação e a capacidade do ar em armazenar e transmitir vapor de água. O processo de evaporação requer 580 calorias de energia para converter 1 grama de água no estado líquido para a forma de vapor e esta energia deve estar disponível no ambiente circundante ao aspersor. A energia está facilmente disponível nos meses de verão, por ocorrerem altas temperaturas do ar e altos níveis de radiação solar. Comparando-se a umidade relativa do ar com a evaporação, pode-se afirmar que esta ocorrerá mais rapidamente quando o ar estiver seco do que quando úmido. Em relação ao vento, este aumenta a intensidade de evaporação pelo transporte do vapor de água para longe da superfície de evaporação e pelo transporte de ar mais seco de áreas circundantes para substituir o ar úmido e frio acima da área irrigada;

2) tempo disponível para a evaporação ocorrer: o tempo disponível para que ocorra a evaporação é o curto intervalo de tempo que começa quando um jato de água sai do bocal e termina quando o jato cai sobre o solo ou superfície cultivada;

3) área das gotas de água: em função do fato da evaporação ocorrer da superfície de gotas de água, a superfície total das mesmas afeta muito o valor das perdas por evaporação. Para um volume unitário de água, a superfície dobra com o decréscimo, pela metade, do diâmetro da gota. Por este motivo, a intensidade de evaporação aumenta com o decréscimo do tamanho da gota, se outros fatores permanecerem constantes.

A perda por arraste é, por definição, um resultado somente do vento e não necessariamente correlaciona-se bem com a evaporação, enquanto a perda

por evaporação é apenas parcialmente afetada pelo vento (Seginer & Kostrinsky, 1975).

A distribuição do tamanho de gotas é de extrema importância, quando analisada do ponto de vista de perdas de água, visto que gotas pequenas são mais susceptíveis ao arraste pelo vento, distorcendo o perfil de aplicação do aspersor (Kohl, 1974; Tarjuelo et al., 1999). De acordo com Playán et al. (2005), gotas maiores são mais resistentes ao arraste e apresentam menor área por unidade de massa. Como consequência, elas são menos afetadas pelas perdas de água por evaporação e arraste pelo vento.

Conforme Faci et al. (2001) e Playán et al. (2005), a altura do aspersor tem influência direta sobre as perdas de água por evaporação e arraste na irrigação por aspersão, visto que, com o aumento da altura do aspersor, ocorre um prolongamento do tempo em que as gotas emitidas ficam expostas ao ambiente. Assim, ficam mais susceptíveis à evaporação e ao arraste pelo vento. Entretanto, em trabalho experimental realizado por Tarjuelo et al. (2000), estes pesquisadores concluíram que a diferença de altura usada nos tubos de subida (0,6 m e 2 m) não influenciou nas perdas de água por evaporação e arraste.

2.3 Estimativa das perdas por evaporação e arraste na aspersão

Seginer et al. (1991) mostraram que há duas maneiras de estimar perdas por evaporação e arraste, que são fisicamente e estatisticamente, e que, essencialmente, levam a mesma formulação. Segundo os mesmos autores, a aproximação física de tais perdas de água é baseada na equação de transferência, relatando a taxa de evaporação para uma diferença específica de umidade (ou pressão de vapor) entre as gotas de água e o ar circundante. Na aproximação estatística (Frost & Schwalen, 1955; Tarjuelo et al., 2000; Yazar, 1984), medições em volume de perdas por evaporação e arraste são relacionadas com variáveis ambientais e operacionais.

Conforme Kohl et al. (1987), podem ser utilizados métodos de campo, analíticos e de laboratório, a fim de se determinar as perdas de água por evaporação e arraste na irrigação por aspersão. Estas perdas obtidas experimentalmente no campo variam de 2% a 40%, com muitos valores dentro do intervalo 10%-20% (Kincaid, 1996; Kincaid et al., 1996; Kohl et al., 1987; Yazar, 1984), enquanto os valores analíticos e de laboratório mostram valores entre 0,5% e 2% (Kohl et al., 1987). Para os mesmos autores, esta grande diferença entre os valores das perdas de água por evaporação e arraste para os diferentes métodos se deve, em parte, às diferenças de precisão entre as técnicas experimentais.

Kohl et al. (1987) mostraram que os problemas associados a equipamentos de coleta de água (coletores) e erros experimentais comuns no processo de medição têm promovido a idéia de que as perdas são muito importantes, do ponto de vista quantitativo. Entretanto, para estes autores, na teoria, a transferência de energia para as gotas durante o trajeto não é suficiente para evaporar mais do que 1%-2% da água aspergida. Porém, Ortega et al. (2000) discutem o fato de que, no trabalho de Kohl et al. (1987), foram usados bocais grandes (6,4 mm) trabalhando a uma baixa pressão (100 kPa), por consequência, gerando baixas proporções de gotas pequenas.

Muitos pesquisadores têm considerado as perdas devido a evaporação e arraste como uma única perda, utilizando o termo “spray losses”, isso devido às dificuldades encontradas com as técnicas necessárias de medição para separar tais perdas (Kincaid & Longley, 1989).

A estimativa das perdas de água por evaporação e arraste pelo vento foi realizada, segundo Azevedo et al. (1999), Dylla & Shull (1983), Edling (1985), Montero et al. (2000) e Tarjuelo et al. (2000), considerando como igual a diferença entre o volume de água emitido por aspersores e o volume de água

armazenado por coletores posicionados equidistantes dentro de uma malha de tamanho conhecido.

Seginer et al. (1991) sugerem eliminar (usando algum agente que impossibilite) a evaporação que ocorre no coletor durante a leitura dos dados, corrigindo, por exemplo, com base na evaporação medida em coletores periféricos.

Tarjuelo et al. (2000) a fim de determinar, em campo, as perdas de água por evaporação ocorridas nos coletores durante o teste e a leitura dos volumes coletados, utilizaram alguns coletores situados fora da área de teste com um volume médio aproximado esperado de ser coletado pelos coletores.

O diâmetro do coletor para armazenar água durante os experimentos de irrigação é considerado um parâmetro importante por muitos autores. Frizzone & Dourado Neto (2003) recomendam o uso de coletores com área de captação de 50 cm² resultando um diâmetro mínimo de 8 cm. Entretanto, em pesquisa desenvolvida por Playán et al. (2005), tais pesquisadores concluíram que um coletor com diâmetro menor que o mínimo recomendado poderia ser utilizado, levando a uma adequada medição de perdas de água por evaporação e arraste, desde que a velocidade do vento seja menor que 4,0 – 4,5 m/s.

Quanto maior a diferença entre a área da abertura do coletor e a superfície (da malha) a qual este representa, menor é a precisão na estimativa das perdas de água por evaporação e arraste (Tarjuelo et al., 2000).

Seginer et al. (1991) comentam que a técnica habitual de medição de perdas de água, baseada em coletores, pode estar sujeita a um relevante erro de medição, podendo acontecer o mesmo com a evaporação nos coletores durante o experimento.

Pereira (1995), utilizando a teoria da trajetória balística, desenvolveu um modelo computacional para determinar as perdas de água por evaporação durante o trajeto das gotas d'água, concluindo que quanto menor o diâmetro da

gota, maior é a percentagem de perda de água por evaporação; que as perdas de água por evaporação, simuladas para as condições atmosféricas dos testes, variaram de 0,02% a 0,35% do volume de água aplicado; que as perdas de água por evaporação foram praticamente desprezíveis quando comparadas com as perdas por arraste pelo vento e que a perda máxima de água por evaporação, simulada para condição atmosférica extrema (temperatura do ar igual a 40°C e umidade relativa igual a 10%), foi de apenas 1,08% do volume de água aplicado.

Kraus (1966), realizando testes com uma linha de aspersores (bocal com diâmetro de 4,4 mm), em Davis, Estados Unidos, constatou perdas de água por evaporação e arraste variando entre 3,4% e 17%. Nesse mesmo trabalho, o autor encontrou uma relação linear entre as perdas de água obtidas experimentalmente e aquelas calculadas pelo nomograma de Frost & Schwalen, levando-o a concluir que a perda total de água varia principalmente com as seguintes variáveis: déficit de pressão de vapor, diâmetro do bocal, pressão de operação e velocidade do vento.

Dechmi et al. (2003) concluíram, mediante testes realizados na Espanha, que a variabilidade da velocidade e da direção do vento durante o horário de irrigação afeta o ajuste dos dados de campo.

Faci et al. (2001) concluíram, pelas avaliações de campo com aspersores do tipo spray a uma pressão constante, que somente as variáveis diâmetro de bocal, velocidade do vento e temperatura do ar provaram ter efeito sobre as perdas por evaporação e arraste.

Em trabalho realizado por Dechmi et al. (2003), utilizando um aspersor com bocais de 4,4 mm (principal) e 2,4 mm (auxiliar), ângulo de inclinação do jato igual a 25° e operando a uma pressão de 300 kPa, estes autores encontraram perdas de água por evaporação e arraste entre 6% e 40% (valor médio de 20%), em condições de velocidade de vento entre 0,6 ms⁻¹ e 6,5 ms⁻¹.

Tarjuelo et al. (2000) obtiveram perdas de água por evaporação e arraste variando entre 0,55% e 42,25% para irrigação com um único aspersor, de 0,95% a 29,41% para irrigação com laterais de aspersores e de 7,9% a 20,6% para um sistema já instalado em condições de campo.

Ortega et al. (2000) relatam que as perdas por evaporação e arraste são maiores em sistemas com um único aspersor, quando comparados a sistemas com linhas laterais de aspersores. Estes autores justificam essa afirmação, argumentando que, no caso da irrigação com linhas laterais, vários aspersores funcionam simultaneamente, ocasionando um microclima diferente daquele gerado pelo sistema com somente um aspersor.

Utilizando sistemas fixos e móveis de irrigação por aspersão, com aspersores equipados com bocais de 4,4 mm (principal) e 2,4 mm (auxiliar) operando a uma pressão média de 380 kPa, Playán et al. (2005) obtiveram perdas de água por evaporação e arraste entre 1,6% e 27,6% para sistemas fixos, com valor médio de 12,1%, e de 1,2% a 14,7% para sistemas móveis de irrigação por aspersão, com valor médio de 6,6%.

2.4 Modelos para estimativa de perdas de água por evaporação e arraste na aspersão

Conforme Carrión et al. (2001), modelos aplicados à simulação de irrigação, os quais permitem prever a distribuição de água de um sistema de irrigação sob condições reais de trabalho, têm sido desenvolvidos com o objetivo de evitar laboriosos testes de campo, projetar e melhorar sistemas de irrigação.

Os modelos matemáticos servem como uma alternativa para fornecer um meio de superar muitos erros decorrentes de medições na avaliação de perdas de água na aspersão durante a irrigação (Thompson et al., 1993).

Modelos matemáticos que relatam a influência das variáveis do sistema de irrigação e meteorológicas sobre as perdas por evaporação e arraste pelo vento encontram-se na Tabela 1 (Playán et al., 2005). Nessa mesma Tabela, as

variáveis consideradas são: diâmetro do bocal (D), diâmetro da gota (Dg), altura de instalação do bocal (h), pressão de serviço do aspersor (Ps), velocidade do vento (U), temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR), déficit da pressão de vapor (Δe), radiação solar (R) e evapotranspiração (ETo).

TABELA 1 – Modelos para estimativa de perdas de água por evaporação e arraste pelo vento, na irrigação por aspersão e suas respectivas variáveis envolvidas.

Autores	Variáveis									
	D	Dg	h	Ps	U	T	UR	Δe	R	ETo
Frost & Schwalen (1955)	-			+	+	+	-	+		
Seginer (1971)					+	+	-		+	
Hermesmeier (1973)			+		+	+	-			
Yazar (1984)				+	+	+		+		
Edling (1985)		-	+		+					
Trimmer (1987)	-			+	+			+		
Keller & Bliesner (1990)	-			+	+					+
Faci & Bercero (1991)					+					
Tarjuelo (1995)		-			+	+	-			
Silva & James (1998)		-			+	+	-			
Montero (1999)	-			+	+			+		
Tarjuelo et al. (2000)	-	-	+	+	+			+		
Faci et al. (2001)					+	+				
Playán et al. (2004)					+					

FONTE: Playán et al. (2005).

Na Tabela 1, a simbologia utilizada diz respeito a que variáveis cada autor considera mais ou menos influenciar nas perdas de água por evaporação e arraste.

Kohl et al. (1987) fizeram uma revisão relacionando alguns modelos que estimam as perdas por evaporação e arraste na aspersão com a variação obtida acerca dos valores das respectivas perdas. Entre esses modelos podem-se citar:

Frost & Schwalen (1955) encontraram valores entre 3%-45% e Yazar (1984) chegou a valores entre 2%-31%.

Faci et al. (2001) realizaram testes de campo com aspersores do tipo spray e compararam com valores simulados pelos modelos de Keller & Bliesner (1990), Montero et al. (1997) e Trimmer (1987). Os mesmos autores concluíram que os três modelos subestimaram os valores obtidos de perdas de água por evaporação e arraste, não sendo indicados para utilizar na situação específica do trabalho desenvolvido e que o modelo de Montero et al. (1997) foi o que apresentou melhores resultados, quando comparado aos outros dois modelos.

Em experimento realizado em Zaragoza, na Espanha, Playán et al. (2005) compararam os resultados de perdas de água obtidos diretamente em avaliações de campo com o resultado gerado por oito equações disponíveis na literatura, para a estimativa de tais perdas. Os mesmos autores concluíram que o ajuste das equações com os dados de campo foi desanimador, relatando, ainda, que as equações tendem a gerar melhores resultados (ou seja, perdas menores) em comparação com o que realmente acontece no sistema de irrigação. Como as equações disponíveis na literatura não representaram com sucesso os dados obtidos, Playán et al. (2005) desenvolveram um conjunto de 29 equações para estimar as perdas de água por evaporação e arraste, tendo a maioria delas somente a variável vento como variável independente.

Dechmi et al. (2003), realizando testes de campo em Zaragoza, Espanha, obtiveram relações entre as perdas de água por evaporação e arraste e a velocidade do vento, tendo os modelos de melhor ajuste sido o linear e o potencial.

2.4.1 Modelo de Trimmer (1987)

Frost & Schwalen (1955), mediante mais de 700 testes em diferentes condições climáticas do Arizona (Estados Unidos), desenvolveram um

nomograma para estimar as perdas de água por evaporação e arraste em sistemas de irrigação por aspersão.

Smajstrla & Zazueta (2003) citam que o nomograma de Frost e Schwalen, como é conhecido, proporciona ao usuário estimar a percentagem de perdas de água por evaporação e arraste durante a irrigação por aspersão como função de características do aspersor, pressão de operação e fatores climatológicos, sendo usado largamente para este propósito. Os autores relatam que tal nomograma utiliza três fatores climáticos: temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

O nomograma de Frost & Schwalen não é adaptado para o uso em computadores. Assim, Trimmer (1987) desenvolveu uma equação, baseado no nomograma, para calcular as perdas por evaporação e arraste em sistemas de irrigação por aspersão. Pela Equação 1 é possível estimar tais perdas de água. O referido autor recomenda o uso da Equação 2 para calcular o déficit de pressão de vapor, a qual relaciona a pressão de saturação do vapor com a temperatura e umidade relativa do ar do ambiente em que o aspersor está situado.

$$EA = [1,98D^{-0,72} + 0,22(\Delta e)^{0,63} + 3,6 \times 10^{-4} P_s^{1,16} + 0,14U^{0,7}]^{4,2} \quad (1)$$

em que:

EA = perda de água por evaporação e arraste (%);

D = diâmetro do bocal (mm);

Δe = déficit de pressão de vapor (kPa);

P_s = pressão de serviço do aspersor (kPa);

U = velocidade média do vento (ms^{-1}).

$$\Delta e = 0,61 \exp\left(\frac{17,27T}{T+237,3}\right) \left(1 - \frac{UR}{100}\right) \quad (2)$$

em que:

T = temperatura do ar (°C);

UR = umidade relativa do ar (%).

2.4.2 Modelo de Yazar (1984)

Yazar (1984), realizando testes com laterais de aspersores, obteve algumas expressões para a estimativa das perdas de água por evaporação e outra equação somente para perdas de água por arraste, em sistemas de irrigação por aspersão. Para o desenvolvimento destas equações, este pesquisador realizou testes no campo, utilizando aspersores com dois diâmetros de bocais (5,2 mm e 5,6 mm), espaçados de 6 m e operados nas pressões de 207, 276 e 310 kPa.

A Equação 3 relaciona as perdas por evaporação com todas as variáveis usadas pelo autor. Na Equação 4 é omitido o fator temperatura do ar. A Equação 5 foi desenvolvida desconsiderando a influência da pressão de operação. Para a Equação 6, foram considerados apenas a velocidade do vento e o déficit de pressão de vapor. A Equação 7 considera somente a relação das perdas por evaporação com a velocidade do vento e a Equação 8 relaciona a perda por evaporação apenas com o déficit de pressão de vapor. A equação 9 diz respeito somente às perdas de água por arraste, na irrigação por aspersão.

$$E = 0,003 \exp^{(0,20 U)} (10\Delta e)^{0,59} T^{0,23} P_s^{0,76} \quad (3)$$

$$E = 0,007 \exp^{(0,20 U)} (10\Delta e)^{0,66} P_s^{0,73} \quad (4)$$

$$E = 0,978 \exp^{(0,18U)} (10\Delta e)^{0,81} T^{-0,37} \quad (5)$$

$$E = 0,389 \exp^{(0,18U)} (10\Delta e)^{0,70} \quad (6)$$

$$E = 1,68 \exp^{(0,29U)} \quad (7)$$

$$E = 1,60 \exp^{(0,07)}(10\Delta e) \quad (8)$$

$$A = 0,27 U^{2,15} \quad (9)$$

em que:

E = perda de água por evaporação (%);

A = perda de água por arraste do vento (%);

2.4.3 Modelo de Tarjuelo et al. (2000)

Tarjuelo et al. (2000), realizando testes com laterais de aspersores, obtiveram algumas expressões para a estimativa das perdas de água por evaporação e arraste, em sistemas de irrigação por aspersão.

Para o desenvolvimento de equações, estes pesquisadores realizaram testes diretamente no campo, utilizando aspersores (instalados a 2 m de altura em relação ao nível do solo) com dois bocais (4,4 mm x 2,4 mm) com inclinação do jato de 23°, operado nas pressões no intervalo de 250 e 476 kPa. A equação a seguir, desenvolvida por Tarjuelo et al. (2000) mediante avaliações realizadas em cobertura integral, relacionam as perdas de água por evaporação e arraste com a pressão, déficit de pressão de vapor e a velocidade média do vento.

$$EA = 0,007P_s + 7,38\Delta e^{0,5} + 0,844U \quad (10)$$

De acordo com Ortega et al. (2004), este modelo tem sido usado, pois ele proporciona uma boa estimativa das perdas por evaporação e arraste, expressa como a porcentagem de água emitida por aspersores de impacto de

tamanho médio, sob as condições semi-áridas e com sistemas fixos de irrigação por aspersão.

Ortega et al. (2000), Tarjuelo (1999) e Tarjuelo et al. (2000) propõem um modelo geral para estimar perdas de água por evaporação e arraste mediante testes com um único aspersor e com laterais de aspersores operando à pressão constante (Equação 11) e outro modelo (Equação 12) para a estimativa de perdas de água por meio de avaliações de campo (de um único modelo de aspersor) com cobertura integral do sistema (com várias pressões de operação). A seguir são mostrados os dois modelos.

$$EA_{ijk} = a + ASP_i + BOC(ASP)_{j(i)} + b\Delta e_{k(ij)}^{0,5} + cU_{k(ij)} + e_{k(ij)} \quad (11)$$

em que:

EA_{ijk} = perdas por evaporação e arraste (%) para cada configuração de bocal e aspersor;

a, b e c = parâmetros de ajuste;

i = tipo de aspersor (i = 1, 2, 3, ..., n);

j(i) = tipo de bocal;

k = índice que denota as repetições da mesma configuração bocal e aspersor;

$e_{k(ij)}$ = erro experimental.

$$EA = aP_s + b\Delta e^{0,5} + cU + e \quad (12)$$

2.4.4 Modelo de Seginer et al. (1991)

Este modelo foi desenvolvido por tais pesquisadores, foi nas condições climáticas de Israel, utilizando um aspersor com bocal de 3,5 mm e operado a 300 kPa.

A fim de facilitar comparações com este estudo, os pesquisadores recalcularam a regressão de Yazar (1984), usando como variável independente a depressão de bulbo úmido em vez do déficit de pressão de vapor.

