



MATHEUS DE FIGUEIREDO BRAGA COLARES

**CARACTERIZAÇÃO DA CHUVA SIMULADA
EM TÚNEL DE VENTO POR DIFERENTES
MÉTODOS**

LAVRAS - MG

2016

MATHEUS DE FIGUEIREDO BRAGA COLARES

**CARACTERIZAÇÃO DA CHUVA SIMULADA EM TÚNEL DE VENTO
POR DIFERENTES MÉTODOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Luiz Antônio Lima
Orientador

**LAVRAS - MG
2016**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Colares, Matheus de Figueiredo Braga.

Caracterização da chuva simulada em tunel de vento por
diferentes metodos / Matheus de Figueiredo Braga Colares. –
Lavras : UFLA, 2016.

70 p. : il.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2016.

Orientador: Luiz Antônio Lima.

Bibliografia.

1. Erosividade. 2. Energia Cinética. 3. Velocidade terminal. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

MATHEUS DE FIGUEIREDO BRAGA COLARES

**CARACTERIZAÇÃO DA CHUVA SIMULADA EM TÚNEL DE VENTO
POR DIFERENTES MÉTODOS**

**CHARACTERIZATION OF SIMULATED RAINFALL IN A WIND
TUNNEL BY DIFFERENT METHODS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 18 de Abril de 2016.

Prof. Dr. Alberto Colombo	UFLA
Prof. Dr. Adriano Valentim Diotto	UFLA
Profa. Dra. Joelma Rezende Durão Pereira	UNILAVRAS
Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi	UNIFOR-MG

Prof. Dr. Luiz Antônio Lima
Orientador

LAVRAS - MG

2016

Aos meus pais e irmãos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A meu grande Deus e minha Nossa Senhora, por manterem a esperança viva.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pelas oportunidades e conhecimentos adquiridos.

À professora Ann Verdoodt e ao Nick Riken da Universidade de Ghent, Bélgica, pela receptividade e todo apoio durante os experimentos. Da mesma forma, à Lis Lemos pela ajuda na organização dos dados.

Ao orientador, professor e amigo Luiz Antônio Lima, pelas oportunidades de pesquisa, aprendizado, experiências de vida, compreensão e paciência no dia a dia.

Aos amigos que vivenciaram comigo esta grande caminhada, obrigado, cada um sabe o quão importante foi e é.

À minha família, meu norte sagrado. Aos meus pais Fernando e Tina e irmãos: Thiago, Fernando, Thomáz e Philippe pelo precioso apoio diário.

À minha querida avó Terezita por todas as lições de vida, um poço de amor e sabedoria. Te amo!

À minha tia Maria Ângela, pelas palavras especiais que me ajudaram a vencer grandes dificuldades.

Ao carinho e sorriso de Jacinta, a cada reencontro!

À Maria Izabela, companheira diária, na dor e na glória!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo em grande parte deste período.

“I ain't rich, but Lord I'm free.”

George Strait

RESUMO

As perdas de solo por erosão hídrica podem ser estimadas por equações empíricas que dependem da energia cinética da chuva. A determinação desta energia é de grande importância, pois caracteriza a erosividade da chuva. Um dos maiores centros de pesquisa em erosão é o International Center of Eremology – I.C.E., localizado em Ghent na Bélgica, cujo objetivo é estudar a formação de desertos; foi utilizado para avaliar as características da chuva simulada, medindo a velocidade e energia cinética através de dois disdrômetros: o UFLA-DRGS e o OTT Parsivel² (equipamento a LASER da OTT) da chuva simulada no interior do túnel. As condições de teste permitiram verificar o efeito de pressão de operação dos bocais simuladores da chuva, da altura de avaliação (proximidade ao spray), da presença ou ausência de vento e a posição dos equipamentos em relação aos bocais. Após a realização de 216 ensaios, foi possível observar que os disdrômetros apresentam similaridade entre si na sua capacidade de avaliar a velocidade das gotas. Além disso, percebeu-se clara influência do vento alterando a trajetória das gotas em mais de 45 graus e aumentando a velocidade das gotas e energia cinética da chuva. Foi possível detectar também que a chuva difere conforme a posição avaliada, ou seja, sob spray ou entre sprays simuladores de chuva.

Palavras-chave: Erosividade. Energia Cinética. Velocidade terminal.

ABSTRACT

Soil loss by water erosion can be estimated by empirical equations that depend on the kinetic energy of the rain. Determining this energy is of great importance, given that it characterizes rain erosivity. One of the largest research centers in erosion is the International Center of Eremology – I.C.E., located in Ghent, Belgium, which objective is to study the formation of deserts. It was used to evaluate the characteristics of simulated rain, measuring the speed and kinetic energy of rain simulated within the tunnel by means of two disdrometers: the UFLA-DRGS and the OTT Parsivel2 (OTT LASER equipment). The testing conditions allowed us to verify the effect of operating pressure of the rain simulator nozzles, the evaluation height (proximity to the spray), the presence or absence of wind, and the position of the equipment in relation to the nozzles. After 216 trials, we verified that the disdrometers were similar to each other regarding the capacity for evaluating drop speed. In addition, there was clear influence of the wind, altering the trajectory of the drops in more than 45 degrees, and increasing drop speed and kinetic energy of the rain. We also verified that the rain differs according to the evaluated position, that is, under spray or between sprays.