Seginer et al. (1991) comentam que a diferença experimental entre os dois trabalhos é que Yazar (1984) utilizou no experimento dele muitos aspersores operando simultaneamente. Entretanto, é importante frisar que também houve uma diferença entre os diâmetros de bocais e as pressões de operação utilizados nos dois trabalhos. Enquanto Yazar (1984) utilizou bocais de 5,2 mm e 5,6 mm, operando às pressões de 207, 276 e 310 kPa, Seginer et al. (1991) utilizaram aspersores com diâmetro de bocal de 3,5 mm operando a 300 kPa. A equação resultante para o cálculo de perdas de água por evaporação é:

$$E = \frac{Q_e}{Q_a} = 0,87 \exp^{0,213U} (T - T_w)^{0,58} \quad (13)$$

em que:

Q_e = intensidade de evaporação (m^3s^{-1});

Q_a = vazão do aspersor (m^3s^{-1});

T_w = temperatura de bulbo úmido ($^{\circ}\text{C}$).

A fim de estimar conjuntamente as perdas de água por evaporação e arraste, Seginer et al. (1991) obtiveram, sob condições semi-áridas, em testes com um único aspersor sob condições de campo, a seguinte relação:

$$EA = \frac{(Q_e + Q_d)}{Q_a} = 3,22 \exp^{0,075U} (T - T_w)^{0,69} \quad (14)$$

em que:

Q_d = intensidade de perdas por arraste (m^3s^{-1});

É possível observar que estes autores usaram a depressão de bulbo úmido ($T - T_w$) em vez do déficit de pressão de vapor. Para calcular a depressão de bulbo úmido, pode-se utilizar a Equação 15, apresentada por Campbell (1995), a qual expressa o déficit de pressão de vapor como uma função da depressão de bulbo úmido.

$$\Delta e = 0,00066(1 + 0,00115T_w)(T - T_w)P_{atm} \quad (15)$$

em que:

P_{atm} = pressão atmosférica (kPa).

O déficit de pressão de vapor pode ser calculado de acordo com a Equação 2. Dessa forma, resulta em uma equação de segundo grau, relacionando T (esta variável é conhecida) e T_w , a qual pode ser facilmente resolvida, obtendo-se o valor de temperatura de bulbo úmido. Assim, pode-se utilizar as equações 13 e 14, propostas por Seginer et al. (1991).

2.4.5 Modelo de Playán et al. (2005)

Playán et al. (2005), em ensaios de campo com aspersores (instalados a 2 m de altura em relação ao nível do solo) equipados com bocais de 4,4 mm (principal) e 2,4 mm (auxiliar), operando à pressão de 380 kPa, obtiveram 29 equações distintas para a estimativa de perdas de água por evaporação e arraste. Algumas das equações foram desenvolvidas para o período do dia, outras para o período da noite e algumas para ambos os períodos.

A Equação 16 é uma equação geral para a estimativa das perdas de água por evaporação e arraste, a qual envolve os parâmetros umidade relativa do ar e velocidade do vento.

$$EA = 20,3 + 0,214U^2 - 2,29 \times 10^{-3}UR^2 \quad (16)$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Aspersores ensaiados

O experimento foi conduzido durante os meses de março e abril de 2006, em área gramada próximo ao Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Lavras, localizado na cidade de Lavras, Minas Gerais, com latitude de 21°14'43" Sul e altitude de 918 m.

Para a realização dos testes e posterior quantificação das perdas de água por evaporação e arraste, foram utilizados aspersores (Figura 1) das marcas Agropolo e Naan, equipados com bocais de diferentes diâmetros (2,8 mm x 2,5 mm; 3,0 mm; 3,5 mm e 4,6 mm x 4,0 mm) e ângulos de inclinação do jato (7°; 12° e 25°), operando com pressão entre 196 kPa e 343 kPa (Tabela 2).



FIGURA 1 – Alguns aspersores utilizados nos testes de campo

TABELA 2 – Combinações utilizadas nos testes de campo entre diâmetro de bocal, ângulo de inclinação do jato, modelo de aspersor e pressão de serviço.

Diâm. do bocal (mm)	Incl. do jato (°)	Modelo	Pressão (kPa)			
			196	245	294	343
4,6x4,0	7	NY		X	X	X
3,5	12	NY	X	X	X	
3,0	12	Naan		X	X	X
2,8x2,5	25	NY	X	X		

A vazão do aspersor, para cada teste (conforme Tabela 2), foi obtida pelo processo direto (método gravimétrico), fixando-se um dado tempo no cronômetro e pesando-se o volume obtido neste intervalo, em três repetições.

3.2 Estação agrometeorológica

Para o monitoramento de variáveis meteorológicas de interesse para o presente estudo, utilizou-se uma estação automática modelo Vantage Pro2 (Figura 2), localizada a uma distância de 20 m da área de testes de irrigação. Tal estação registrava as seguintes variáveis meteorológicas: (a) temperatura e umidade relativa do ar a 2 m acima do nível do solo e (b) velocidade e direção do vento a 2 m de altura acima do nível do solo. Os dados destas variáveis foram registrados de forma manual a cada cinco minutos, durante 60 minutos.



FIGURA 2 – Estação agrometeorológica automática utilizada

Os instrumentos (componentes da estação) utilizados no experimento, a fim de monitorar as condições ambientais, foram:

(a) anemômetro com precisão de $\pm 5\%$ e intervalo de medição de 0 a 68 ms^{-1} , para mensurar a velocidade do vento, e biruta para indicar a direção do vento (com intervalo de medição de 0° a 360° e precisão de $\pm 7^\circ$);

(b) termômetro com precisão de $0,5^\circ\text{C}$ e intervalo de medição de -40°C a $+65^\circ\text{C}$ para medir a temperatura do ar;

(c) higrômetro com precisão de 3% e intervalo de medição de 0% a 100% para mensurar a umidade relativa do ar.

3.3 Testes com um único aspersor

Neste tipo de ensaio, o aspersor foi posicionado no centro de uma malha de coletores composta por 12 linhas e 12 colunas, totalizando 144 coletores (Figura 3). O espaçamento utilizado entre coletores foi de 2 m. Para a condução da água da estação de recalque até o aspersor, utilizou-se tubulação de PVC com diâmetro igual a 50 mm. A altura do tubo de subida era tal que propiciava uma altura de 0,75 m do bocal do aspersor em relação à abertura dos coletores e a altura do aspersor era de 1,25 m.

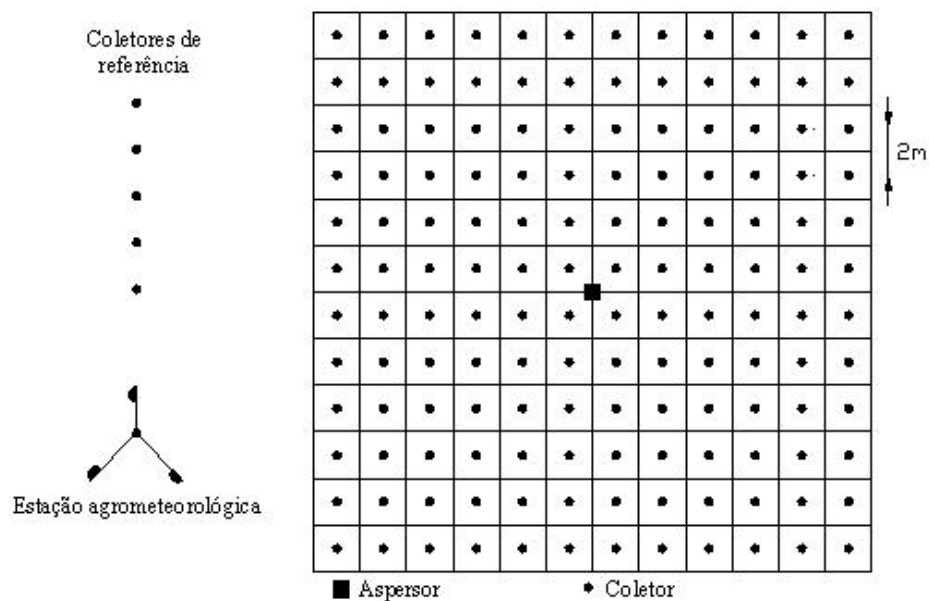


FIGURA 3 – Desenho esquemático da disposição dos coletores, aspersor e estação agrometeorológica, para o teste com um único aspersor.

Para o armazenamento de água proveniente dos aspersores durante os testes, foram utilizados coletores (Figura 4). Latas de óleo (de cozinha) pintadas na cor branca foram utilizadas como coletores, tendo um formato cilíndrico. O diâmetro interno do coletor era de 83,5 mm e altura igual a 190 mm. A parte superior do coletor estava localizada a 500 mm acima da superfície do solo.



FIGURA 4 – Teste com um único aspersor

A fim de monitorar a pressão na entrada do bocal do aspersor, durante todo o teste de irrigação, fez-se uso de um manômetro de Bourdon, graduado de 0 kgfcm⁻² a 8,0 kgfcm⁻², com intervalos de 0,05 kgfcm⁻². Com o objetivo de aumentar ou diminuir a pressão de operação do aspersor, foi instalada uma válvula de gaveta na derivação da linha lateral para o tubo de subida do aspersor.

A duração de cada avaliação realizada, por este tipo de teste (com um único aspersor), foi de 60 minutos. O volume armazenado dentro de cada coletor era medido volumetricamente (por uma proveta graduada) imediatamente após o término da irrigação e esses valores eram registrados em uma planilha apropriada (Figura 5). O tempo de medição foi entre 20 e 30 minutos. Durante o período de irrigação, a cada cinco minutos, eram registrados, por meio de uma estação agrometeorológica automática, os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento.



FIGURA 5 – Medição dos volumes de água contidos em cada coletor, após o término da irrigação

A fim de estimar a evaporação nos coletores, durante a leitura dos volumes, foram dispostos 5 coletores como referência (Figura 6), posicionados

20 m distante da área de testes. Estes coletores continham volumes conhecidos (semelhantes aos esperados de coletar). Os volumes eram medidos novamente após o término da leitura dos dados. Em cada coletor, o volume de água coletado foi corrigido a partir da evaporação ocorrida durante o processo de leitura. O volume de água de cada coletor foi aumentado em um valor igual a 50% da evaporação ocorrida durante o processo de leitura dos dados, estimada por meio dos coletores de referência, conforme recomendação de Tarjuelo et al. (2000).



FIGURA 6 – Coletores de referência para estimar a evaporação durante o processo de leitura dos dados

3.3.1 Quantificação das perdas de água por evaporação e arraste

As perdas observadas por evaporação e arraste foram determinadas, para cada avaliação, como sendo igual à diferença entre o volume total aplicado pelo aspersor durante o período de irrigação e o volume total registrado nos coletores. As perdas por evaporação da água contida dentro dos coletores, durante o tempo de medição, foram consideradas e, portanto, acrescentadas a cada volume registrado nos coletores. Para os testes com um único aspersor, depois de corrigido o volume, foi realizado a sobreposição para o espaçamento de 12 m x 12 m, de cada malha de dados, com o intuito de possibilitar o cálculo das perdas totais de água. As perdas por evaporação e arraste (EA) foram computadas utilizando-se a seguinte equação:

$$EA = \frac{Q_a t - 4 \sum_{i=1}^{i=36} Z_i}{Q_a t} 100 \quad (17)$$

em que:

t = duração da irrigação (s);

Z_i = lâmina armazenada no coletor *i* (m).

O número 4 na Equação 17 significa que cada coletor representa uma área de 4 m².

3.4 Testes com laterais de aspersores

Nestes testes, os aspersores foram dispostos em duas linhas laterais de PVC (diâmetro de 50 mm), com dois aspersores por linha (Figura 7). O espaçamento utilizado foi de 12 m x 12 m. Os coletores foram dispostos de maneira a formarem quadrados de 2 m de lado. Cada teste tinha a duração de 50

minutos e o processo de leitura dos volumes de água levava em torno de 10 minutos.

Para controlar a pressão no sistema durante o período de irrigação, foram utilizadas duas tomadas de pressão. Uma tomada de pressão estava localizada entre uma válvula de gaveta e o primeiro aspersor, e a outra estava localizada no tubo de subida do último aspersor. Utilizou-se um manômetro de Bourdon, graduado de 0 kgfcm^{-2} a $8,0 \text{ kgfcm}^{-2}$, com intervalos de $0,05 \text{ kgfcm}^{-2}$, para estabelecer a pressão no início do teste e verificar a pressão durante os 50 minutos de irrigação.

A operação, a obtenção dos dados climatológicos e a correção da evaporação dos coletores durante a leitura dos dados foram realizadas da mesma maneira que no teste com um único aspersor.

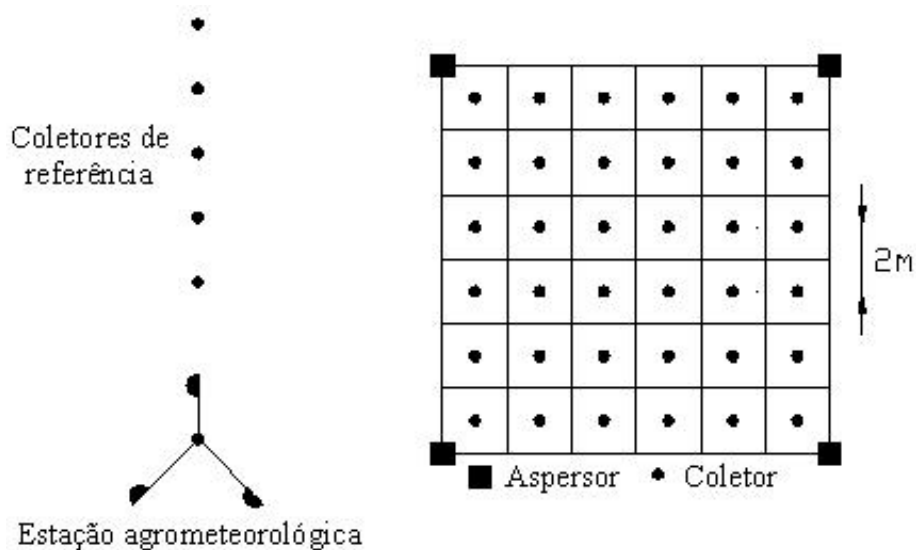


FIGURA 7 – Desenho esquemático da disposição dos coletores, aspersores e estação agrometeorológica, para o teste com linhas laterais de aspersores.

3.4.1 Quantificação das perdas de água por evaporação e arraste

As perdas observadas por evaporação e arraste foram determinadas, para cada avaliação, como sendo igual à diferença entre o volume total aplicado pelo aspersor durante o período de irrigação e o volume total registrado nos coletores. As perdas por evaporação da água contida dentro dos coletores, durante a irrigação e o tempo de medição, foram consideradas e, portanto, acrescentadas a cada volume registrado nos coletores. Para estes testes com vários aspersores funcionando simultaneamente (no espaçamento 12 m x 12 m), não foi necessário realizar a sobreposição dos perfis. As perdas por evaporação e arraste (EA) foram computadas usando a Equação 17.

3.5 Simulação das perdas de água por evaporação e arraste

Diferentes equações empíricas foram usadas neste trabalho para simular as perdas de água por evaporação e arraste ocorridas durante as avaliações (utilizando as mesmas variáveis operacionais e ambientais do teste em questão), com o intuito de comparar com os valores obtidos experimentalmente. Os modelos utilizados para comparação foram os de Playán et al. (2005), Seginer et al. (1991), Tarjuelo et al. (2000), Trimmer (1987) e Yazar (1984),.

3.6 Aplicativos computacionais

Com o objetivo de facilitar e acelerar o processo de cálculo, foram elaborados dois aplicativos computacionais, ambos escritos em Object Pascal usando o compilador Borland Delphi 6.0 (ambiente Windows). Estes dois aplicativos podem facilmente ser instalados em qualquer computador, mediante o disco de instalação (arquivo SETUP.EXE).

O primeiro aplicativo (Figura 8) foi escrito com o intuito de tornar mais rápido o processo de determinação das perdas de água por evaporação e arraste, ocorridas durante os testes de campo. Para a determinação das perdas é

necessário que o usuário informe o tempo de teste, a vazão do aspersor, o diâmetro e o espaçamento dos coletores e informar o caminho do arquivo ou malha de dados (formato *.xml) de volumes (ml) coletados. Com isso, a rotina computacional calcula as perdas (em termos percentuais) de água por evaporação e arraste.

Uma grande vantagem do programa computacional representado pela tela mostrada na Figura 8 é a possibilidade de armazenamento e edição da malha de dados em arquivo específico. Isso proporciona ao usuário editar, salvar e abrir uma determinada malha de dados de volumes coletados a qualquer momento, otimizando o uso de tal aplicativo.

The screenshot shows a window titled 'Malha-Arquivo: C:\8mar1.xml'. It has a menu bar with 'Arquivo' and 'Opções de cálculo'. Below the menu bar, there are two input fields: 'Vazão (m³/h):' with the value '0.677' and 'Tempo (min):' with the value '60'. The main area of the window contains a 12x12 grid of numerical values representing data points for water loss calculations.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.2	0.1	3.2	7.6	0.1	0	0	0	0
0	0	0	8.2	23	12	14	16	18	1	0	0
0	0	10	13.4	6.2	3.8	3.8	4.4	9	16	0	0
0	0	20	7	6	3.8	3.6	5.6	6.4	12.2	10.2	0
0	4.8	11	4.2	4.2	2	4.6	3.4	7	9	10	0
0	15	10	6.4	4	3	2	3.4	5	11.4	6.8	0
0	8.6	11.4	6.8	5.4	3	4	5	9	13.4	1	0
0	0	13	10	5	6	6	6	11	13	0	0
0	0	0	10.4	10.2	11.6	11	12	10	13	0	0
0	0	0	0	3	8	8.6	3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

FIGURA 8 – Tela principal do aplicativo para cálculo de perdas de água por evaporação e arraste, ocorridas em testes de campo.

O segundo aplicativo foi desenvolvido com o objetivo de simular as perdas de água por evaporação e arraste ocorridas segundo os diferentes modelos empíricos utilizados.

O formulário de entrada de dados para a simulação com o modelo de Trimmer (1987), no qual devem ser inseridas informações a respeito da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, altura de medição e condições operacionais (pressão de operação e diâmetro de bocal do aspersor), encontra-se na Figura 9. De posse desses dados, o programa simula as perdas de água (em percentagem) possíveis de ocorrer segundo tal modelo.

Velocidade do vento e altura de medição		Condições operacionais	
Média (m/s)	Altura de medição (m)	Pressão (kPa)	Bocal (mm)
2.5	2	245	3.5

FIGURA 9 – Formulário de entrada de dados para simulação de perdas de evaporação e arraste, de acordo com o modelo de Trimmer (1987).

A interface gráfica para a entrada de dados do modelo de Yazar (1984) é exibida na Figura 10, sendo necessário informar velocidade média do vento e altura de medição, temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão de operação, além de escolher qual equação utilizar (conforme Equações 3, 4, 5, 6, 7 e 8). Assim, o aplicativo computacional tem a capacidade de simular o valor de perda de água por evaporação e arraste na situação ambiental e operacional específica.

Modelo de Yazar (1984)

Fechar Novo Limpar Simular

Velocidade do vento e altura de medição

Média (m/s) Altura de medição (m)

2.5 2

Temperatura do ar (°C) Umidade relativa do ar (%)

30 50

Condições operacionais

Pressão (kPa)

245

Modelos (r)

- Equação 1 (r = 0.993)
- Equação 2 (r = 0.993)
- Equação 3 (r = 0.984)
- Equação 4 (r = 0.984)
- Equação 5 (r = 0.946)
- Equação 6 (r = 0.960)

FIGURA 10 – Formulário de entrada de dados para simulação de perdas de evaporação e arraste, de acordo com o modelo de Yazar (1984).

Na Figura 11 podem-se observar os dados exigidos pelo modelo de Seginer et al. (1991) para a realização da simulação de perdas de água.

FIGURA 11 – Formulário de entrada de dados para simulação de perdas de evaporação e arraste, de acordo com o modelo de Seginer et al. (1991).

O uso destes aplicativos é bastante simples, visto que foram desenvolvidos em linguagem que proporciona interface gráfica amigável em ambiente Windows. O usuário pode, a qualquer momento, editar, inserir e apagar dados específicos em cada formulário, facilitando e viabilizando o uso destes programas computacionais.

3.7 Modelagem dos valores de perdas de água por evaporação e arraste

Com o intuito de modelar os dados obtidos mediante ensaios de campo, utilizou-se o modelo geral para estimativa das perdas de água por evaporação e arraste recomendado por Ortega et al. (2000), Tarjuelo (1999) e Tarjuelo et al. (2000), conforme a Equação 12. Para o ajuste dos parâmetros presentes na Equação 12, fez-se uso do programa computacional SAS, realizando-se o processo de regressão múltipla.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Perdas de água por evaporação e arraste

A seguir são apresentados os resultados de perdas de água por evaporação e arraste referentes aos ensaios de campo com um único aspersor e também com laterais de aspersores, sob diferentes condições operacionais e ambientais.

Os valores das variáveis quantitativas consideradas no processo e registradas durante os testes com um único aspersor estão demonstrados, de forma resumida, na Tabela 3.