Keywords: Erosivity. Kinetic Energy. Terminal Speed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Velocidade terminal de gotas de chuva.....	21
Figura 2 -	Disdrometro OTT Parsivel ²	24
Figura 3 -	Feixe Horizontal de diodo do OTT Parsivel	25
Figura 4 -	Dynamic Rain Gage System (UFLA-DRGS)	26
Figura 5 -	Planta baixa do túnel de vento I.C.E.	27
Figura 6 -	Registro tipo gaveta, válvula reguladora de pressão e hidrômetro para o controle do fluxo de água.....	28
Figura 7 -	Anemômetros, em destaque, instalados na área de trabalho do túnel de vento.	29
Figura 8 -	OTT Parsivel ² posicionado perpendicular ao fluxo de vento, LASER-PP.	30
Figura 9 -	OTT Parsivel ² posicionado longitudinalmente ao fluxo de vento, LASER-PL.	31
Figura 10 -	Esquema do posicionamento dos equipamentos ao longo do túnel, sob o quarto spray e entre o quarto e quinto sprays a uma distância de 1,25 m da barra de sprays.	32
Figura 11 -	Esquema do posicionamento dos equipamentos ao longo do túnel, sob o quarto spray e entre o quarto e quinto sprays a uma distância de 0,85 m da barra de sprays.	32
Figura 12 -	Histograma (diâmetro x velocidade das gotas) a partir do software OTT ASDO.	34
Figura 13 -	Exemplo de imagem a partir de teste com LASER-PP em condição sem vento (A) e com vento (B).....	35
Figura 14 -	Trajetória das gotas para diferentes pressões	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios do ângulo de trajetória em relação à vertical.....	38
Tabela 2 - ANOVA da variável velocidade de gotas da chuva simulada.....	39
Tabela 3 - Análise comparativa entre as médias das velocidades das gotas pelos diferentes métodos.....	39
Tabela 4 - Médias de velocidades das gotas de chuva, em função da posição de instalação dos métodos de medição da chuva.	40
Tabela 5 - Médias de velocidades das gotas de chuva em condição de vento ou não.	41
Tabela 6 - Análise de variância da variável energia cinética das gotas de chuva simulada em túnel de vento.	41
Tabela 7 - Análise comparativa entre as médias das energias cinéticas das gotas pelos diferentes métodos	42
Tabela 8 - Energia cinética das gotas de chuva devido à posição de instalação dos equipamentos	43
Tabela 9 - Energia cinética das gotas de chuva em condição presença e ausência de vento.	44
Tabela 10 - Velocidade média das gotas de chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da posição dos métodos.....	45
Tabela 11 - Velocidade média das gotas de chuva simulada à 1,50 bar de pressão de serviço em função da posição dos métodos.....	46
Tabela 12 - Velocidade média das gotas de chuva simulada a 2,00 bar de pressão de serviço em função da posição dos métodos.....	47
Tabela 13 - Velocidade média das gotas de chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.....	48

Tabela 14 - Velocidade média das gotas de chuva simulada à 1,50 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.....	49
Tabela 15 - Velocidade média das gotas de chuva simulada a 2,00 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.....	50
Tabela 16 - Velocidade média das gotas de chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da condição do vento.....	51
Tabela 17 - Velocidade média das gotas de chuva simulada à 1,50 bar de pressão de serviço em função da condição do vento.....	53
Tabela 18 - Velocidade média das gotas de chuva simulada a 2,00 bar de pressão de serviço em função da condição do vento.....	54
Tabela 19 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da posição dos equipamentos.	55
Tabela 20 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,50 bar de pressão de serviço em função da posição dos equipamentos.	56
Tabela 21 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 2,00 bar de pressão de serviço em função da posição dos equipamentos.	57
Tabela 22 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.....	58
Tabela 23 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,50 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.....	59
Tabela 24 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 2,00 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.....	60

Tabela 25 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da condição do vento.....	61
Tabela 26 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,50 bar de pressão de serviço em função da condição do vento.....	63
Tabela 27 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 2,00 bar de pressão de serviço em função da condição do vento.....	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Erosividade da chuva	17
2.2	Energia cinética das chuvas	18
2.2.1	Medição da energia cinética	22
2.2.1.1	Disdrometro a LASER OTT Parsivel ²	23
2.2.1.2	Dynamic Rain Gage System (UFLA-DRGS)	25
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1	Túnel de vento do International Center for Eremology (I.C.E.)	27
3.2	Métodos utilizados.....	29
3.3	Avaliação da velocidade e energia cinética das gotas de chuva....	31
3.3.1	Dynamic Rain Gage System UFLA-DRGS	32
3.3.2	OTT Parsivel ²	33
3.3.3	Determinação do ângulo de trajetória da chuva simulada	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Ângulo de trajetória da chuva simulada	37
4.2	Testes comparativos de média.....	38
4.2.1	Velocidade das gotas da chuva simulada	38
4.2.2	Energia cinética das gotas.....	41
4.3	Análises dos resultados com interação entre os fatores	44
4.3.1	Velocidade das gotas da chuva simulada.....	44
4.3.1.1	Velocidade das gotas variando a posição de instalação dos equipamentos	44
4.3.1.2	Velocidade das gotas variando a altura de instalação dos equipamentos	47
4.3.1.3	Velocidade das gotas variando condição do vento.....	51
4.3.2	Energia Cinética das gotas.....	54
4.3.2.1	Energia cinética das gotas variando a posição dos equipamentos	55
4.3.2.2	Energia cinética das gotas variando a altura de instalação dos equipamentos	58
4.3.2.3	Energia cinética das gotas variando a condição do vento.....	61
5	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A erosão hídrica é uma das principais causas de degradação do solo, especialmente em regiões tropicais, onde ocorrem chuvas intensas e concentradas. A erosão em solos agrícolas reduz a produtividade das culturas, à medida que esgota sua fertilidade pela contínua remoção de matéria orgânica e nutrientes (ANGULO-MARTINEZ; BARROS, 2015).

A criação de modelos capazes de prever os impactos provenientes da erosão é uma das questões mais relevantes para a pesquisa ligada à conservação do solo. A parametrização de tais modelos depende da representação adequada dos fatores que controlam o processo erosivo. Dentre tais processos, destaca-se a influência da precipitação pluvial.

De acordo com Soil Science Society of America (SSSA, 2008), a erosão é um processo que ocorre em três etapas: o desprendimento de partículas do solo ou seu material de origem (I); o transporte dos sedimentos removidos (II) e a deposição deste material em outro ponto da superfície terrestre (III). O principal agente responsável pelo desprendimento de partículas do solo é o impacto das gotas de chuva (MORGAN, 2005).

A capacidade de desprendimento de partículas do solo por meio do impacto de gotas de chuva é extremamente dependente da energia cinética com que tais gotas atingem a superfície (ANGULO-MARTINEZ; BARROS, 2015). Dessa forma, a energia cinética da chuva é frequentemente utilizada como um indicador para a determinação da erosividade da chuva, que, por sua vez, consiste em um parâmetro utilizado por diversos modelos de predição de perdas de solo (VAN DJIK; BRUIJNZEEL; ROSWELL, 2002).

A energia cinética da precipitação pluvial é resultante da energia cinética com que gotas individuais atingem o solo (SALLES; POESEN; SEMPERE-TORRES, 2002). Dessa forma, uma medição acurada do tamanho (pelo qual é possível estimar-se a massa) e da velocidade de gotas de chuva é essencial para a

determinação de sua energia cinética e, conseqüentemente, da erosividade da chuva (ANGULO-MARTINEZ; BARROS, 2015).

A medição da distribuição do tamanho de gotas de chuva tem sido realizada de diversas formas entre elas: método da farinha de trigo, papel filtro, aparelhos ópticos ou radares meteorológicos (SALLES; POESEN; TORRES, 2002). Mais recentemente, disdrômetros que utilizam sensores a LASER para monitoramento da precipitação possibilitaram avanços nas pesquisas ligadas ao estudo da energia cinética da chuva, porém as incertezas ligadas à capacidade de medição destes sensores, bem como a influência de fatores meteorológicos nas leituras, permanecem com questões a serem respondidas (ANGULO-MARTINEZ; BARROS, 2015).

Um dos mais importantes laboratórios de pesquisa de erosão do mundo está no International Center of Eremology – I.C.E. da UNESCO, localizado em Ghent na Bélgica. Considerando a necessidade de quantificar a energia cinética da chuva em vez de estimá-la por equações empíricas, esta pesquisa teve por objetivo: i) comparar a velocidade e energia cinética das gotas obtidos utilizando os equipamentos Parsivel² OTT e Dynamic Rain Gage System UFLA-DGRS pelo uso de diferentes índices estatísticos; ii) avaliar a chuva simulada no túnel de vento do I.C.E.; iii) determinar a trajetória das gotas de chuva em função da presença ou ausência de vento e diferentes pressões na barra de bocais simuladores de chuva do túnel de vento I.C.E.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Erosividade da chuva

A erosão hídrica pode ser estimada a partir da Equação Universal da Perda de Solo (USLE) que foi desenvolvida com o objetivo de estimar as perdas em áreas sob condições específicas de cultivos e práticas de manejo, em longo prazo. Esta equação abrange todos os fatores que influenciam a erosão pelo impacto das gotas de chuva e pela enxurrada. As perdas de solo médias anuais por área unitária são dadas pelo seguinte produto (WISCHMEIER; SMITH, 1978):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Em que:

A = perda de solo média anual ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);

R = erosividade da chuva e da enxurrada ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$);

K = erodibilidade do solo ($t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$);

L = fator de comprimento de rampa (adimensional);

S = fator de gradiente da vertente (adimensional);

C = fator de uso e manejo do solo (adimensional); e

P = fator de práticas conservacionistas (adimensional).