TABELA 3 – Análise descritiva das variáveis

	EA (%)	T (°C)	UR (%)	Δe (kPa)	U (m/s)
Número de observações	123	123	123	123	123
Mínimo	1,11	15,00	47,08	0,1231	0,00
Máximo	55,72	31,00	92,77	2,2712	3,20
Intervalo	54,61	16,00	45,69	2,1481	3,20
Média aritmética	30,12	25,16	66,91	1,1285	1,14
Desvio padrão	16,53	3,17	11,15	0,52	0,69
Curtose	-1,33	0,97	-0,62	-0,69	-0,21
CV (%)	54,88	12,61	16,66	45,76	60,43

Nos ensaios com laterais de aspersores, os aspersores estavam espaçados de 12 m x 12 m. Os valores das variáveis quantitativas consideradas no processo e registradas durante os testes com linhas laterais de aspersores são mostrados de forma resumida na Tabela 4.

TABELA 4 – Análise descritiva das variáveis

	EA (%)	T (°C)	UR (%)	Δe (kPa)	U (m/s)
Número de observações	68	68	68	68	68
Mínimo	0,03	16,36	41,27	0,3142	0,15
Máximo	33,30	29,00	83,18	2,1549	3,08
Intervalo	33,27	12,64	41,91	1,8407	2,93
Média aritmética	14,23	23,78	65,50	1,0769	1,33
Desvio padrão	8,56	3,26	10,94	0,50	0,66
Curtose	-0,47	-0,69	-0,79	-0,89	0,23
CV (%)	60,18	13,73	16,70	46,20	49,29

Com o auxílio das Tabelas 3 e 4 é possível observar a grande variabilidade encontrada nas variáveis ambientais (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor) durante a realização dos testes, possibilitando analisar a influência de cada uma delas variáveis sobre o valor de perda de água por evaporação e arraste. No entanto, as perdas de água por evaporação e arraste são afetadas por um grande número de fatores (distribuição do tamanho de gotas, condições climáticas, pressão de operação, diâmetro dos bocais, etc.), resultando em uma difícil análise com uma única variável isoladamente.

4.1.1 Aspersor NY-7 ER (4,6 mm x 4,0 mm)

Na Figura 12 observa-se que as perdas de água apresentam certa tendência em aumentar com o acréscimo na temperatura do ar e déficit de pressão de vapor, e em aumentar com o decréscimo da umidade relativa do ar, isso para as três pressões utilizadas. Já quando se observa a relação entre a velocidade do vento e as perdas, para o mesmo aspersor, é difícil definir uma relação exata. Pela mesma Figura, pode-se confirmar a dificuldade em relacionar as perdas de água por evaporação e arraste com uma variável climatológica de

forma isolada, em virtude de depender de um conjunto de variáveis, conforme destacam Tarjuelo et al. (2000).

As perdas de água por evaporação e arraste obtidas em ensaios de campo com um único aspersor (Figura 12a), utilizando o modelo NY-7 ER, variaram entre 2,33% e 23,91%, com valor médio de 8,46%. Já nos testes com laterais de aspersores do mesmo modelo (Figura 12b), as perdas de água por evaporação e arraste variaram entre 0,03% e 11,11%, com valor médio de 4,69%. Pôde-se observar a diferença de valores obtidos entre os dois tipos de ensaios, os quais, nos ensaios com laterais de aspersores, ficaram bem abaixo dos obtidos pelos de testes com um único aspersor. A mesma situação ocorreu em trabalho semelhante desenvolvido por Ortega et al. (2000), justificando que, no caso de ensaios com linhas laterais de aspersores, vários aspersores funcionam simultaneamente, propiciando um microclima diferente daquele gerado pelo sistema com um único aspersor e, por isso, as perdas de água por evaporação e arraste são menores.

Um aspecto interessante a ser notado na Figura 12a é o pequeno valor de perda de água obtido (no máximo igual a 4,59%), para qualquer uma das pressões usadas, na ausência de vento durante o ensaio. No caso dos testes com laterais de aspersores (Figura 12b), também foram observados baixos valores de perdas de água por evaporação e arraste, mesmo sempre havendo a presença de vento. Isso se deve à relação entre a pressão de operação e o diâmetro de bocal que, neste caso, gera gotas não muito pulverizadas, apresentando menor área por unidade de massa e, assim, são menos afetadas pela evaporação do ar, conforme afirmam Playán et al. (2005) e Smajstrla & Zazueta (2003). Também se deve, em parte, ao pequeno ângulo de inclinação (7°) do jato, o qual faz com que as gotas levem pouco tempo até atingirem o solo, reduzindo as perdas de água tanto por evaporação quanto por arraste pelo vento.

As perdas de água por evaporação (quando da inexistência de vento), observadas em testes realizados com tal aspersor (Figura 12a) operado a diferentes pressões, aumentaram diretamente com o acréscimo da pressão de operação do aspersor (maior pulverização das gotas). Foi possível realizar esta análise em virtude da inexistência de vento e das outras condições ambientais (temperatura e umidade relativa do ar) serem bastante semelhantes.

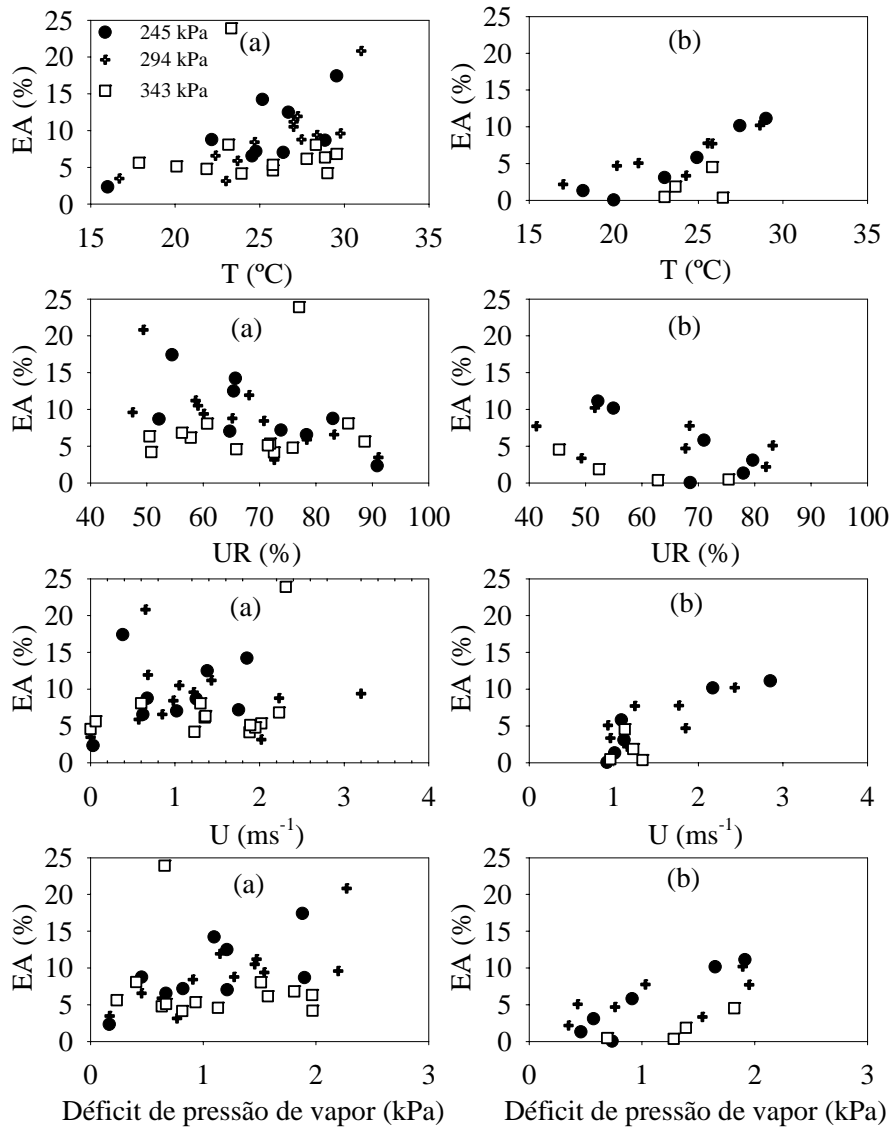


FIGURA 12 – Influência de variáveis climatológicas sobre as perdas de água por evaporação e arraste, para os testes realizados com (a) um único aspersor NY-7 ER e (b) laterais do aspersor NY-7 ER, operado a diferentes pressões.

4.1.2 Aspersor NY-12 (3,5 mm)

Na Figura 13 pode-se fazer a mesma análise que foi feita para a Figura 12. As perdas, de maneira geral, aumentaram com o acréscimo da temperatura do ar e déficit de pressão de vapor, e aumentaram com o decréscimo da umidade relativa do ar. Quanto à velocidade do vento, não se pode afirmar se as perdas aumentaram ou diminuíram com o acréscimo da velocidade do vento. Isso pode ser atribuído ao fato de que a velocidade do vento, durante os ensaios, apresentou uma grande variabilidade em comparação com outras variáveis ambientais, tornando, muitas vezes, impróprio o uso de um valor médio, concordando com a análise de Dechmi et al. (2003). Entretanto, torna-se inviável realizar a análise das perdas de água com uma variável ambiental de forma individualizada, em virtude do valor das perdas de água por evaporação e arraste dependerem de um grande número de fatores, concordando com o obtido por Tarjuelo et al. (2000).

As perdas de água por evaporação e arraste, obtidas em ensaios de campo com um único aspersor (Figura 13a) utilizando o aspersor NY-12, tiveram grande amplitude, variando entre 4,69% e 52,87%, com valor médio de 36,54%, e na inexistência de vento, as perdas tiveram valor mínimo de 4,69% e máximo igual a 23,10%. Já nos testes de campo com laterais do mesmo aspersor (Figura 13b), as perdas de água por evaporação e arraste variaram entre 4,65% e 33,30%, com valor médio de 13,55%. Pôde-se observar a diferença de valores obtidos entre os dois tipos de ensaios, tendo, naqueles com laterais de aspersores, os valores ficado bem abaixo dos obtidos por meio de testes com um único aspersor. A mesma situação ocorreu em trabalho semelhante desenvolvido por Ortega et al. (2000), justificando que, no caso de ensaios com linhas laterais de aspersores, vários aspersores funcionam simultaneamente, propiciando um microclima diferente ao gerado pelo sistema com um único aspersor e, por isso, as perdas de água por evaporação e arraste são menores.

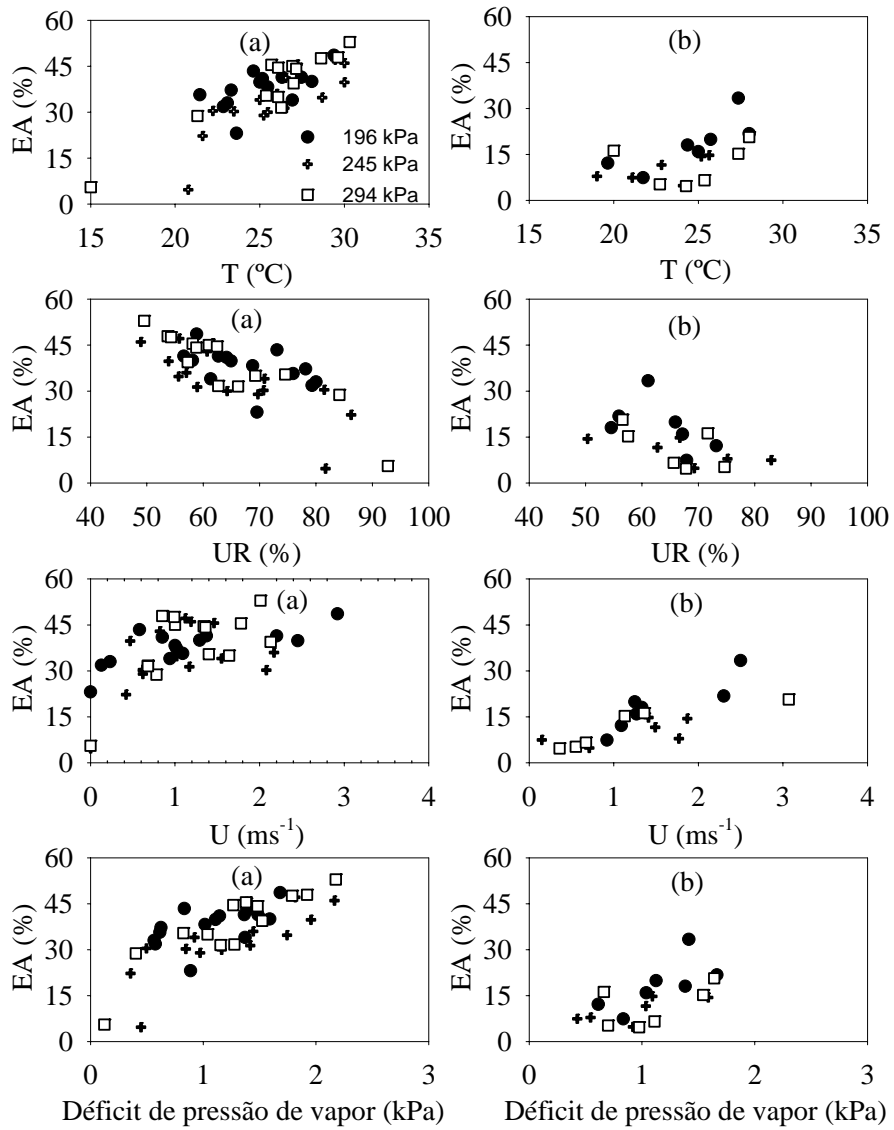


FIGURA 13 – Influência de variáveis climatológicas sobre as perdas de água por evaporação e arraste, para os testes realizados com (a) um único aspersor NY-12 e (b) laterais do aspersor NY-12, operado a diferentes pressões.

Os valores consideráveis obtidos, tanto em testes com um único aspersor como também com laterais de aspersores, mostram a grande susceptibilidade deste aspersor às perdas de água por evaporação e arraste, quando da ocorrência de temperaturas e velocidades de vento mais elevadas e menores valores de umidade relativa do ar. Este fato se deve à relação entre a pressão de operação e o diâmetro de bocal que, neste caso, gera gotas bastante pulverizadas, apresentando maior área por unidade de massa e maior susceptibilidade ao vento e, conseqüentemente, sendo mais afetadas pela evaporação do ar e arraste, conforme afirmam Playán et al. (2005) e Smajstrla & Zazueta (2003). Também se deve, em parte, ao maior ângulo de inclinação do jato (12°), o qual faz com que as gotas levem mais tempo até atingir o solo, aumentando as perdas de água, tanto por evaporação quanto por arraste pelo vento.

4.1.3 Aspersor Naan-12 (3,0 mm)

Na Figura 14 pode-se fazer a mesma análise que foi feita para as Figuras 12 e 13. As perdas, no geral, aumentaram com o acréscimo da temperatura do ar, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento, e aumentaram com o decréscimo de umidade relativa do ar. Porém, os valores de perdas de água não apresentam uma tendência fixa em aumentar com o acréscimo da temperatura do ar, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor, e com o decréscimo da umidade relativa do ar. Com isso, verifica-se a inviabilidade de se analisar a relação das perdas de água com uma variável ambiental de forma individualizada, em virtude do valor das perdas de água por evaporação e arraste dependerem de um grande número de fatores, concordando com o obtido por Tarjuelo et al. (2000), e também por causa dos dados observados.

As perdas de água por evaporação e arraste obtidas em ensaios de campo com um único aspersor (Figura 14a), utilizando o modelo Naan-12, tiveram grande amplitude, variando entre 7,95% e 55,72%, com valor médio de 40,34%.

Com a inexistência de vento durante o ensaio, apresentaram valores de perda no intervalo de 7,95% e 27,74%. Já em ensaios de campo com laterais do mesmo aspersor (Figura 14b), as perdas de água por evaporação e arraste variaram entre 9,16% e 32,78%, com valor médio de 20,15%. Pôde-se observar a diferença de valores obtidos entre os dois tipos de ensaios, tendo, naqueles com laterais de aspersores, ficado bem abaixo dos obtidos pelos de testes com um único aspersor, em razão do aspecto já discutido anteriormente.

Estes valores de perdas são considerados altos, mostrando a grande susceptibilidade deste aspersor às perdas de água por evaporação e arraste, quando da ocorrência de temperaturas e velocidades de vento mais elevadas e menores valores de umidade relativa do ar. Isto se deve à relação entre a pressão de operação e o diâmetro de bocal que, neste caso, gera gotas mais pulverizadas que as geradas pelos aspersores anteriores, apresentando maior área por unidade de massa e maior susceptibilidade ao vento e, conseqüentemente, sendo mais afetadas pela evaporação do ar e arraste, conforme afirmam Playán et al. (2005) e Smajstrla & Zazueta (2003).

É possível notar, pelas Figuras 13 e 14, que as perdas obtidas para o aspersor Naan-12 (bocal de 3,0 mm e ângulo de inclinação de 12°) foram sensivelmente superiores às obtidas com o aspersor NY-12 (bocal de 3,5 mm e ângulo de inclinação de 12°). Neste caso, os dois aspersores apresentam a mesma inclinação do bocal, portanto, as únicas diferenças são o diâmetro do bocal e o fabricante. Como o bocal de 3,0 mm é o menor entre os dois, acarreta (para uma mesma pressão) em um maior grau de pulverização do jato de água e, por conseqüência, em maior perda de água por evaporação e arraste.

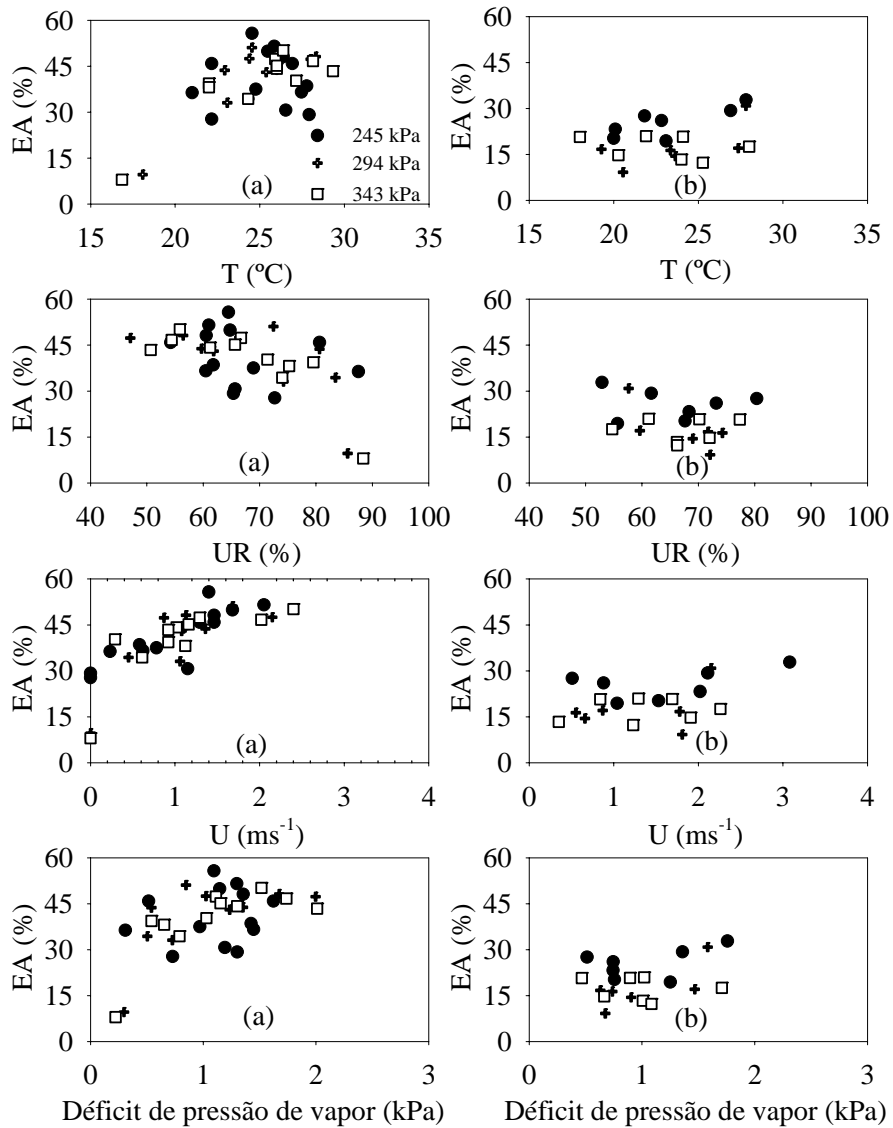


FIGURA 14 – Influência de variáveis climatológicas sobre as perdas de água por evaporação e arraste, para os testes realizados com (a) um único aspersor Naan-12 e (b) laterais do aspersor Naan-12, operado a diferentes pressões.

4.1.4 Aspersor NY-25 (2,8 mm x 2,5 mm)

Constata-se que os valores de perdas de água não apresentam uma tendência fixa em aumentar com o acréscimo da temperatura do ar, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor e com o decréscimo da umidade relativa do ar. Portanto, pode-se dizer que é inviável analisar a relação das perdas de água com uma variável ambiental de forma individualizada, em virtude do valor das perdas de água por evaporação e arraste dependerem de um grande número de fatores, concordando com o obtido por Tarjuelo et al. (2000) e também por causa dos dados observados (Figura 15).