Existem diversos modelos para calcular o fator R, entretanto são empíricos e localizados como o modelo proposto por Wagner e Massambani (1988). A erosividade da chuva e da enxurrada (R), quando mantidos constantes os demais fatores, representa 90% das perdas de solo.

A criação de modelos capazes de prever os impactos provenientes da erosão é uma das questões mais relevantes para pesquisas ligadas à conservação do solo. A parametrização de tais modelos depende da representação adequada

dos fatores que controlam o processo erosivo. Dentre tais processos, destaca-se a influência da precipitação pluvial.

Para Lal (1988), a energia cinética da chuva é um dos principais fatores iniciantes da desagregação do solo. Muitos são os estudos relacionados aos prejuízos que a energia da gota de chuva é capaz de causar ao solo. Segundo Cassol et al. (2008), a obtenção de dados de chuva com base em registros pluviográficos é um processo relativamente caro e a determinação da erosividade das chuvas a partir de pluviogramas diários é um procedimento moroso. De outra parte, a obtenção de dados de chuva com base em pluviometria é mais fácil e existe maior disponibilidade desses dados. Por essas razões, têm sido testadas relações da energia cinética com a intensidade das chuvas. Os modelos existentes são empíricos e localizados, ou seja, são projetados para uma determinada região.

2.2 Energia cinética das chuvas

Conhecendo-se a energia cinética transferida aos solos pelos impactos das gotas de chuva, pode-se avaliar o potencial erosivo da chuva. Estudos relacionando a perda de solos pelo impacto, as características do tamanho das gotas e sua distribuição, e a velocidade terminal dessas gotas, têm demonstrado que a energia cinética é o parâmetro apropriado para indicar a proporção do potencial erosivo das chuvas (ANTÔNIO, 2009).

A energia cinética é a representação da energia total para desagregar e transportar as partículas ao se chocarem ao solo. Existem diferentes métodos para estimar a energia cinética da chuva. A equação para determinação da energia cinética da chuva mais aceita é a de Wischmeier e Smith (1958), para chuvas do tipo convectivas e frontais, específica para os Estados Unidos, entretanto largamente utilizada em todo o mundo. A equação foi convertida para o Sistema Internacional de Unidades, de acordo com Foster (1981) et al:

$$ECws=0,119+0,0873.\log I \quad (1)$$

Em que:

ECws – energia cinética ($MJ ha^{-1} mm^{-1}$)

I – intensidade da chuva ($mm h^{-1}$)

Wagner e Massambani (1988), através da equação desenvolvida a partir de três chuvas convectivas na região central do estado de São Paulo, sugerem para cálculo da energia cinética:

$$ECwm=0,153+0,0645 \log I \quad (2)$$

Em que:

ECwm – energia cinética ($MJ ha^{-1} mm^{-1}$)

I – intensidade da chuva ($mm h^{-1}$)

De acordo com Eigel e Moore (1983), o método mais comum de determinação da energia associada às chuvas naturais ou artificiais consiste em utilizar as propriedades físicas das gotas de chuva. Para isso, torna-se necessário conhecer a velocidade, o tamanho e a distribuição das gotas de chuva.

As gotas de uma chuva natural em queda próxima ao eixo vertical sofrem com ação das forças gravitacionais, e do arraste. No momento em que ocorre o equilíbrio entre essas forças, as gotas passam a cair a uma velocidade terminal. A velocidade terminal é proporcional ao diâmetro das gotas (DE PLOEY; GABRIELS, 1980; GUNN; KINZER, 1949; SEGNER, 1965).

A aceleração de uma gota nada mais é que a variação da velocidade no tempo. Mas é preciso deduzir a aceleração negativa de arraste = $C_n V^n$, ou como alguns preferem $C_2 V^2$, a exemplo de Seginer (1965).

$$\frac{dv}{dt} = g - C_2 V^2 \quad (3)$$

A equação 3 pode ser resolvida analiticamente e escrita na forma

$$v = \frac{\sqrt{g}}{\sqrt{C_2}} \tanh\left[t\sqrt{gC_2}\right] \quad (4)$$

Esta equação calcula a velocidade de uma gota que cai do repouso (queda livre com velocidade inicial zero) num determinado tempo “t”. A velocidade terminal ocorre quando o tempo tende a infinito. Neste caso,

$$V_t = \sqrt{\frac{g}{C_2}} \lim \tanh[\infty] \quad (5)$$

Como:

$$\tanh(\infty) = 1$$

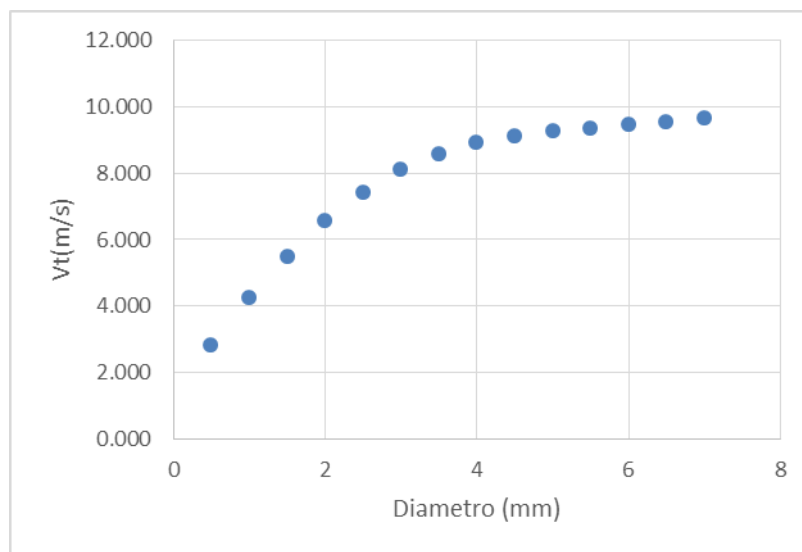
$$V_t = \sqrt{\frac{g}{C_2}} \quad (6)$$

Esta equação calcula a velocidade terminal, ou a velocidade de impacto com o solo de gotas de chuva. Hills (1988), após ajuste de dados publicados na literatura, propôs que:

$$C_2 = \left(\frac{0.804 - 0.264D + 0.066D^2 - 0.004D^3}{1.109D} \right) \quad (7)$$

Aplicando-se as equações acima, pode-se gerar um gráfico para velocidade terminal, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Velocidade terminal de gotas de chuva



Outra variável climática importante na quantificação da energia cinética é o vento. Este adiciona um vetor horizontal às gotas desviando-as do plano vertical, alterando a inclinação, a velocidade e o tamanho das gotas. A resultante da velocidade de impacto, da inclinação, da frequência da incidência das gotas irá determinar a magnitude do desprendimento de partículas por uma chuva com vento (ERPUL; GABRIELS; NORTON, 2003).

Assunção et al. (2006) assumem que há uma correlação positiva entre a inclinação média das chuvas, a velocidade média do vento ($m s^{-1}$) e os impactos cinéticos provocados pelo regime pluviométrico.

Antônio (2009) observou que quando se determina a energia cinética a partir da intensidade da precipitação medida na superfície por pluviômetros, não se garante o valor da energia cinética obtida uma vez que, tanto a intensidade da chuva como a energia cinética são dependentes diretos da distribuição do tamanho das gotas.

2.2.1 Medição da energia cinética

Segundo Kathiravelu, Lucke e Nichols (2016) por mais de um século tem se tentado descrever as gotas de chuva. Hoje existem vários métodos de determinação da distribuição dos tamanhos das gotas e energia cinética. Os métodos manuais, como o método da farinha, imersão ao óleo e métodos fotográficos, apesar de simples, são demorados e com precisão limitada, além de não fornecerem a velocidade das gotas de forma direta (SALLES; POESEN; SEMPERE-TORRES, 2002).

A energia cinética, por unidade de massa, de uma gota de água sobre a superfície do solo depende da sua velocidade de impacto e pode ser determinada por:

$$EC = \frac{mV^2}{2} \quad (8)$$

Onde EC - energia cinética por unidade de massa (J);

m – massa da gota (kg)

V - velocidade da gota ($m s^{-1}$).

Avanços tecnológicos permitiram o desenvolvimento de equipamentos que medissem de forma automatizada as características necessárias para o conhecimento da energia das gotas de chuva. Entre estes métodos destacam-se

disdrômetros de impacto, disdrômetros acústicos, disdrômetros óticos, como imagens óticas e dispersão ótica.

Lima et al. (2014) citam que com a criação de novos equipamentos, a energia cinética também pode ser estimada com uso de didrômetros que operam com feixe de raios LASER. Por exemplo, Niu et al. (2010) determinaram o diâmetro e velocidade de gotas de chuvas convectivas e estratiformes na China; já King e Bjorneberg (2011) avaliaram a energia cinética de chuvas artificiais em conjuntos de irrigação tipo pivô central. Ainda assim, são poucos os trabalhos que comparam metodologias.