Durante os ensaios de campo com um único aspersor (Figura 15a), utilizando-se o aspersor NY-25, observaram-se perdas de água por evaporação e arraste variando entre 1,11% e 51,38%, com valor médio de 39,78%; com a inexistência de vento durante os ensaios, verificaram-se perdas de água variando de 1,11% a 19,13%. Já nos ensaios de campo com laterais do mesmo aspersor (Figura 15b), as perdas de água por evaporação e arraste variaram entre 10,41% e 33,23%, com valor médio de 18,94%. Pôde-se observar a diferença de valores obtidos entre os dois tipos de ensaios, tendo, nos ensaios com laterais de aspersores, ficado bem abaixo dos obtidos pelos testes com um único aspersor, em razão do aspecto já discutido anteriormente.

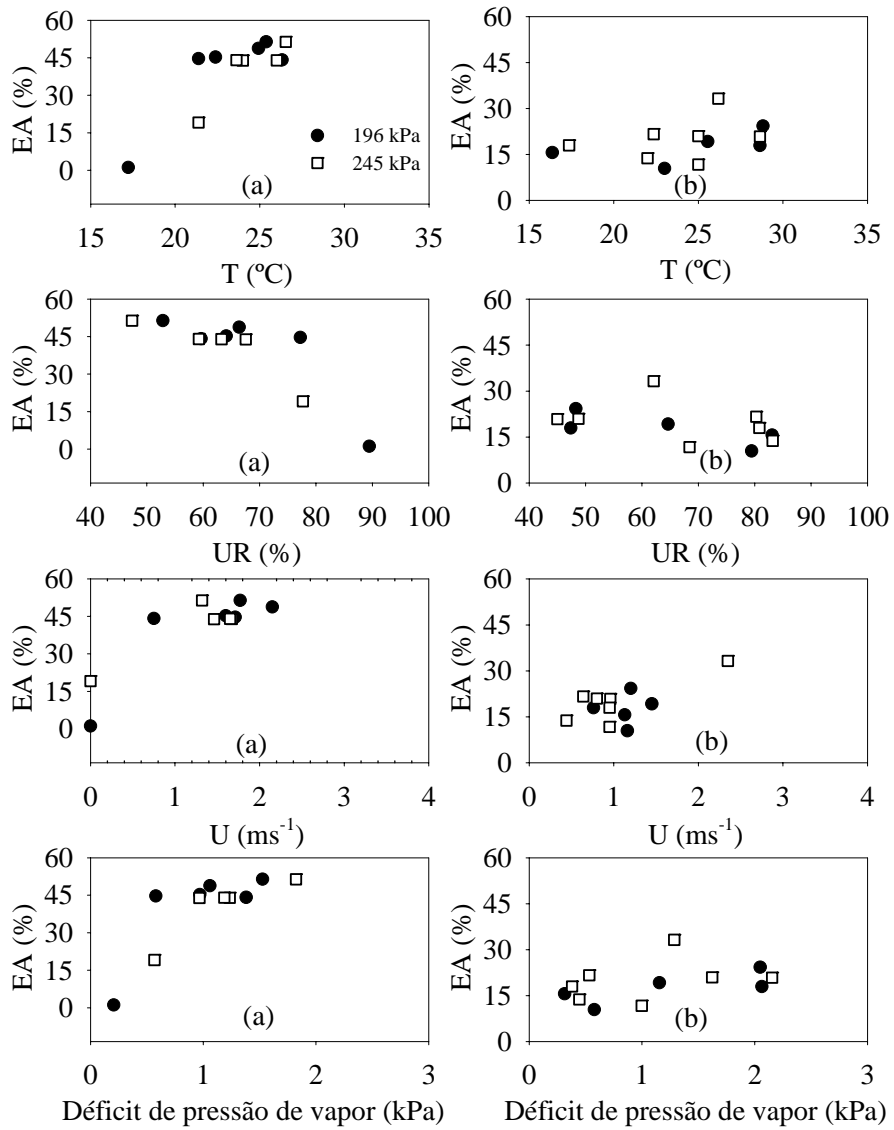


FIGURA 15 – Influência de variáveis climatológicas sobre as perdas de água por evaporação e arraste, para os testes realizados com (a) um único aspersor NY-25 e (b) laterais do aspersor NY-25, operado a diferentes pressões.

Os valores obtidos para o modelo NY-25, tanto para testes com um único aspersor como também com laterais destes aspersores, mostram a grande susceptibilidade às perdas de água por evaporação e arraste, quando da ocorrência de temperaturas e velocidades de vento mais elevadas e menores valores de umidade relativa do ar. Isso se deve à relação entre a pressão de operação e o diâmetro de bocal que, neste caso, geram gotas mais pulverizadas que as geradas pelos aspersores anteriores, apresentando maior área por unidade de massa e maior susceptibilidade ao vento e, conseqüentemente, sendo mais afetadas pela evaporação do ar e arraste, conforme afirmam Playán et al. (2005) e Smajstrla & Zazueta (2003). Também se deve, em parte, ao elevado ângulo de inclinação do jato, o qual faz com que as gotas levem mais tempo até atingirem o solo, aumentando perdas de água tanto por evaporação quanto por arraste pelo vento.

Comparando-se as perdas mostradas nas Figuras 12, 13, 14 e 15, é visível que aquelas obtidas para o aspersor NY-7 ER (4,6 mm x 4,0 mm e ângulo de inclinação de 7°) foram sensivelmente menores que as obtidas com os demais aspersores. Este fato pode ser justificado por dois motivos: a diferença entre o diâmetro de bocal e o ângulo de inclinação do jato. Comparando-se uma mesma pressão, o bocal de 4,6 mm x 4,0 mm produz gotas menos pulverizadas que o bocal dos outros aspersores utilizados, as quais são mais resistentes ao arraste e apresentam menor área por unidade de massa. Como conseqüência, elas são menos afetadas pelas perdas de água por evaporação e arraste pelo vento, concordando com Playán et al. (2005). Quanto à variável ângulo de inclinação do jato, o de 7° faz com que o jato de água fique menos tempo exposto ao vento e assim menos susceptível às perdas por evaporação e arraste.

Pode-se constatar, pelas Figuras 12, 13, 14 e 15, que as perdas obtidas para o aspersor NY-25 (bocais de 2,8 mm x 2,5 mm e ângulo de inclinação de 25°) foram sensivelmente maiores que as obtidas para os três modelos anteriores

citados de aspersor, mesmo não ocorrendo situações (ambientais) tão propícias às perdas e nem utilizando pressões maiores que 245 kPa. Pode-se justificar o fato por dois motivos: (a) menor diâmetro de bocais (2,8 mm x 2,5 mm), acarretando (para uma mesma pressão) em um maior grau de pulverização do jato de água e, por conseqüência, em maior perda de água por evaporação e arraste e (b) maior ângulo de inclinação (25°), propiciando um maior tempo de trajeto das gotas, favorecendo à evaporação e arraste.

4.2 Simulação das perdas de água por evaporação e arraste

Diferentes equações empíricas foram usadas neste trabalho, com o objetivo de simular as perdas de água por evaporação e arraste ocorridas durante as avaliações de campo. Os valores obtidos por estes modelos foram comparados com os dados obtidos experimentalmente, a fim de avaliar a capacidade de previsão de tais modelos empíricos. Os modelos usados para comparação foram Playán et al. (2005), Seginer et al. (1991), Tarjuelo et al. (2000), Trimmer (1987) e Yazar (1984).

4.2.1 Modelo de Trimmer (1987)

O modelo de Trimmer (1987) foi desenvolvido a partir da análise quantitativa do nomograma de Frost & Schwalen (1955) e leva em consideração alguns fatores ambientais (temperatura do ar, umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento), diâmetro de bocal e pressão de operação. O nomograma foi embasado em resultados obtidos por testes de campo com um único aspersor e também com lateral composta de dois aspersores, utilizando diâmetros distintos de bocais operando a diferentes pressões e condições ambientais.

Analisando-se a Figura 16, pode-se perceber que, apenas para o aspersor NY-7 ER (4,6 mm x 4,0 mm e inclinação de 7°), operando em laterais de

aspersores (Figura 16 b), o modelo de Trimmer (1987) apresentou alguma adequação. Para os demais aspersores, ou seja, aqueles com bocais menores e ângulos maiores de inclinação, o modelo não apresentou nenhuma adequação. Em trabalho realizado por Faci & Bercero (1991) e Playán et al. (2005), estes autores também encontraram perdas superiores ao estimado por tal modelo, ou seja, o modelo tende a subestimar os valores de perdas de água por evaporação e arraste pelo vento.

A Figura 16 comprova que o modelo de Trimmer (1987) não reproduz resultados satisfatórios no tocante às perdas de água por evaporação e arraste prováveis de ocorrer durante o evento de irrigação, se utilizar as configurações de diâmetro de bocal, inclinação do jato e pressão de operação citados neste trabalho.

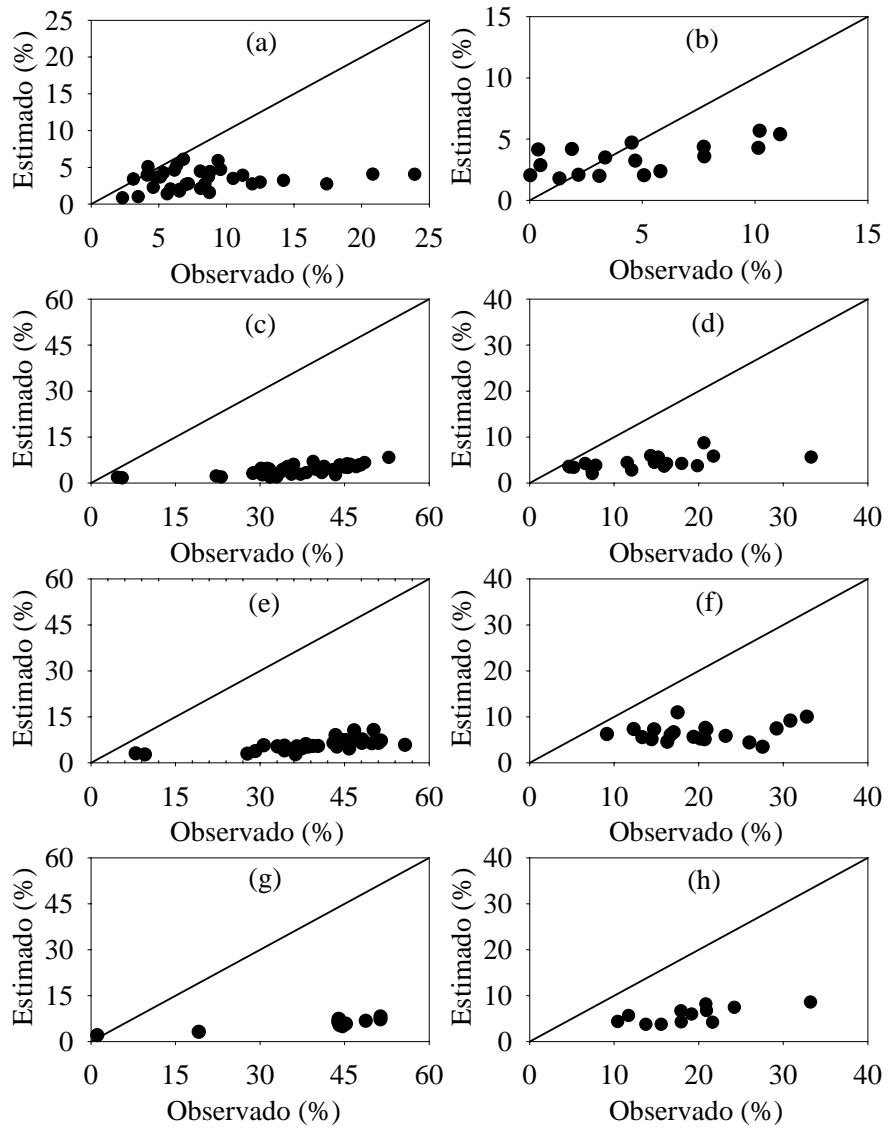


FIGURA 16 – Valores de perdas de água observados versus estimados pelo modelo de Trimmer (1987) utilizando, respectivamente, um único aspersor e laterais do aspersor (a, b) NY-7 ER, (c, d) NY-12, (e, f) Naan-12 e (g, h) NY-25.

Os pesquisadores Frost & Schwalen (1955) comentam que utilizaram bocais nos diâmetros de 12,7 mm, 4,8 mm e 4,8 mm x 3,2 mm, operando a pressões que variavam entre 20 psi (138 kPa) e 80 psi (551 kPa), porém, não comentam nada a respeito do ângulo de inclinação do jato dos aspersores utilizados. Isso quer dizer que se o projetista usar a equação proposta por Trimmer (1897) com o intuito de estimar as perdas de água por evaporação e arraste possíveis de ocorrer quando da utilização de dois aspersores com o mesmo diâmetro de bocal, porém, com ângulos de inclinação do jato diferentes, vai obter o mesmo valor de perda, o que é uma inverdade. Quanto maior o ângulo de inclinação do jato, maior é a perda de água por evaporação e arraste pelo vento, pois, de acordo com Faci et al. (2001) e Playán et al. (2005), as gotas ficam mais tempo expostas ao ambiente.

Outro aspecto importante a ser considerado na análise deste modelo é que o mesmo é apresentado como um modelo geral, sendo recomendada sua utilização para diferentes diâmetros de bocais, pressões de operação e condições ambientais. No entanto, vale frisar que os dados obtidos de perdas foram para as condições ambientais médias do Arizona, as quais são bem diferentes das condições ambientais do Brasil, o que acaba dificultando a importação deste modelo para as condições brasileiras. Apesar de ter sido realizado um número considerável de testes (700), este não é um número grande comparado à diversidade de combinações possíveis de ocorrer entre configurações de aspersores e condições ambientais, o que, na realidade, inviabiliza a utilização de um modelo geral para estimativa de perdas de água na irrigação por aspersão.

Parece claro que o modelo de Trimmer (1987) foi desenvolvido para bocais maiores do que os usados neste trabalho e, assim sendo, não se recomenda a utilização deste modelo para este caso específico. Em um modelo empírico, como é o caso deste, é importante que seja especificado o intervalo

das variáveis independentes em que o estudo foi realizado, para que o usuário possa saber se é conveniente ou não utilizar tal modelo para a situação desejada.

4.2.2 Modelo de Yazar (1984)

As simulações com este modelo foram feitas para todos os testes realizados em campo, com as diferentes configurações de aspersores e condições ambientais e operacionais.

Observando-se a Figura 17, pode-se dizer que o modelo de Yazar (1984) apresentou alguma adequação com os dados obtidos com a utilização do aspersor NY-7 ER (bocais de 4,6 mm x 4,0 mm e inclinação de 7°) em testes com laterais de aspersores (Figura 17 b). Isso pode ser atribuído ao fato deste pesquisador ter realizado testes com vários aspersores (funcionando simultaneamente) equipados com bocais de tamanho médio (5,2 mm e 5,6 mm), operando às pressões de 207 kPa, 276 kPa e 310 kPa, bastante semelhante ao bocal e intervalo de pressão citado e utilizado neste trabalho. Entretanto, os bocais utilizados pelo pesquisador apresentavam inclinação de 23°, diferente do utilizado neste trabalho.

Já quando se utilizou o modelo de Yazar (1984) para simular perdas na aplicação dos demais aspersores (de bocais menores), o modelo não retratou nada bem as perdas obtidas em campo, comprovando que o modelo não representa bem os valores de perdas para configurações entre diâmetro de bocal e pressão diferentes das quais foi desenvolvido.

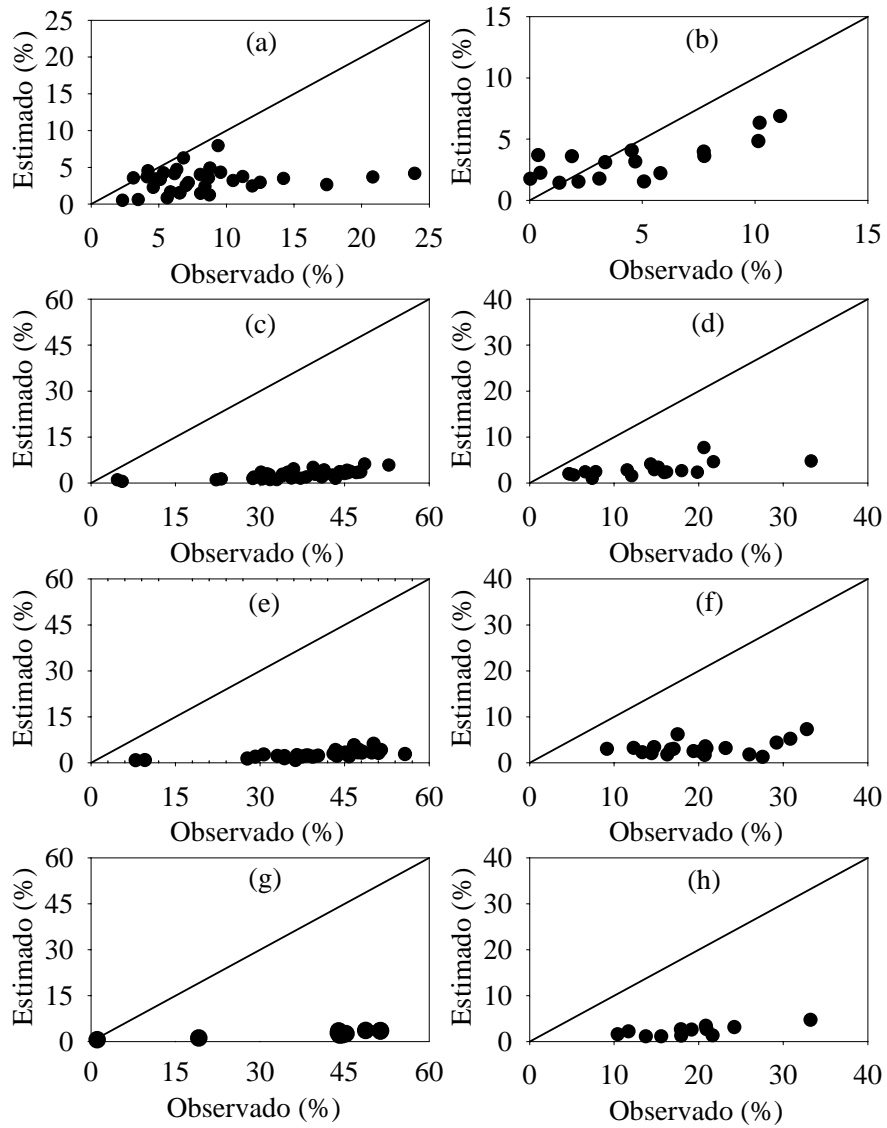


FIGURA 17 – Valores de perdas de água observados versus estimados pelo modelo de Yazar (1984) utilizando, respectivamente, um único aspersor e laterais do aspersor (a, b) NY-7 ER, (c, d) NY-12, (e, f) Naan-12 e (g, h) NY-25.

No caso do modelo proposto por Yazar (1984), já estão especificadas as limitações do mesmo, como diâmetro e inclinação de bocal e pressão de operação para qual o modelo tem validade. Neste trabalho, utilizou-se tal modelo apenas para avaliar se seriam muito grandes as diferenças entre os valores de perdas obtidos em campo com o uso de bocais (diâmetro e inclinação) diferentes e os valores gerados a partir do modelo.

O trabalho de Yazar (1984) se diferencia um pouco dos demais encontrados na literatura, pois, as perdas de água por evaporação são separadas das perdas por arraste pelo vento. Ele utilizou a relação entre a condutividade elétrica da água coletada em pluviômetros e da água da fonte para estimar as perdas de água por evaporação. Já para estimar as perdas por arraste, o mesmo autor fez uso da técnica do óxido de magnésio, enquanto este trabalho utilizou a técnica rotineira descrita por Azevedo et al. (1999), Dylla & Shull (1983), Edling (1985), Montero et al. (2000) e Tarjuelo et al. (2000), para determinar as perdas por evaporação em conjunto com as perdas por arraste pelo vento. Portanto, é de se esperar que os resultados sejam diferentes, tanto por diferenças na configuração dos aspersores e layout dos sistemas como também por diferenças nas técnicas de medição.

4.2.3 Modelo de Tarjuelo et al. (2000)

Pode-se observar, pelas Figuras 18 (a) e 18 (b), pouca adequação do modelo de Tarjuelo et al. (2000) aos dados obtidos em ensaios de campo, para o aspersor NY-7 ER (4,6 mm x 4,0 mm e inclinação de 7°). Esta configuração de aspersor (em relação às referidas neste trabalho) foi a mais semelhante àquela usada por tais pesquisadores, os quais utilizaram laterais de aspersores com bocais de 4,4 mm x 2,4 mm e inclinação de 23°, operando a pressões no intervalo de 250 kPa a 476 kPa. O modelo gerou perdas maiores do que realmente ocorreu durante os ensaios de campo, visto que o diâmetro do bocal

utilizado para gerar o modelo era menor e a inclinação maior do que o bocal usado nos ensaios. Ainda é possível notar, na Figura 18 (a), que os resultados simulados pelo modelo se aproximaram mais dos resultados de campo obtidos com um único aspersor. Isso ocorreu porque o ensaio com um único aspersor resulta em perdas maiores quando comparado a vários aspersores funcionando simultaneamente, conforme relatam Ortega et al. (2000).