2.2.1.1 Disdrometro a LASER OTT Parsivel²

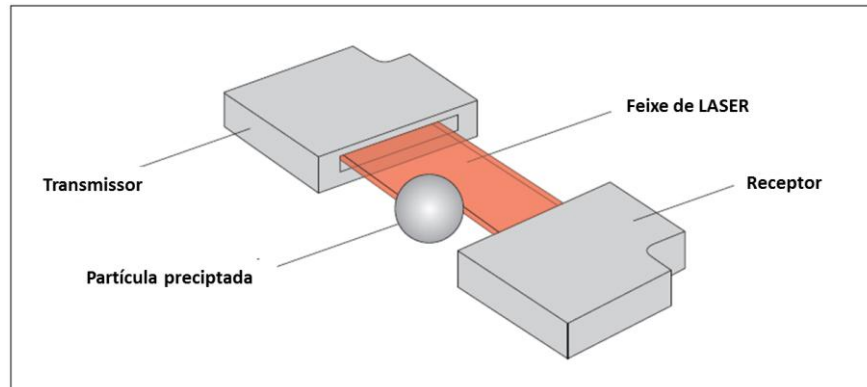
O disdrometro OTT Parsivel² (OTT MESSTECHNIK GMBH & CO. KG, 2008) é um dispositivo óptico a LASER que mede o tamanho e a velocidade de queda das gotas de chuva. Os tamanhos das gotas são distintos em 32 classes, de 0,25 mm a 25 mm de diâmetro. Da mesma forma ocorre para a velocidade, dividida em 32 classes, variando de 0,05 a 20 m s⁻¹.

O disdrometro OTT Parsivel², figura 2, possui um LASER de diodo que produz um feixe de luz horizontal de 3 cm de largura, 18 cm de comprimento e 1 mm de espessura (54 cm²).

Figura 2 - Disdrometro OTT Parsivel²

Quando as partículas atravessam o feixe de luz, há um bloqueio de uma porção deste e a tensão produzida pelo fotodiodo é menor em relação a momentos em que não há partículas atravessando o feixe (FIGURA 3). O tempo em que a voltagem diminui está relacionado com o tamanho das gotas e a velocidade das gotas está relacionada à duração da queda da voltagem. O diâmetro de partícula D (mm) referente à velocidade v ($m s^{-1}$) detectada no período da amostragem é tabulado em uma matriz 32×32 , cujas dimensões são o número de classes de tamanho de gotas pelo número de classes de velocidade de queda das gotas. Há possibilidade de acesso aos dados com o uso do software ASDO OTT.

Figura 3 - Feixe Horizontal de diodo do OTT Parsivel



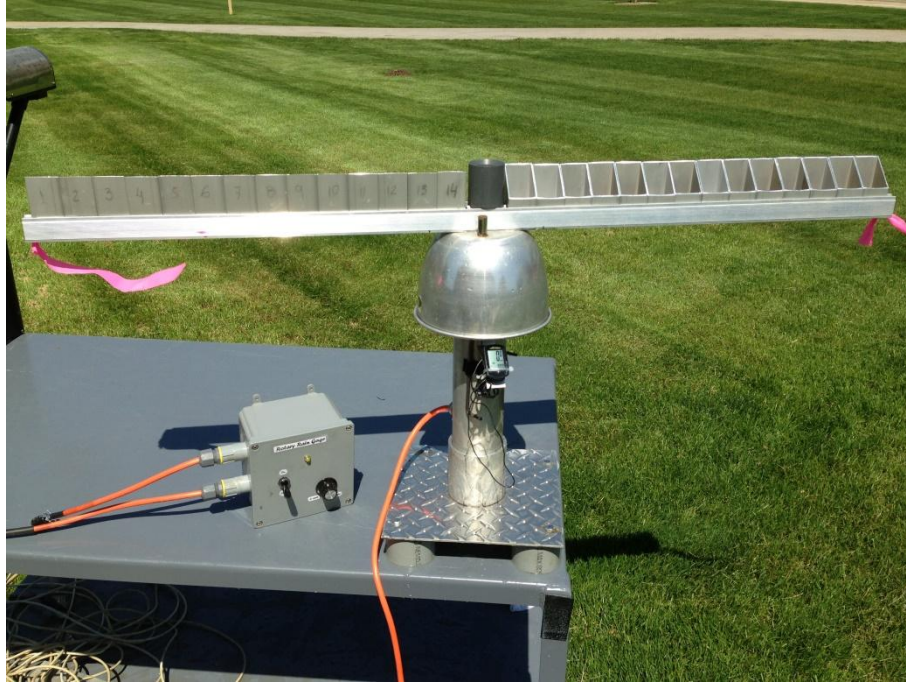
2.2.1.2 Dynamic Rain Gage System (UFLA-DRGS)

O Sistema Dynamic Rain Gage System (UFLA-DRGS) é um medidor alternativo capaz de determinar a energia cinética e a velocidade de impacto das gotas de chuva natural ou artificial. O sistema é composto de pluviômetros móveis de base quadrada (0,032 x 0,032 m), com 0,08 m de altura, alinhados ao longo de uma linha reta sobre uma estrutura de metal. Os pluviômetros giram com diferentes velocidades escalares.

Após expor o UFLA-DRGS a uma chuva, toda água coletada pelo pluviômetro à distância "r" será causada pelas gotas com velocidade vertical maior que a velocidade tangencial do coletor a uma distância "r". O pluviômetro posicionado no centro do aparelho é capaz de coletar as gotas de água com velocidade vertical maior ou igual a zero, pois seu formato circular, mesmo girando ao redor do seu centro geométrico, atua como se fosse um coletor estático.

A unidade apresentada na figura 4 refere-se a um protótipo construído pelo Laboratório Nacional de Pesquisa de Erosão do Solos (NSERL-Purdue University) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos.

Figura 4 - Dynamic Rain Gage System (UFLA-DRGS)



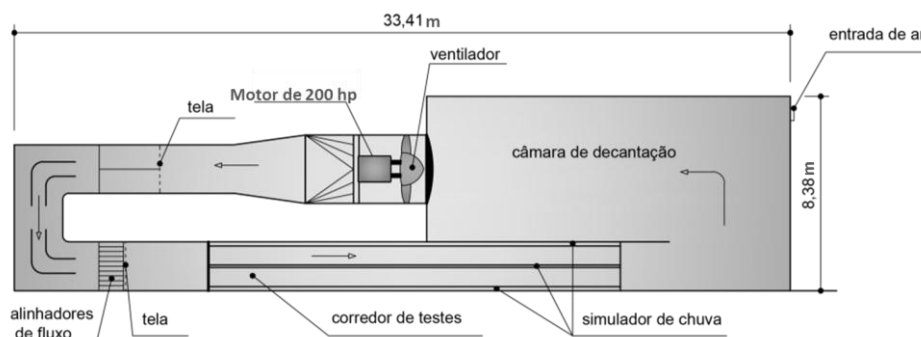
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Túnel de vento do International Center for Eremology (I.C.E.)

O presente trabalho foi conduzido no túnel de vento e simulador de chuva integrado ao “International Center for Eremology” (I.C.E.) da UNESCO na Universidade de Gante, Bélgica.

O túnel de vento do I.C.E. é um circuito fechado de baixa velocidade e do tipo sopra. Um motor elétrico de 200 hp aciona um ventilador de 1,5 m de diâmetro com 16 pás ajustáveis geram o fluxo de ar para dentro do túnel. A velocidade do ar é ajustada pela angulação das pás do ventilador. O vento percorre uma série de seções para que alcance uniformemente sem turbulência na área de trabalho (FIGURA 5). Uma descrição completa pode ser observada em Gabriels et al. (1997).

Figura 5 - Planta baixa do túnel de vento I.C.E.



Fonte: Adaptada de Gabriels et al. (1997).

A área de trabalho (corredor de testes) do túnel mede 1,2 m de largura e 12 m de comprimento. Ao longo da área de trabalho estão instaladas três linhas de tubulação onde são distribuídos os sprays a uma distância de 1,0 m. Sua altura pode variar de 1,80 a 3,20 m. Um sistema de bombeamento pressuriza e fornece vazão necessária de água a partir de um tanque para o simulador.

A vazão necessária e a pressão de serviço foram reguladas a partir de registros, de uma válvula reguladora de pressão e um hidrômetro, instalados após a saída da unidade de bombeamento (FIGURA 6).

Figura 6 - Registro tipo gaveta, válvula reguladora de pressão e hidrômetro para o controle do fluxo de água.



A velocidade do vento foi medida por anemômetros como mostrado na Figura 7, posicionados na altura de interesse, ligados a um datalogger modelo Testo 454-logger, conectado a um computador onde foram armazenadas as informações. Como padrão para este estudo, regulou-se a velocidade média do vento em $6,4 \text{ m s}^{-1}$.

Figura 7 - Anemômetros, em destaque, instalados na área de trabalho do túnel de vento.



No estudo em questão, a tubulação central do simulador foi utilizada com 8 sprays orientados para baixo, a 1,85 m de altura. O modelo de spray usado foi o Teejet TG SS 14, com fluxo axial, amplo ângulo de ação e cone cheio.

3.2 Métodos utilizados

Com o intuito de avaliar a velocidade e energia cinética das gotas de chuva simulada, foram utilizados dois equipamentos, o primeiro, Dynamic Rain Gage System (UFLA-DRGS) e um disdrômetro a LASER, OTT Parsivel², sendo o disdrômetro a LASER experimentado em duas posições, perpendicular (LASER-PP) e longitudinal (LASER-PL) ao fluxo de vento (FIGURAS 8 e 9).

Figura 8 - OTT Parsivel² posicionado perpendicular ao fluxo de vento, LASER-PP.



Figura 9 - OTT Parsivel² posicionado longitudinalmente ao fluxo de vento, LASER-PL.



3.3 Avaliação da velocidade e energia cinética das gotas de chuva

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, com dois equipamentos, porém três métodos de medida: UFLA-DRGS, OTT Parsivel² Longitudinal (LASER-PL), OTT Parsivel² Perpendicular (LASER-PP). Duas velocidades de vento (0 e 6,4 m s⁻¹), duas alturas de instalação em relação a barras de sprays (0,85 e 1,25 m), duas posições, sob o quarto spray (S.S.) e entre quarto e quinto sprays (E.S.) (FIGURAS 10 e 11), três pressões de serviço (1,00; 1,50 e 2,00 bar) e três repetições, totalizando 216 ensaios.