Analisando-se a Figura 18, pode-se concluir que o modelo de Tarjuelo et al. (2000) não representou de forma adequada as perdas de água por evaporação e arraste ocorridas durante os testes experimentais.

Analisando-se as Figuras 18 (c), 18 (d), 18 (e), 18 (f), 18 (g) e 18 (h), pode-se perceber que os valores simulados pelo modelo de Tarjuelo et al. (2000) foram bem menores, quando comparados aos observados em ensaios de campo. Neste caso, houve uma grande diferença entre a configuração dos aspersores utilizados no modelo e os citados nestas Figuras, justificando a relevante diferença entre os valores encontrados.

É possível observar, pelas Figuras 18 (g) e 18 (h), que as perdas observadas em avaliações de campo foram maiores do que as simuladas pelo modelo de Tarjuelo et al. (2000), tanto em ensaios com um único aspersor, como também com vários aspersores funcionando simultaneamente. Uma semelhança significativa entre o aspersor utilizado no modelo e o citado nesta Figura é o ângulo de inclinação do bocal, porém, existe uma diferença entre os diâmetros de bocais.

Playán et al. (2005), ao simularem perdas de água por evaporação e arraste, utilizando o modelo de Tarjuelo et al. (2000), encontraram alguma adequação entre o modelo e os dados obtidos. Entretanto, os aspersores utilizados nos ensaios de campo de Playán et al. (2005) foram idênticos aos usados para originar o modelo e, mesmo assim, não obtiveram um ajuste satisfatório.

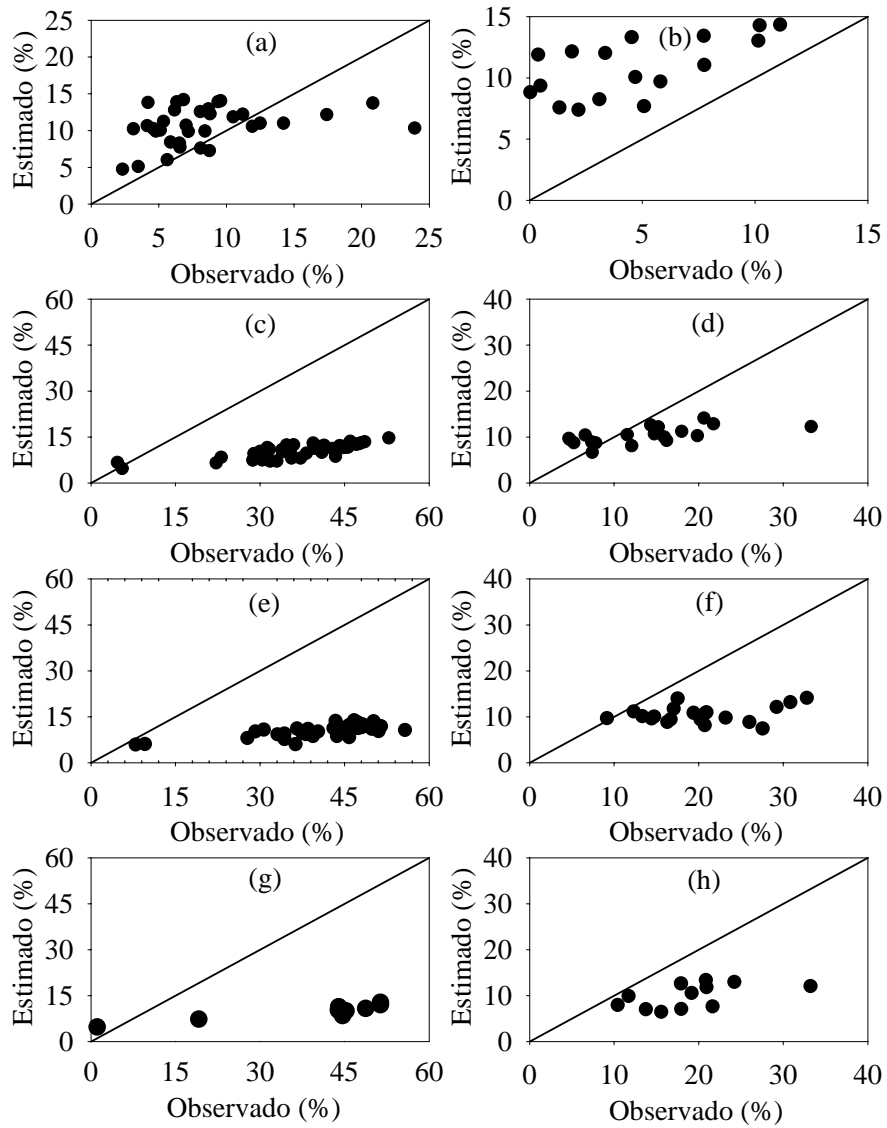


FIGURA 18 – Valores de perdas de água observados versus estimados pelo modelo de Tarjuelo et al. (2000) utilizando, respectivamente, um único aspersor e laterais do aspersor (a, b) NY-7 ER, (c, d) NY-12, (e, f) Naan-12 e (g, h) NY-25.

4.2.4 Modelo de Seginer et al. (1991)

Na Figuras 19 (a) e 19 (b) percebe-se que as perdas simuladas pelo modelo de Seginer et al. (1991) foram excessivamente superiores às obtidas em campo, tanto para o sistema operando com um único aspersor NY-7 ER como também com vários aspersores operando simultaneamente. Pode-se dizer que foi em virtude dos pesquisadores terem utilizado um aspersor com bocal de diâmetro bastante inferior ao citado nestas duas figuras, resultando em perdas de valores mais expressivos.

A Figura 19 (a) mostra alguma adequação entre os dados obtidos e simulados, visto que Seginer et al. (1991) utilizaram um aspersor com bocal de diâmetro idêntico em ensaios de campo com um único aspersor operando, porém para condições climáticas diferentes. Apesar da semelhança entre as configurações de aspersores utilizados nos dois trabalhos, o modelo não gerou resultados satisfatórios para as condições locais, devido às diferenças climáticas (temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento) ocorridas durante os ensaios.

Pela análise da Figura 19, percebe-se pouca ou nenhuma adequação entre os dados obtidos e os simulados pelo modelo de Seginer et al. (1991). O modelo foi desenvolvido com testes de um único aspersor funcionando isoladamente, portanto, analisando-se as Figuras 19 (e) e 19 (g), pode-se notar que os valores obtidos em ensaios foram um pouco superiores aos simulados pelo modelo, sendo possível atribuir esta diferença nos valores de perdas à diferença entre os diâmetros de bocais utilizados nos dois trabalhos. Trata-se de um modelo bastante específico, portanto, deve-se tomar cuidado na sua aplicação, pois ele pode gerar resultados bem diferentes da realidade.

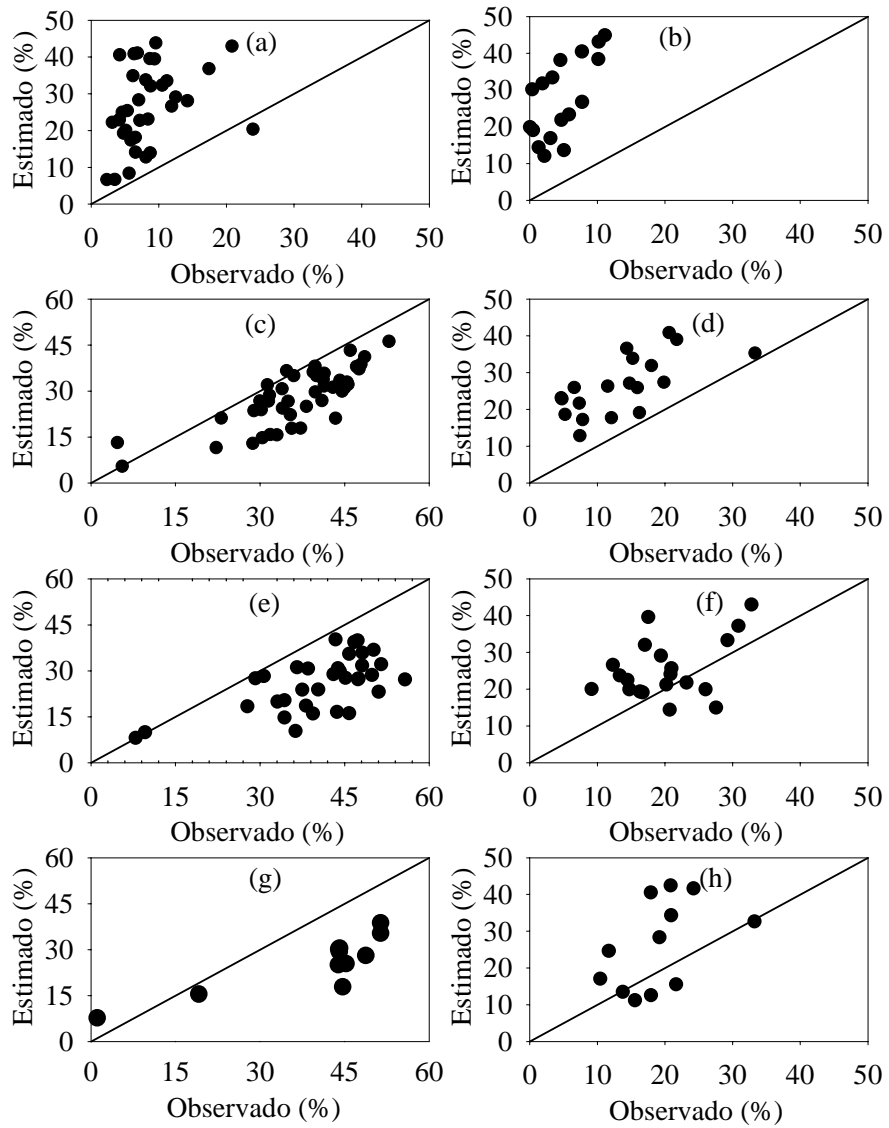


FIGURA 19 – Valores de perdas de água observados versus estimados pelo modelo de Seginer et al. (1991) utilizando, respectivamente, um único aspersor e laterais do aspersor (a, b) NY-7 ER, (c, d) NY-12, (e, f) Naan-12 e (g, h) NY-25.

Embora os aspersores utilizados neste trabalho tenham características um pouco diferentes dos usados no trabalho de Seginer et al. (1991), foram efetuadas as simulações com o intuito de averiguar a sensibilidade e a possível aplicação do modelo.

4.2.5 Modelo de Playán et al. (2005)

Na Figura 20 (a) observa-se alguma adequação entre os valores obtidos para testes com um único aspersor e os estimados pelo modelo geral proposto por Playán et al. (2005). Entretanto, estes pesquisadores realizaram ensaios com laterais de aspersores equipados com bocais de 4,4 mm x 2,4 mm. Já quando se faz a comparação entre os dados apresentados na Figura 20 (b), constata-se que os valores estimados são um pouco superiores aos observados em campo para testes com laterais de aspersores.

Nas Figuras 20 (c), 20 (d), 20 (e), 20 (f), 20 (g) e 20 (h) pode-se notar pouca ou nenhuma adequação entre os dados obtidos e os estimados pelo modelo de Playán et al. (2005), em virtude da diferença existente entre os aspersores utilizados. Realmente nota-se que o diâmetro de bocal é um fator de grande importância na avaliação de perdas de água por evaporação e arraste na irrigação por aspersão, de forma a inviabilizar um modelo como este para situações diferentes das quais ele foi desenvolvido.

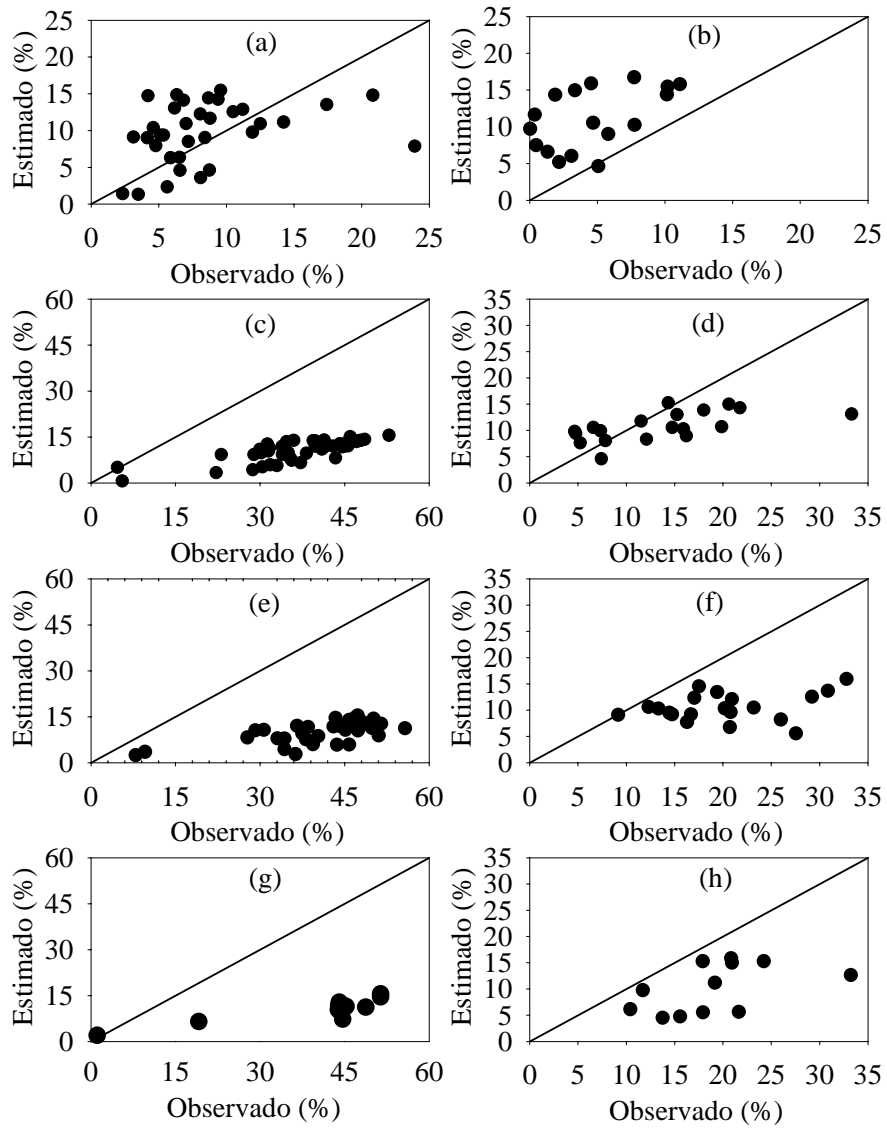


FIGURA 20 – Valores de perdas de água observados versus estimados pelo modelo de Playán et al. (2005) utilizando, respectivamente, um único aspersor e laterais do aspersor (a, b) NY-7 ER, (c, d) NY-12, (e, f) Naan-12 e (g, h) NY-25.

4.3 Modelagem dos valores de perdas de água por evaporação e arraste

Os modelos de Playán et al. (2005), Seginer et al. (1991), Tarjuelo et al. (2000), Trimmer (1987) e Yazar (1984) não representaram, de forma adequada, as perdas obtidas em avaliações de campo, para nenhum aspersor. Portanto, houve a necessidade de gerar modelos específicos para cada aspersor, levando-se em consideração variáveis ambientais (temperatura do ar, umidade relativa do ar, déficit de pressão do vapor e velocidade do vento), variáveis relacionadas ao aspersor (diâmetro e inclinação do bocal) e variável operacional (pressão de operação).

A seguir, são apresentados os modelos gerados a partir dos valores obtidos de perdas de água por evaporação e arraste, para testes com um único aspersor e também para testes com laterais de aspersores.

Na Equação 18 é apresentado o modelo gerado a partir de testes com um único aspersor e na equação 19 a partir de testes com laterais de aspersores, para estimativa de perdas de água por evaporação e arraste, na utilização de um aspersor NY-7 ER (bocais de 4,6 mm x 4,0 mm e inclinação do jato igual a 7°) operando em pressões entre 245 kPa e 343 kPa.

$$EA = 0,00259P_s + 7,2781\Delta e^{0,5} + 0,1252U \quad (18)$$

$$EA = -0,0177P_s + 4,2768\Delta e^{0,5} + 3,7499U \quad (19)$$

As Figuras 21, 24, 27 e 30 representam a dispersão dos valores obtidos de perdas de água versus os valores estimados pelo modelo, mostradas com o objetivo de confirmar a hipótese de linearidade anteriormente assumida com o uso das variáveis explicativas para as perdas de água e, também, para verificar a precisão do ajuste.

Nas Figuras 21 (a) e 21 (c), podem-se visualizar os valores simulados de perdas versus os valores medidos, para o aspersor NY-7 ER, podendo-se dizer que os dois modelos apresentaram ajuste aceitável, visto que os pontos estão situados ao redor da linha 1:1. Além disso, observando-se as Figuras 21 (b) e 21 (d), é possível notar que os resíduos obtidos nos ajustes dos modelos estão localizados ao redor de zero, indicando que os modelos mostraram ajustes satisfatórios.

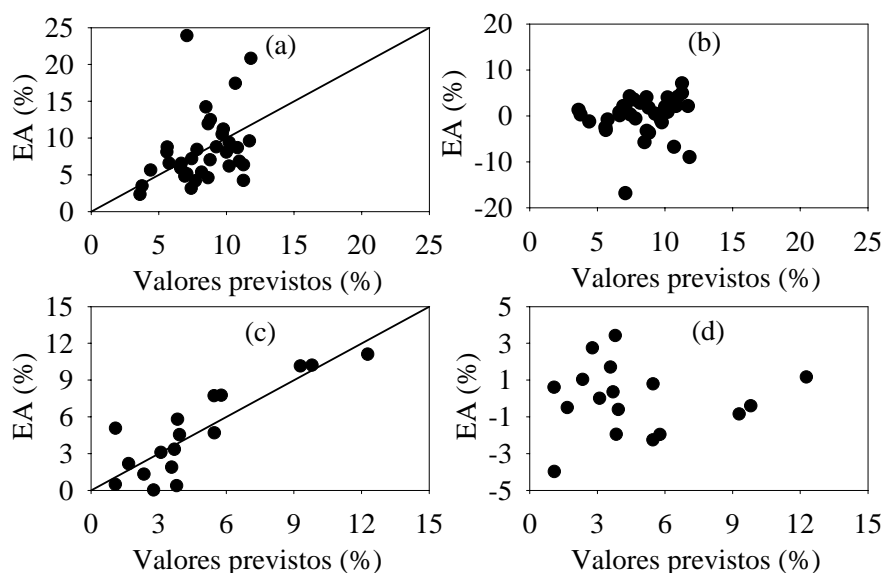


FIGURA 21 – Perdas obtidas versus valores previstos e resíduos versus valores previstos, para testes com um único aspersor (a, b) e com laterais de aspersores (c, d), na utilização do aspersor NY-7 ER.

Nas Figuras 22 e 23 é possível verificar a variação das perdas de água por evaporação e arraste, em função do déficit de pressão de vapor, velocidade do vento e pressão de operação, de acordo com os dois modelos gerados para o aspersor NY-7 ER (Equação 18 e Equação 19).

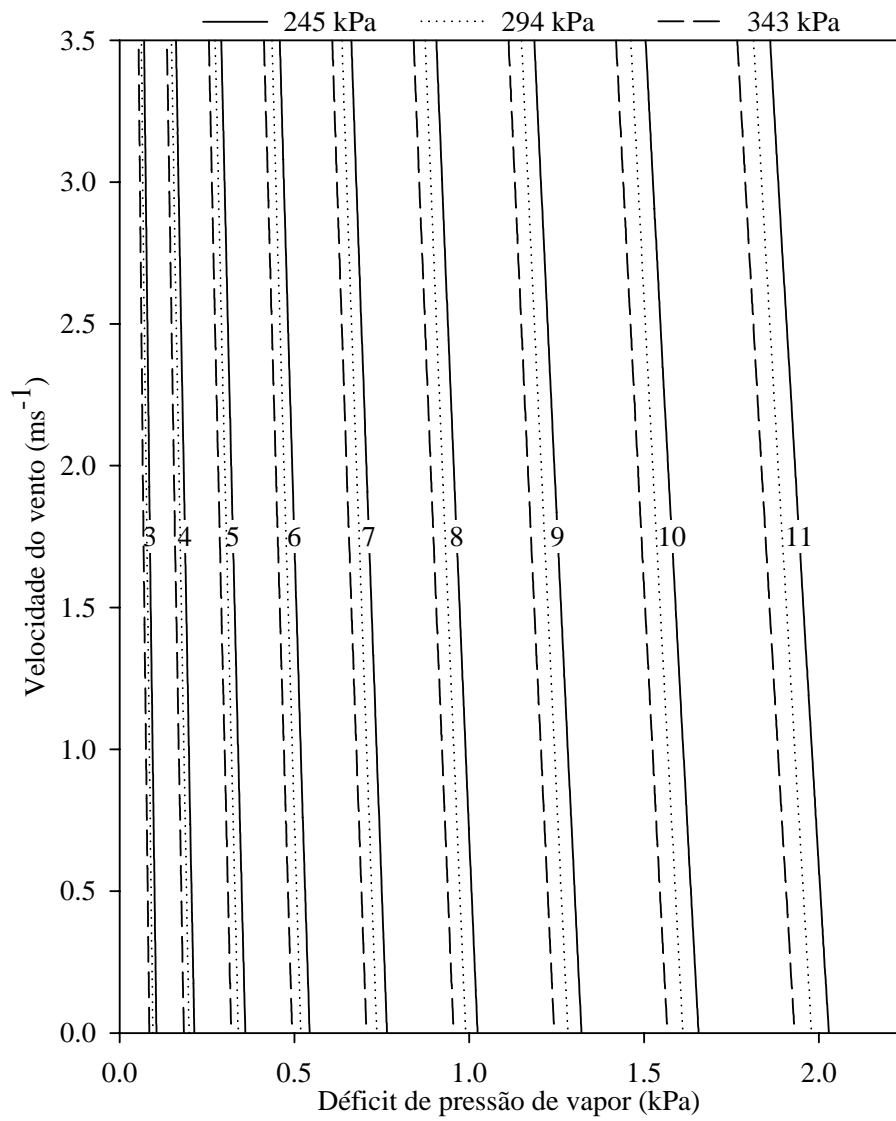


FIGURA 22 – Perdas obtidas por simulação, para testes com um único aspersor na utilização do aspersor NY-7, operando nas pressões de 245 Pa, 294 kPa e 343 kPa.

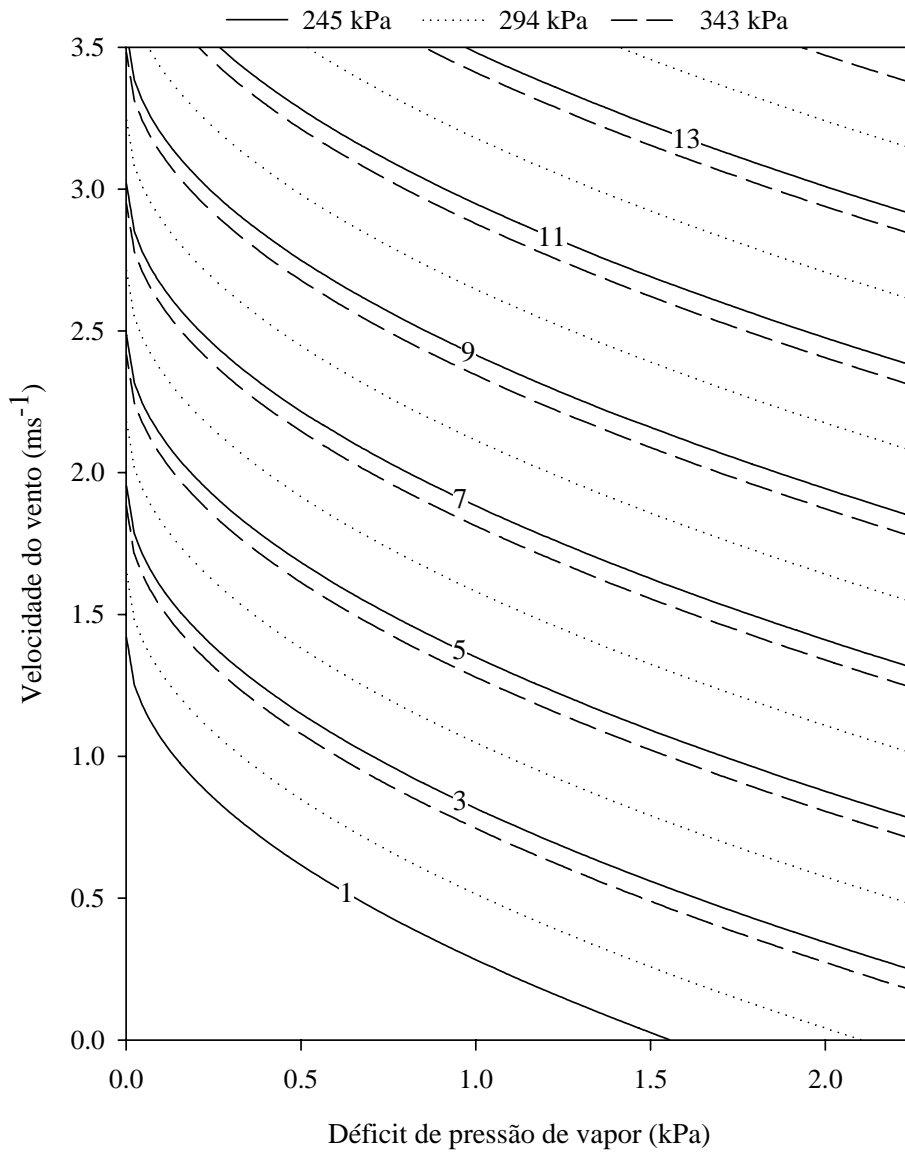


FIGURA 23 – Perdas obtidas por simulação, para testes com um laterais de aspersores, na utilização do aspersor NY-7, operando nas pressões de 245 Pa, 294 kPa e 343 kPa.

A equação 20 representa o modelo gerado a partir de testes com um único aspersor e a equação 21 a partir de testes com laterais de aspersores, para estimativa de perdas de água por evaporação e arraste, na utilização do aspersor NY-12 (bocal de 3,5 mm e inclinação igual a 12°) operando nas pressões de 196 kPa, 245 kPa e 294 kPa.

$$EA = 0,00862P_s + 28,5454\Delta e^{0,5} + 3,4335U \quad (20)$$

$$EA = -0,0304P_s + 13,2976\Delta e^{0,5} + 5,4850U \quad (21)$$

Na Figura 24 observa-se a dispersão dos valores obtidos de perdas de água versus os valores estimados pelos modelos gerados para o aspersor NY-12 (Equação 20 e Equação 21), mostradas com o objetivo de confirmar a hipótese de linearidade anteriormente assumida com o uso das variáveis explicativas para as perdas de água e também para verificar a precisão do ajuste.

Analisando-se as Figuras 24 (a) e 24 (c), se pode ver os valores simulados de perdas versus os valores medidos, para o aspersor NY-12, sendo possível dizer que os dois modelos apresentaram um bom ajuste, visto que os pontos estão situados ao redor da linha 1:1, sem haver uma grande dispersão. Além disso, observando-se as Figuras 24 (b) e 24 (d), é possível notar que os resíduos obtidos nos ajustes dos modelos estão localizados ao redor de zero, indicando que os modelos mostraram ajustes satisfatórios.

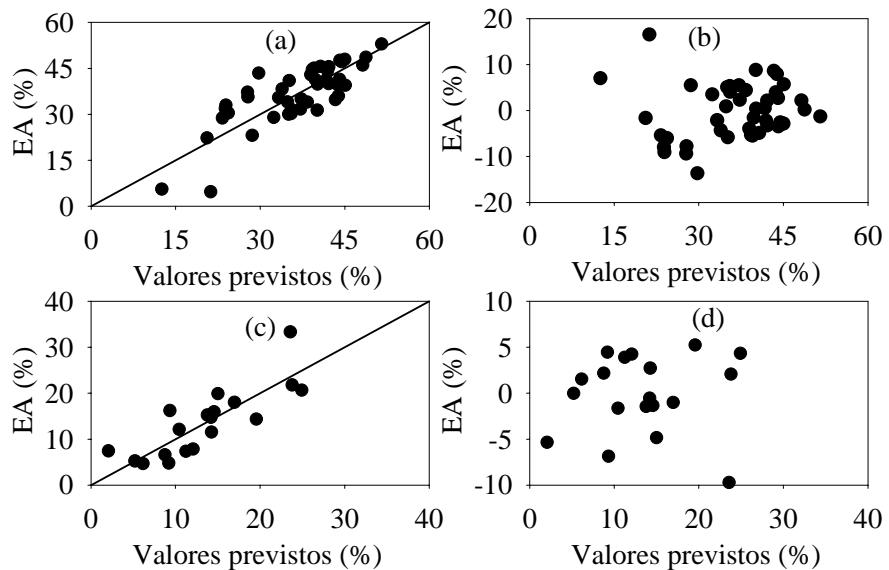


FIGURA 24 – Perdas obtidas versus valores previstos e resíduos versus valores previstos, para testes com um único aspersor (a, b) e com laterais de aspersores (c, d), na utilização do aspersor NY-12.

As Figuras 25 e 26 possibilitam verificar a variação das perdas de água por evaporação e arraste, em função do déficit de pressão de vapor, velocidade do vento e pressão de operação, de acordo com os dois modelos gerados para o aspersor NY-12 (Equação 20 e Equação 21).

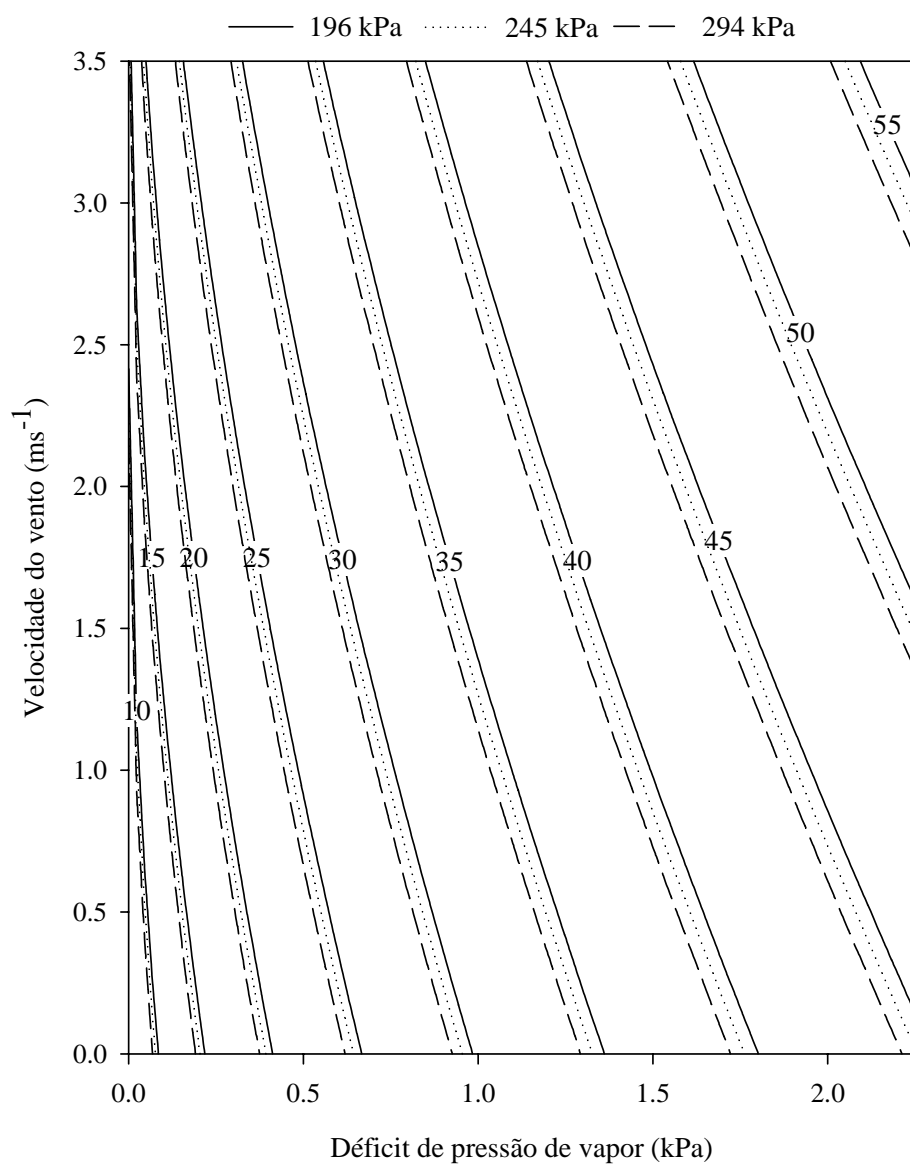


FIGURA 25 – Perdas obtidas por simulação, para testes com um único aspersor, na utilização do aspersor NY-12, operando nas pressões de 196 Pa, 245 kPa e 294 kPa.

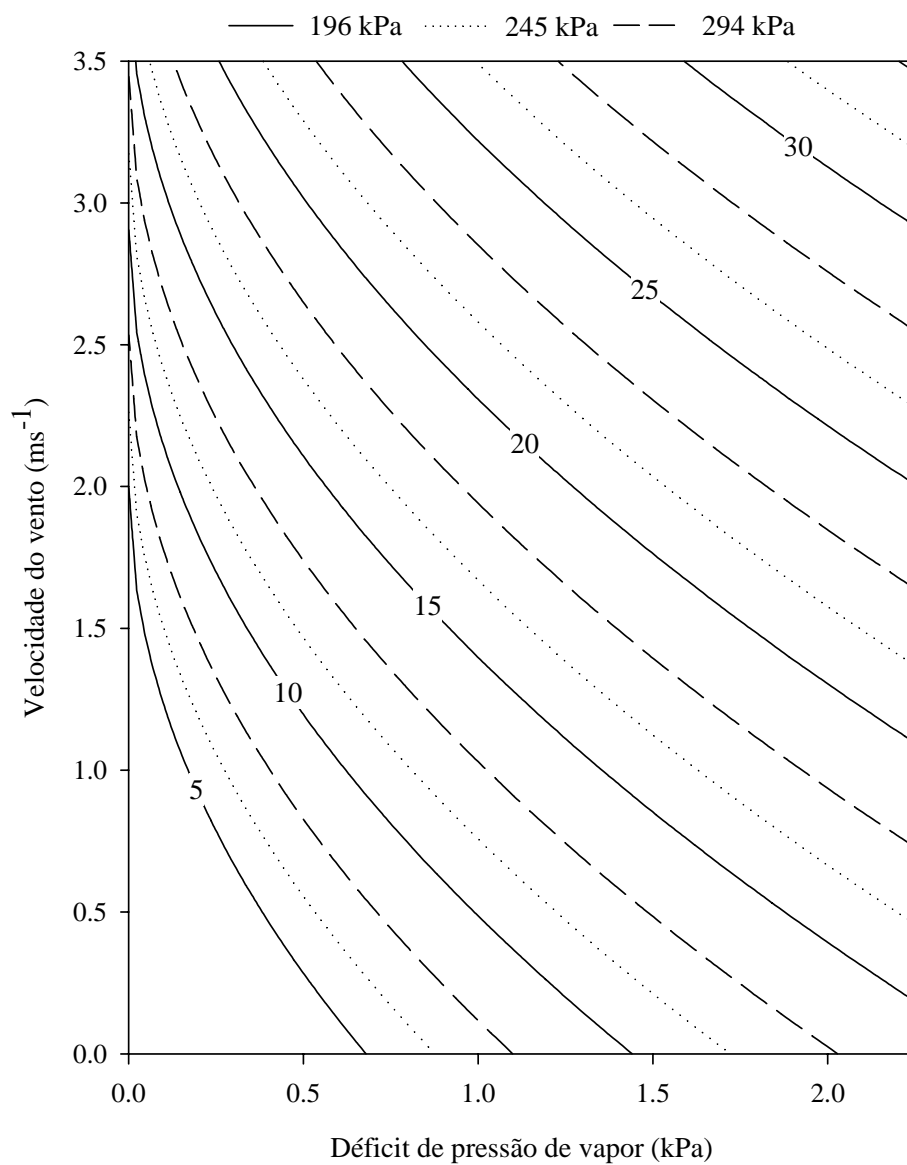


FIGURA 26 – Perdas obtidas por simulação, para testes com laterais de aspersores, na utilização do aspersor NY-12, operando nas pressões de 196 Pa, 245 kPa e 294 kPa.

As equações 22 e 23 representam, respectivamente, os modelos gerados a partir de testes com um único aspersor e testes com laterais de aspersores, para estimativa de perdas de água por evaporação e arraste, na utilização de um aspersor Naan-12 (bocal de 3,0 mm e inclinação igual a 12°), operando nas pressões de 245 kPa, 294 kPa e 343 kPa.

$$EA = 0,0315P_s + 20,100\Delta e^{0,5} + 10,1730U \quad (22)$$

$$EA = -0,00294P_s + 17,3716\Delta e^{0,5} + 2,4907U \quad (23)$$

A Figura 27 exibe a dispersão dos valores obtidos de perdas de água versus os valores estimados pelos modelos gerados para o aspersor Naan-12 (Equação 22 e Equação 23), mostradas com o objetivo de confirmar a hipótese de linearidade anteriormente assumida com o uso das variáveis explicativas para as perdas de água e também para verificar a precisão do ajuste.

Observando-se as Figuras 27 (a) e 27 (c) é possível visualizar os valores simulados de perdas versus os valores medidos, para o aspersor Naan-12, podendo-se dizer que os modelos (Equação 22 e Equação 23) apresentaram ajuste satisfatórios, visto que os pontos estão situados ao redor da linha 1:1, sem haver uma grande dispersão. Além disso, analisando-se as Figuras 27 (b) e 27 (d) é possível notar que os resíduos obtidos nos ajustes dos modelos estão localizados ao redor de zero, indicando que os modelos mostraram ajustes satisfatórios.

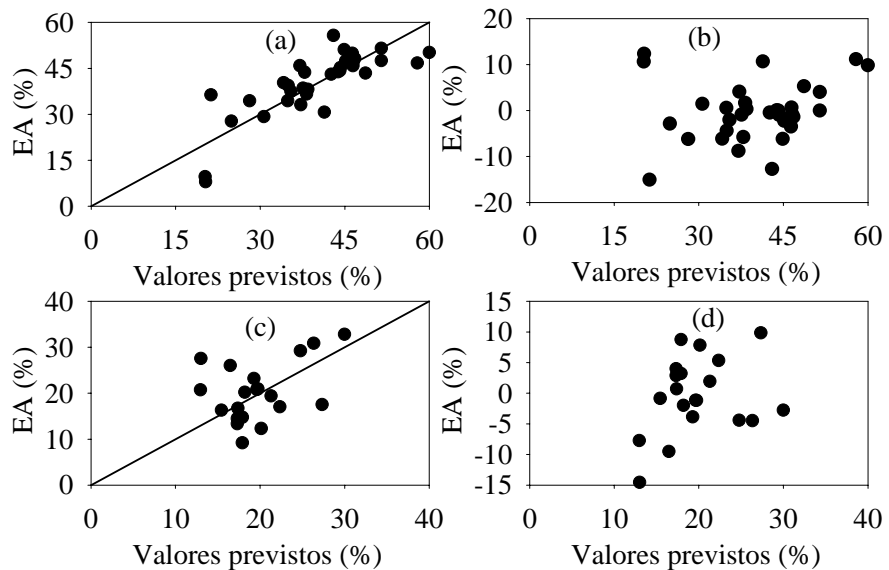


FIGURA 27 – Perdas obtidas versus valores previstos e resíduos versus valores previstos, para testes com um único aspersor (a, b) e com laterais de aspersores (c, d), na utilização do aspersor Naan-12.

As Figuras 28 e 29 possibilitam verificar a variação das perdas de água por evaporação e arraste em função do déficit de pressão de vapor, velocidade do vento e pressão de operação, de acordo com os dois modelos gerados para o aspersor Naan-12 (Equação 22 e Equação 23).

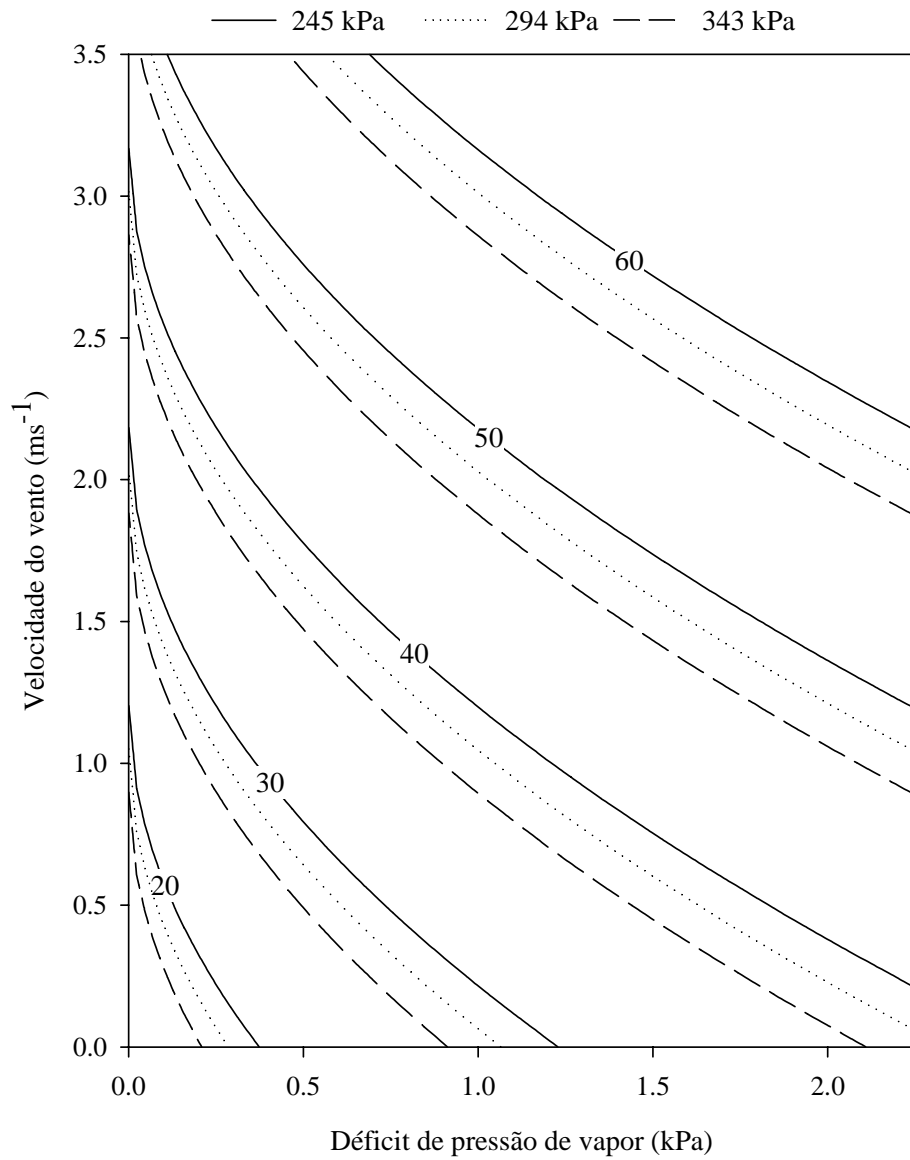


FIGURA 28 – Perdas obtidas por simulação, para testes com um único aspersor, na utilização do aspersor Naan-12, operando nas pressões de 245 kPa, 294 kPa e 343 kPa.

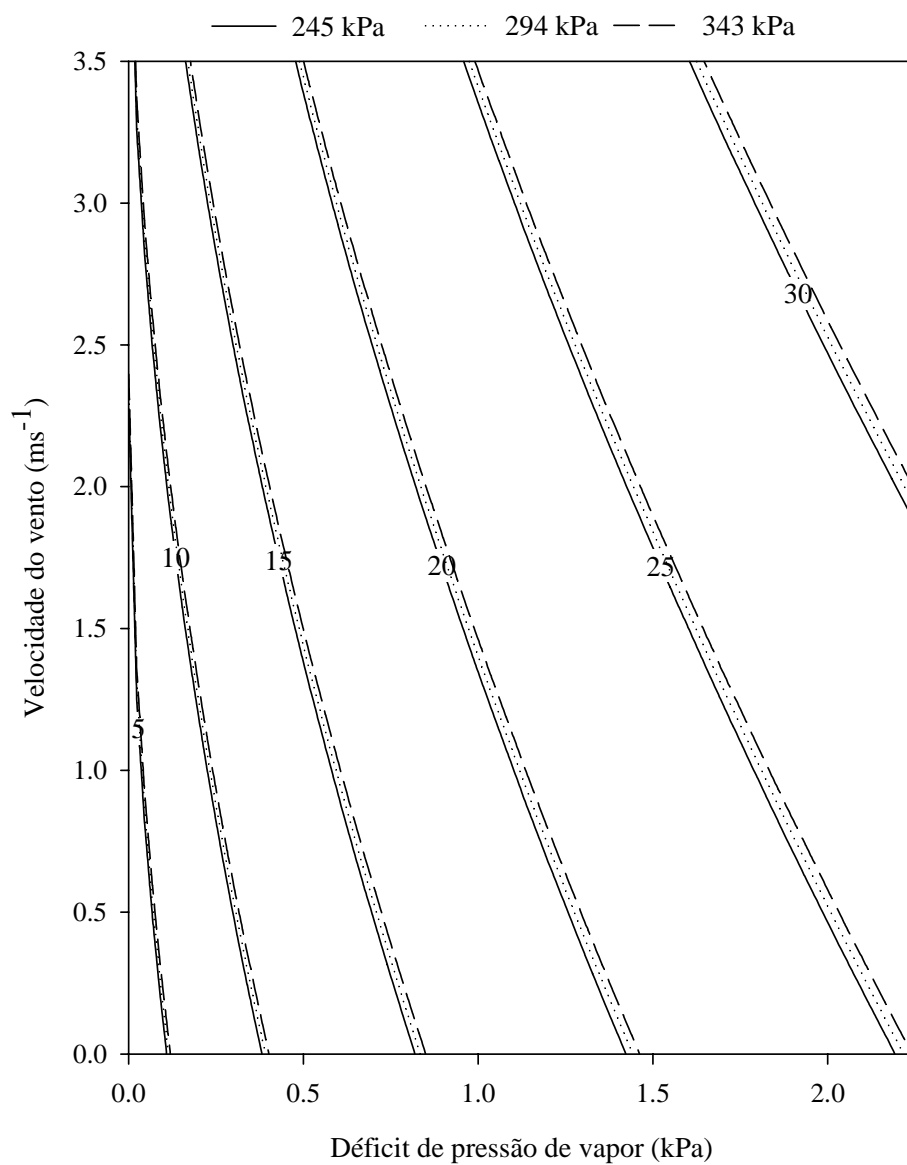


FIGURA 29 – Perdas obtidas por simulação, para testes com laterais de aspersores, na utilização do aspersor Naan-12, operando nas pressões de 245 Pa, 294 kPa e 343 kPa.

As Equações 24 e 25 representam, respectivamente, os modelos gerados a partir de testes com um único aspersor e testes com laterais de aspersores, para estimativa de perdas de água por evaporação e arraste, na utilização de um aspersor NY-25 (bocais de 2,8 mm x 2,5 mm e inclinação igual a 25°), operando nas pressões de 196 kPa e 245 kPa.

$$EA = -0,0395P_s + 34,0251\Delta e^{0,5} + 11,4216U \quad (24)$$

$$EA = 0,0286P_s + 5,2193\Delta e^{0,5} + 6,9137U \quad (25)$$

As Figuras 30 (a) e 30 (c) permitem a visualização dos valores simulados de perdas versus os valores medidos, para o aspersor NY-25, podendo-se dizer que os modelos (Equação 24 e Equação 25) apresentaram um bom ajuste, visto que os pontos estão situados ao redor da linha 1:1, sem haver uma grande dispersão. Além disso, observando-se as Figuras 30 (b) e 30 (d) é possível notar que os resíduos obtidos nos ajustes dos modelos estão localizados ao redor de zero, indicando que os modelos mostraram ajustes satisfatórios, sendo recomendada sua utilização.

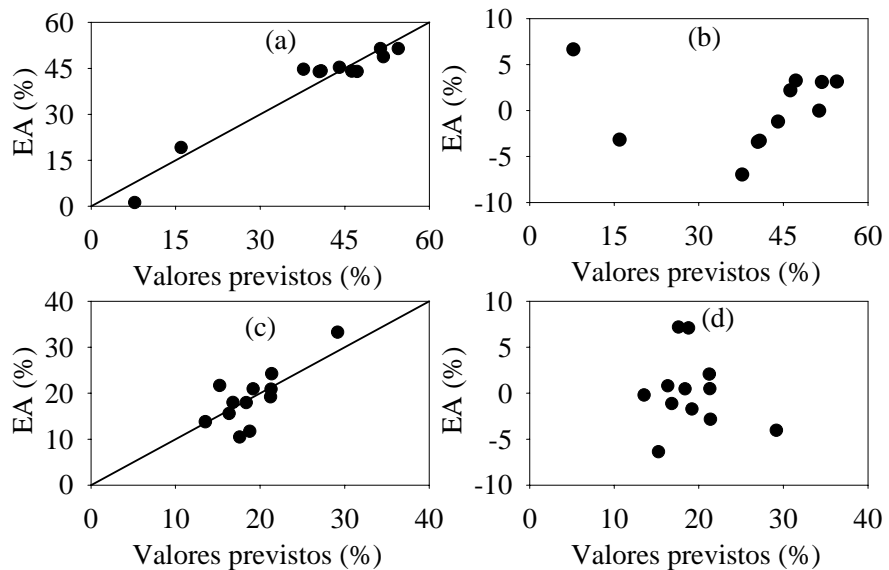


FIGURA 30 – Perdas obtidas versus valores previstos e resíduos versus valores previstos, para testes com um único aspersor (a, b) e com laterais de aspersores (c, d), na utilização do aspersor NY-25.

As Figuras 31 e 32 possibilitam verificar a variação das perdas de água por evaporação e arraste em função do déficit de pressão de vapor, velocidade do vento e pressão de operação, de acordo com os dois modelos gerados para o aspersor NY-25 (Equação 24 e Equação 25).

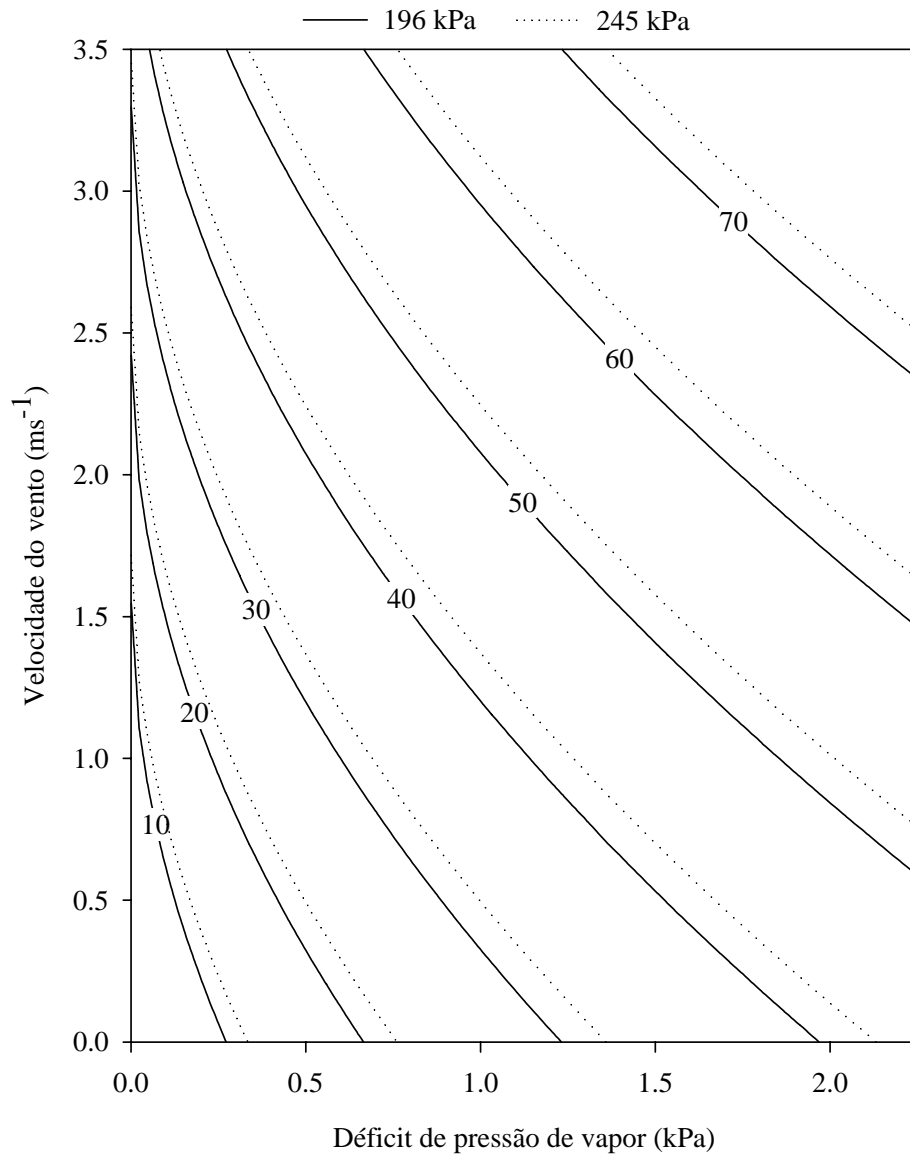


FIGURA 31 – Perdas obtidas por simulação, para testes com um único aspersor, na utilização do aspersor NY-25, operando nas pressões de 196 Pa e 245 kPa.

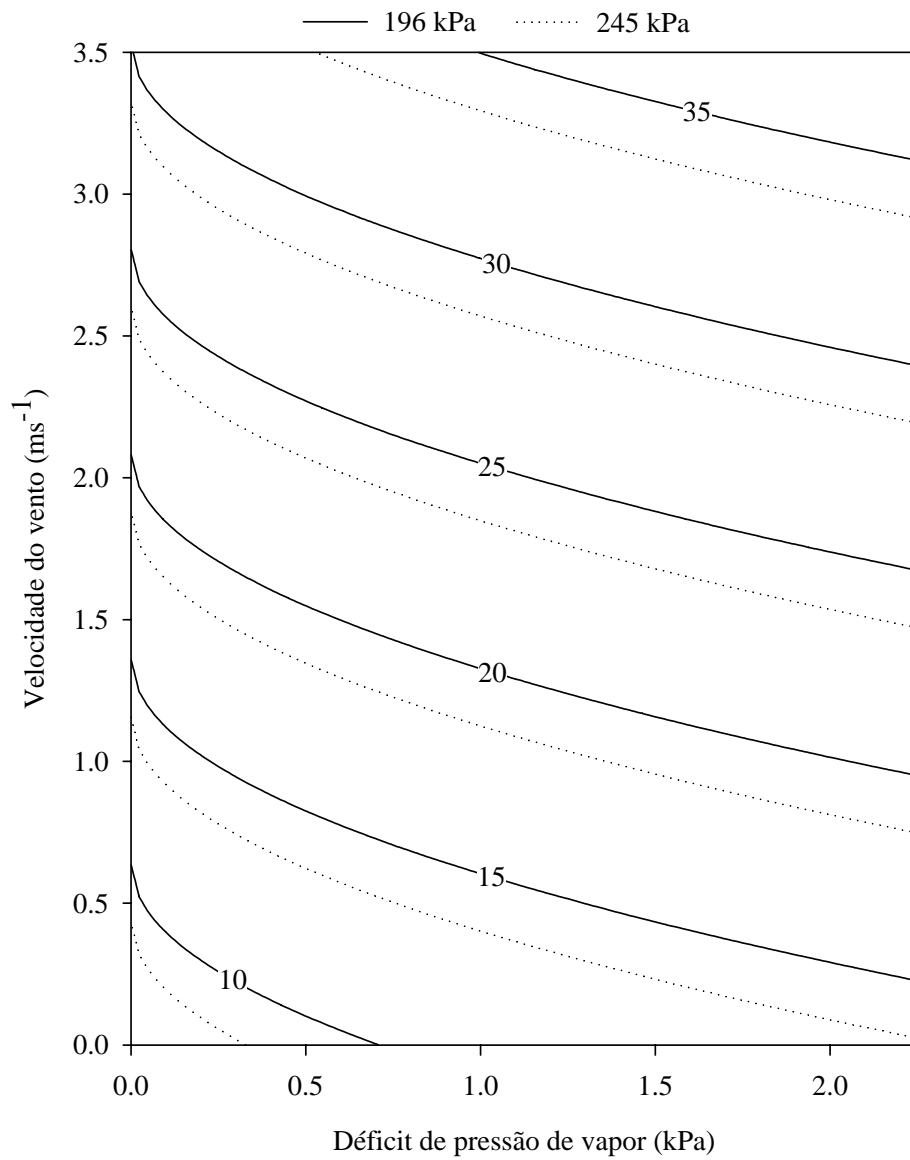


FIGURA 32 – Perdas obtidas por simulação, para testes com laterais de aspersores, na utilização do aspersor NY-25, operando nas pressões de 196 Pa e 245 kPa.

5 CONCLUSÕES

Com base nos testes de campo para a determinação das perdas de água por evaporação e arraste, nas simulações e modelagens realizadas, foi possível concluir que:

- a) as perdas apresentaram grande relação com o déficit de pressão de vapor do ar e com a velocidade do vento, sendo mais influenciadas pelo diâmetro do bocal do que pela pressão de operação;
- b) nos testes de campo com um único aspersor as perdas de água por evaporação e arraste foram bastante superiores às perdas obtidas com laterais de aspersores funcionando simultaneamente;
- c) os modelos usados para simular as perdas de água por evaporação e arraste apresentaram, em geral, pouca ou nenhuma adequação aos resultados obtidos em testes de campo. As exceções foram os modelos de Trimmer (1987) e Yazar (1984), quando utilizados para simular perdas de água na utilização de laterais de aspersores Agropolo equipado com bocais de 4,6 mm x 4,0 mm, dos modelos de Tarjuelo et al. (2000) e Playán et al. (2005), quando utilizados para simular perdas de água para testes com um único aspersor Agropolo (bocais de 4,6 mm x 4,0 mm), do modelo de Seginer et al. (1991), quando aplicado a testes com um único aspersor Agropolo (bocal de 3,5 mm) e a laterais de aspersores Naan (bocal de 3,0 mm), e do modelo de Playán et al. (2005), quando aplicado a testes com laterais de aspersores Agropolo (bocal de 3,5 mm);
- d) é necessária muita atenção na adoção de um dado modelo empírico para estimativa de perdas de água por evaporação e arraste na irrigação por aspersão convencional, analisando-se as limitações de cada modelo, como, por exemplo, diâmetro de bocal, pressão de operação e ângulo de inclinação do jato utilizados para gerar tal modelo;

e) os modelos específicos gerados para cada aspersor, tanto a partir de testes com um único aspersor como também de laterais de aspersores, representaram de forma adequada os dados de campo, comprovando e indicando a utilização de todos os modelos gerados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, H. J.; BERNARDO, S.; RAMOS, M. M.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R. Influência de elementos do clima no desperdício de energia em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 336-341, set./dez. 1999.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 611 p.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **CR10X measurement and control module**: instruction manual. Leicester, UK: Campbell Scientific, 1995.

CARRIÓN, P.; TARJUELO, J. M.; MONTERO, J. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. Part I: Description of model. **Irrigation Science**, New York, v. 20, n. 2, p. 73-84, June 2001.

CHRISTOFIDIS, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. **Revista ITEM (Irrigação & Tecnologia Moderna)**. São Paulo, SP: 2001. n.49, p. 8-13.

DECHMI, F.; PLAYÁN, E.; CAVERO, J.; FACI, J. M.; MARTINEZ-COB, A. Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (*Zea mays*). **Irrigation Science**, New York, v. 22, n. 2, p. 67-77, Sept. 2003.

DYLLA, A. S.; SHULL, H. Estimating losses from a rotating-boom sprinkler. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 26, n. 1, p. 123-125, Jan./Feb. 1983.

EDLING, R. J. Kinetic Energy, evaporation and wind drift of droplets from low pressure irrigation nozzles. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 28, n. 5, p. 1543-1550, Sept./Oct. 1985.

FACI, J. M.; BERCERO, A. Efecto del viento em la uniformidad y em las perdidas por evaporación y arraste en riego por aspersión. **Investigation Agraria: Produccion y Proteccion Vegetable**, Madrid, v. 6, n. 2, p. 171-180, 1991.

FACI, J. M.; SALVADOR, R.; PLAYÁN, E.; SOURELL, H. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 127, n. 4, p. 224-233, July/Aug. 1991.

FRIZZONE, J. A.; DOURADO NETO, D. Avaliação de sistemas de irrigação. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2003. v. 2, 703 p.

FROST, K. R.; SCHWALEN, H. C. Sprinkler evaporation losses. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 36, n. 8, p. 526-528, Aug. 1955.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: AnaviBook/Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

KINCAID, D. C. Spraydrop kinetic energy from irrigation sprinklers. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 39, n. 3, p. 847-853, May/June 1996.

KINCAID, D. C.; LONGLEY, T. S. A water droplet evaporation and temperature model. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 32, n. 2, p. 457-463, Mar./Apr. 1989.

KINCAID, D. C.; SOLOMON, K. H.; OLIPHANT, J. C. Drop size distributions for irrigation sprinklers. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 39, n. 3, p. 839-845, May/June 1996.

KOHL, K. D.; KOHL, R. A.; DeBoer, D. W. Measurement of low pressure sprinkler evaporation loss. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 30, n. 4, p. 1071-1074, July/Aug. 1987.

KOHL, R. A. Drop size distribution from medium-sized agricultural sprinklers. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 17, n. 4, p. 690-693, July/Aug. 1974.

KRAUS, J. H. Application efficiency of sprinkler irrigation and its effects on microclimate. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, n. 4, p. 642-645, July/Aug. 1966.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Irrigação por aspersão em hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Embrapa Hortaliças, 2001. 111 p.

MONTERO, J.; ORTEGA, J. F.; TARJUELO, J. M.; HONRUBIA, F. T. Análisis de las pérdidas por evaporación y arraste en el riego por aspersión. In: CONGRESSO NACIONAL DE RIEGOS, 15., 1997, Madrid. **Proceedings...** Madrid: Asociación Española de Riegos y Drenajes, 1997. p. 144-152.

MONTERO, J.; TARJUELO, J. M.; ORTEGA, J. F. Heterogeneity analysis of the irrigation in fields with medium size sprinklers. **Agricultural Engineering International, the CIGR Ejournal**, v. 2, p. 1-11, Mar. 2000. Disponível em: <<http://cigr-ejournal.tamu.edu>>. Acesso em: 28 jun. 2006.

ORTEGA, J. F.; TARJUELO, J. M.; MONTERO, J.; DE JUAN, J. A. Discharge efficiency in sprinkling irrigation: analysis of the evaporation and drift losses in semi-arid areas. **Agricultural Engineering International, the CIGR Ejournal**, v. 2, p. 1-21, Mar. 2000. Disponível em: <<http://cigr-ejournal.tamu.edu>>. Acesso em: 28 jun. 2006.

ORTEGA, J. F.; TARJUELO, J. M.; DE JUAN, J. A.; CARRIÓN, P. Uniformity distribution and its economic effect on irrigation management in semiarid zones. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 130, n. 4, p. 257-268, July/Aug. 2004.

PEREIRA, G. M. **Simulação das perdas de água por evaporação e da uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão**. 1995. 125 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PEREIRA, G. M. Aspersão Convencional. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2003. v. 2, 703 p.

PLAYÁN, E.; SALVADOR, R.; FACI, J. M.; ZAPATA, N.; MARTÍNEZ-COB, A.; SÁNCHEZ, I. Day and night Wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 76, n. 3, p. 139-159, Aug. 2005.

SEGINER, I.; KANTZ, D.; NIR, D. The distortion by wind of the distribution patterns of single sprinklers. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 19, n. 4, p. 341-359, May 1991.

SEGINER, I.; KOSTRINSKY, M. Wind, sprinkler patterns, and system design. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Reston, v. 101, n. 3, p. 251-264, Sept. 1975.

SMAJSTRLA, A. G.; ZAZUETA, F. S. Evaporation loss during sprinkler irrigation. **Agricultural and Biological Engineering Department**, Florida, 2003. 8 p.

TARJUELO, J. M. **El riego por aspersión y su tecnología**. 2. ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1999. 565 p.

TARJUELO, J. M.; MONTERO, J.; HONRUBIA, F. T.; ORTIZ, J. J.; ORTEGA, J. F. Analysis of uniformity of sprinkle irrigation in a semi-arid area. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 40, n. 2/3, p. 315-331, May 1999.

TARJUELO, J. M.; ORTEGA, J. F.; MONTERO, J.; JUAN, J. A. Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 43, n. 3, p. 263-284, Apr. 2000.

TELLES, D. A. Irrigação. In: AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F.; ARUAÚJO, R.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 669 p.

THOMPSON, A. L.; GILLEY, J. R.; NORMAN, J. M. A sprinkler water droplet evaporation and plant canopy model: I. Model Development. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 36, n. 3, p. 735-741, May/June 1993.

TRIMMER, W. L. Sprinkler evaporation loss equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 113, n. 4, p. 616-620, Nov. 1987.

VON BERNUTH, R. D. Effect of trajectory angle on performance of sprinklers in wind. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 114, n. 4, p. 579-587, Nov. 1988.

YAZAR, A. Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating condition. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 8, n. 4, p. 439-449, 1984.

ANEXOS

	Página
TABELA 1 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com um único aspersor NY-7 ER, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).....	84
TABELA 2 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com um único aspersor NY-12, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).....	86
TABELA 3 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com um único aspersor Naan-12, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).....	88
TABELA 4 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com um único aspersor NY-25, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).....	90
TABELA 5 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com laterais de aspersores NY-7 ER, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).....	91
TABELA 6 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com laterais de aspersores NY-12, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).....	92
TABELA 7 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com laterais de aspersores Naan-12, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).....	93
TABELA 8 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com laterais de aspersores NY-25, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).....	94

TABELA 1 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com um único aspersor NY-7 ER, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).

Bocais (mm)	Inclin. (°)	P_s (kPa)	T (°C)	UR (%)	U (m/s)	Δe (kPa)	EA (%)
4,6x4,0	7	245	24,54	78,31	0,62	0,6676	6,54
4,6x4,0	7	245	29,54	54,46	0,38	1,8794	17,42
4,6x4,0	7	245	26,69	65,38	1,38	1,2105	12,50
4,6x4,0	7	245	25,15	65,69	1,85	1,0952	14,22
4,6x4,0	7	245	24,77	73,77	1,75	0,8185	7,19
4,6x4,0	7	245	22,15	83,00	0,67	0,4530	8,74
4,6x4,0	7	245	28,85	52,15	1,25	1,8977	8,67
4,6x4,0	7	245	26,38	64,69	1,02	1,2123	7,02
4,6x4,0	7	245	16,00	90,85	0,03	0,1662	2,33
4,6x4,0	7	294	27,23	68,15	0,68	1,1495	11,92
4,6x4,0	7	294	31,00	49,38	0,65	2,2712	20,82
4,6x4,0	7	294	29,77	47,46	1,22	2,1972	9,58
4,6x4,0	7	294	23,69	78,38	0,57	0,6324	5,87
4,6x4,0	7	294	27,00	59,08	1,05	1,4570	10,50
4,6x4,0	7	294	24,69	70,77	0,98	0,9078	8,41
4,6x4,0	7	294	22,38	83,23	0,85	0,4532	6,56
4,6x4,0	7	294	27,00	58,62	1,43	1,4734	11,20
4,6x4,0	7	294	27,46	65,15	2,23	1,2748	8,79
4,6x4,0	7	294	28,38	60,08	3,20	1,5406	9,38
4,6x4,0	7	294	23,00	72,62	2,02	0,7682	3,13
4,6x4,0	7	294	16,69	91,08	0,00	0,1693	3,48
4,6x4,0	7	343	23,15	85,69	0,60	0,4052	8,10
4,6x4,0	7	343	23,31	77,00	2,31	0,6575	23,91
4,6x4,0	7	343	28,31	60,69	1,30	1,5109	8,07
4,6x4,0	7	343	23,92	72,54	1,88	0,8144	4,15
4,6x4,0	7	343	25,77	65,85	0,00	1,1309	4,59
4,6x4,0	7	343	27,77	57,77	1,35	1,5729	6,17
4,6x4,0	7	343	28,85	50,46	1,36	1,9647	6,33
4,6x4,0	7	343	29,00	50,77	1,23	1,9694	4,21

...continua...

TABELA 1, Cont.

Bocais (mm)	Inclin. (°)	Ps (kPa)	T (°C)	UR (%)	U (m/s)	Δe (kPa)	EA (%)
4,6x4,0	7	343	25,77	71,85	2,02	0,9322	5,35
4,6x4,0	7	343	29,54	56,23	2,23	1,8064	6,83
4,6x4,0	7	343	21,85	75,85	1,95	0,6319	4,79
4,6x4,0	7	343	20,08	71,46	1,89	0,6698	5,12
4,6x4,0	7	343	17,85	88,62	0,06	0,2324	5,62

TABELA 2 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com um único aspersor NY-12, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).

Bocal (mm)	Inclin. (°)	P_s (kPa)	T (°C)	UR (%)	U (m/s)	Δe (kPa)	EA (%)
3,5	12	196	22,85	79,31	0,13	0,5753	31,78
3,5	12	196	24,62	73,08	0,58	0,8326	43,40
3,5	12	196	29,38	58,85	2,92	1,6827	48,56
3,5	12	196	25,00	64,92	2,45	1,1098	39,78
3,5	12	196	25,15	64,15	0,85	1,1443	40,96
3,5	12	196	26,92	61,31	0,94	1,3712	33,91
3,5	12	196	23,08	80,00	0,23	0,5639	32,98
3,5	12	196	27,46	62,69	1,37	1,3648	41,36
3,5	12	196	25,46	68,77	1,00	1,0154	38,23
3,5	12	196	23,31	78,15	1,02	0,6246	37,18
3,5	12	196	26,31	56,54	2,20	1,4859	41,35
3,5	12	196	21,46	75,92	1,09	0,6152	35,61
3,5	12	196	28,08	58,08	1,29	1,5899	39,99
3,5	12	196	23,62	69,54	0,00	0,8872	23,10
3,5	12	245	30,00	53,85	0,47	1,9556	39,73
3,5	12	245	25,23	69,69	0,62	0,9721	28,91
3,5	12	245	22,23	81,46	0,62	0,4964	30,40
3,5	12	245	27,23	60,69	0,82	1,4187	42,91
3,5	12	245	29,46	55,77	1,12	1,8170	47,08
3,5	12	245	26,54	56,54	1,33	1,5062	41,20
3,5	12	245	26,46	58,92	1,17	1,4170	31,30
3,5	12	245	27,23	61,69	1,46	1,3826	45,59
3,5	12	245	21,62	86,23	0,42	0,3553	22,21
3,5	12	245	25,46	64,23	0,62	1,1630	29,96
3,5	12	245	25,00	70,85	1,55	0,9222	33,98
3,5	12	245	30,00	48,92	1,19	2,1645	46,00
3,5	12	245	26,00	57,00	2,17	1,4435	35,95
3,5	12	245	23,46	70,69	2,08	0,8455	30,21
3,5	12	245	28,69	55,62	1,02	1,7438	34,71

...continua...

TABELA 2, Cont.

Bocal (mm)	Inclin. (°)	Ps (kPa)	T (°C)	UR (%)	U (m/s)	Δe (kPa)	EA (%)
3,5	12	245	20,77	81,69	0,00	0,4484	4,69
3,5	12	294	25,38	74,54	1,40	0,8239	35,37
3,5	12	294	29,62	53,69	0,85	1,9200	47,89
3,5	12	294	26,31	62,69	0,68	1,2756	31,65
3,5	12	294	26,92	61,00	1,00	1,3822	45,02
3,5	12	294	28,62	54,31	0,99	1,7880	47,57
3,5	12	294	30,31	49,54	2,01	2,1766	52,87
3,5	12	294	21,31	84,15	0,78	0,4012	28,72
3,5	12	294	25,69	58,15	1,78	1,3794	45,43
3,5	12	294	27,00	57,23	2,13	1,5229	39,40
3,5	12	294	26,27	66,18	0,68	1,1536	31,49
3,5	12	294	26,08	62,46	1,34	1,2662	44,55
3,5	12	294	26,08	69,23	1,64	1,0379	34,97
3,5	12	294	27,15	58,77	1,36	1,4810	44,16
3,5	12	294	15,00	92,77	0,00	0,1231	5,54

TABELA 3 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com um único aspersor Naan-12, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).

Bocal (mm)	Inclin. (°)	P_s (kPa)	T (°C)	UR (%)	U (m/s)	Δe (kPa)	EA (%)
3,0	12	245	27,91	65,36	0,00	1,3008	29,18
3,0	12	245	27,77	61,77	0,58	1,4240	38,51
3,0	12	245	27,46	60,46	0,62	1,4463	36,57
3,0	12	245	24,54	64,46	1,40	1,0939	55,72
3,0	12	245	22,15	80,62	1,46	0,5164	45,80
3,0	12	245	24,77	68,92	0,78	0,9699	37,50
3,0	12	245	25,46	64,77	1,68	1,1455	49,84
3,0	12	245	26,54	65,62	1,15	1,1915	30,67
3,0	12	245	26,92	54,23	1,29	1,6221	45,80
3,0	12	245	21,00	87,54	0,23	0,3095	36,29
3,0	12	245	26,38	60,54	1,46	1,3547	48,09
3,0	12	245	25,85	61,00	2,05	1,2977	51,47
3,0	12	245	22,15	72,69	0,00	0,7277	27,74
3,0	12	294	24,38	83,46	0,45	0,5042	34,33
3,0	12	294	28,31	56,46	1,13	1,6735	48,16
3,0	12	294	26,00	59,69	1,10	1,3532	43,82
3,0	12	294	24,54	72,46	1,68	0,8477	51,04
3,0	12	294	23,08	74,23	1,06	0,7265	33,09
3,0	12	294	22,92	80,62	1,36	0,5411	43,66
3,0	12	294	24,38	66,38	2,15	1,0250	47,46
3,0	12	294	25,38	61,85	1,08	1,2345	43,03
3,0	12	294	28,00	47,08	0,87	1,9977	47,30
3,0	12	294	18,08	85,62	0,00	0,2979	9,60
3,0	12	343	27,15	71,38	0,29	1,0281	40,30
3,0	12	343	26,00	61,23	1,02	1,3015	44,15
3,0	12	343	25,92	66,69	1,29	1,1130	47,37
3,0	12	343	22,00	79,54	0,92	0,5402	39,36
3,0	12	343	26,00	65,62	1,16	1,1541	45,15
3,0	12	343	29,33	50,69	0,92	2,0105	43,38

...continua...

TABELA 3, Cont.

Bocal (mm)	Inclin. (°)	Ps (kPa)	T (°C)	UR (%)	U (m/s)	Δe (kPa)	EA (%)
3,0	12	343	28,15	54,38	2,02	1,7372	46,70
3,0	12	343	22,00	75,23	1,12	0,6540	38,16
3,0	12	343	26,38	55,85	2,40	1,5158	50,15
3,0	12	343	24,31	74,00	0,61	0,7893	34,34
3,0	12	343	16,85	88,38	0,00	0,2227	7,95

TABELA 4 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com um único aspersor NY-25, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).

Bocais (mm)	Inclin. (°)	P_s (kPa)	T (°C)	UR (%)	U (m/s)	Δe (kPa)	EA (%)
2,8x2,5	25	196	24,92	66,38	2,15	1,0586	48,74
2,8x2,5	25	196	21,38	77,23	1,71	0,5790	44,66
2,8x2,5	25	196	26,31	59,62	0,75	1,3806	44,10
2,8x2,5	25	196	22,38	64,08	1,60	0,9706	45,25
2,8x2,5	25	196	25,38	52,85	1,77	1,5257	51,36
2,8x2,5	25	196	17,23	89,46	0,00	0,2070	1,11
2,8x2,5	25	245	26,00	63,23	1,67	1,2344	43,95
2,8x2,5	25	245	24,00	67,54	1,46	0,9673	43,89
2,8x2,5	25	245	23,62	59,23	1,65	1,1875	44,06
2,8x2,5	25	245	26,54	47,38	1,32	1,8237	51,38
2,8x2,5	25	245	21,38	77,69	0,00	0,5672	19,13

TABELA 5 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com laterais de aspersores NY-7 ER, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).

Bocais (mm)	Inclin. (°)	P_s (kPa)	T (°C)	UR (%)	U (m/s)	Δe (kPa)	EA (%)
4,6x4,0	7	245	23,00	79,64	1,12	0,5713	3,09
4,6x4,0	7	245	29,00	52,18	2,85	1,9130	11,11
4,6x4,0	7	245	27,45	54,91	2,17	1,6484	10,14
4,6x4,0	7	245	24,91	71,00	1,09	0,9125	5,80
4,6x4,0	7	245	20,00	68,55	0,92	0,7344	0,03
4,6x4,0	7	245	18,18	78,00	1,01	0,4586	1,32
4,6x4,0	7	294	25,55	68,45	1,77	1,0313	7,75
4,6x4,0	7	294	28,64	51,64	2,43	1,8947	10,20
4,6x4,0	7	294	21,45	83,18	0,93	0,4295	5,07
4,6x4,0	7	294	20,18	67,73	1,85	0,7620	4,68
4,6x4,0	7	294	17,00	82,00	1,16	0,3483	2,17
4,6x4,0	7	294	24,27	49,27	0,96	1,5364	3,35
4,6x4,0	7	294	25,82	41,27	1,25	1,9507	7,72
4,6x4,0	7	343	23,00	75,36	0,96	0,6913	0,48
4,6x4,0	7	343	26,45	62,82	1,34	1,2817	0,38
4,6x4,0	7	343	23,64	52,36	1,23	1,3893	1,88
4,6x4,0	7	343	25,82	45,27	1,13	1,8178	4,53

TABELA 6 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com laterais de aspersores NY-12, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).

Bocal (mm)	Inclin. (°)	P_s (kPa)	T (°C)	UR (%)	U (m/s)	Δe (kPa)	EA (%)
3,5	12	196	25,73	65,91	1,25	1,1263	19,85
3,5	12	196	25,00	67,18	1,27	1,0383	15,91
3,5	12	196	28,00	55,91	2,30	1,6644	21,75
3,5	12	196	27,36	61,09	2,50	1,4150	33,30
3,5	12	196	19,64	73,18	1,09	0,6125	12,08
3,5	12	196	21,73	67,91	0,92	0,8335	7,34
3,5	12	196	24,36	54,55	1,33	1,3840	18,00
3,5	12	245	25,64	66,73	1,41	1,0933	14,75
3,5	12	245	21,09	82,91	0,15	0,4268	7,42
3,5	12	245	24,09	69,27	0,71	0,9207	4,76
3,5	12	245	19,00	75,18	1,77	0,5447	7,83
3,5	12	245	22,82	62,73	1,49	1,0344	11,53
3,5	12	245	25,18	50,36	1,87	1,5873	14,33
3,5	12	294	28,00	56,55	3,07	1,6402	20,61
3,5	12	294	27,36	57,55	1,13	1,5437	15,24
3,5	12	294	22,73	74,64	0,55	0,7000	5,23
3,5	12	294	24,27	67,82	0,36	0,9746	4,65
3,5	12	294	25,36	65,64	0,67	1,1106	6,58
3,5	12	294	20,00	71,64	1,36	0,6623	16,21

TABELA 7 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com laterais de aspersores Naan-12, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).

Bocais (mm)	Inclin. (°)	P_s (kPa)	T (°C)	UR (%)	U (m/s)	Δe (kPa)	EA (%)
3,0	12	245	22,82	73,18	0,88	0,7444	25,99
3,0	12	245	21,82	80,36	0,51	0,5129	27,55
3,0	12	245	26,91	61,64	2,11	1,3587	29,22
3,0	12	245	27,82	52,91	3,08	1,7591	32,78
3,0	12	245	20,09	68,36	2,02	0,7430	23,18
3,0	12	245	20,00	67,64	1,53	0,7557	20,19
3,0	12	245	23,09	55,64	1,04	1,2514	19,39
3,0	12	294	23,64	69,00	0,66	0,9040	14,44
3,0	12	294	23,36	74,27	0,55	0,7378	16,29
3,0	12	294	27,82	57,64	2,15	1,5824	30,85
3,0	12	294	27,36	59,64	0,87	1,4677	17,03
3,0	12	294	19,27	71,73	1,78	0,6309	16,68
3,0	12	294	20,55	72,09	1,81	0,6743	9,16
3,0	12	343	24,00	66,18	0,35	1,0078	13,32
3,0	12	343	24,09	70,18	1,69	0,8935	20,79
3,0	12	343	28,00	54,73	2,26	1,7089	17,51
3,0	12	343	25,27	66,27	1,23	1,0844	12,31
3,0	12	343	18,00	77,36	0,84	0,4667	20,70
3,0	12	343	20,27	72,00	1,91	0,6649	14,73
3,0	12	343	21,91	61,18	1,29	1,0194	20,93

TABELA 8 – Perdas de água por evaporação e arraste (EA) em testes de campo com laterais de aspersores NY-25, em função de P_s (pressão de serviço), T (temperatura do ar), UR (umidade relativa do ar), U (velocidade do vento) e Δe (déficit de pressão de vapor).

Bocais (mm)	Inclin. (°)	P_s (kPa)	T (°C)	UR (%)	U (m/s)	Δe (kPa)	EA (%)
2,8x2,5	25	196	25,55	64,64	1,45	1,1558	19,17
2,8x2,5	25	196	23,00	79,45	1,16	0,5766	10,41
2,8x2,5	25	196	28,82	48,27	1,20	2,0480	24,22
2,8x2,5	25	196	28,64	47,36	0,76	2,0624	17,91
2,8x2,5	25	196	16,36	83,09	1,13	0,3142	15,56
2,8x2,5	25	245	25,00	68,45	0,95	0,9981	11,70
2,8x2,5	25	245	22,00	83,18	0,44	0,4441	13,75
2,8x2,5	25	245	22,36	80,27	0,64	0,5325	21,64
2,8x2,5	25	245	26,18	62,09	2,35	1,2863	33,23
2,8x2,5	25	245	28,64	45,00	0,96	2,1549	20,84
2,8x2,5	25	245	25,00	48,73	0,80	1,6220	20,92
2,8x2,5	25	245	17,36	80,82	0,95	0,3797	17,93