Figura 10 - Esquema do posicionamento dos equipamentos ao longo do túnel, sob o quarto spray e entre o quarto e quinto sprays a uma distância de 1,25 m da barra de sprays.

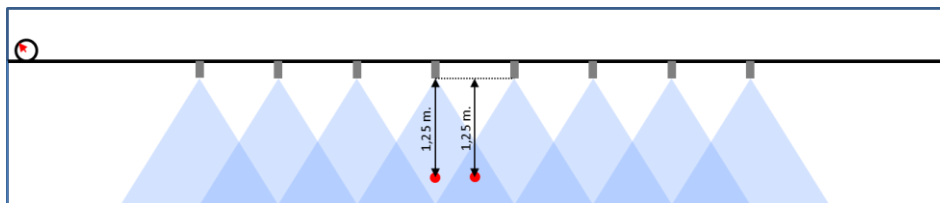
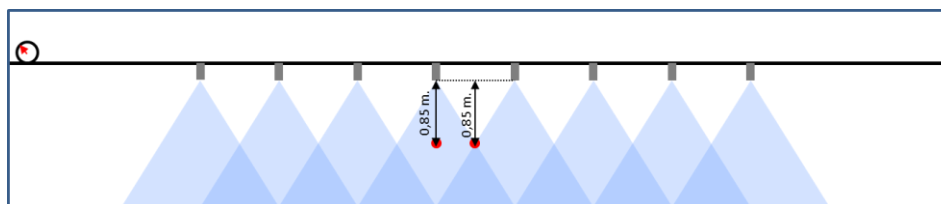


Figura 11 - Esquema do posicionamento dos equipamentos ao longo do túnel, sob o quarto spray e entre o quarto e quinto sprays a uma distância de 0,85 m da barra de sprays.



As comparações de médias dos valores da velocidade de impacto da gota da energia cinética analisados foram realizadas pelo teste Tukey (1953), a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas por meio do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009).

3.3.1 Dynamic Rain Gage System UFLA-DRGS

A determinação da energia cinética e velocidade de impacto das gotas através do Dynamic Rain Gage System, UFLA-DRGS, se deu a partir da metodologia proposta por Lima et al. (2010). O equipamento é composto de 14 pluviômetros móveis de base quadrada (0,032 x 0,032 metros), com 0,08 metros de altura, em cada lado, alinhados ao longo de uma linha reta sobre uma estrutura de metal. Os pluviômetros giram com diferentes velocidades escalares. Assim, um determinado pluviômetro pode ser alcançado pela gota de chuva,

somente se a velocidade horizontal do pluviômetro for menor que a velocidade vertical da gota.

A velocidade escalar do pluviômetro à distância “r” do centro do aparelho pode ser calculada a partir da Equação 9 apresentada a seguir:

$$V_{hr} = \frac{2\pi r R}{60} \quad (9)$$

Em que:

V_{hr} – Velocidade (m s⁻¹)

R –RPM = rotações por minuto

r – distância (m) do centro do pluviômetro ao centro do pluviômetro central.

O equipamento adquire movimento rotacional a partir do acionamento de um motor elétrico. Nos ensaios realizados foi ajustada uma rotação de aproximadamente 120 rpm, determinada com um tacômetro.

Obtidas as massas dos pluviômetros antes e após os ensaios por uma balança com precisão de 0,01 grama. O valor da tara foi subtraído da massa final para obter a massa do líquido.

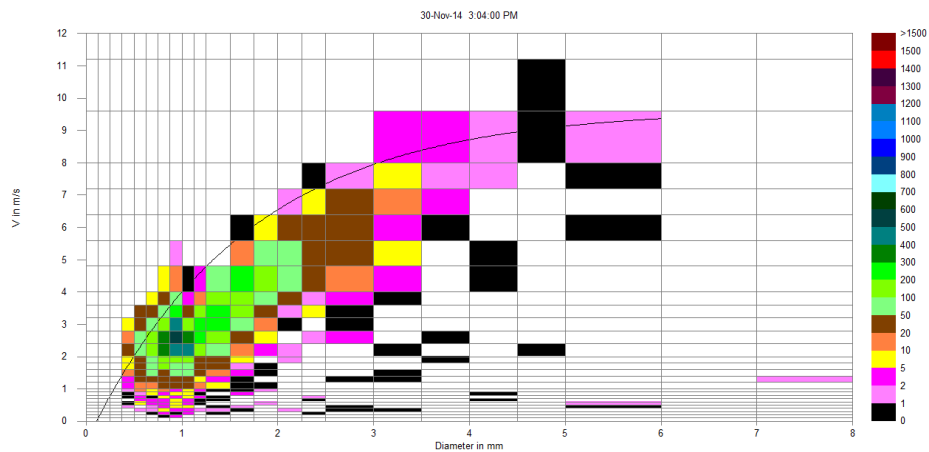
Os dados coletados geraram um histograma de frequência acumulada, a partir do qual foi possível obter a frequência relativa de ocorrência de gotas com diferentes velocidades verticais. Dada a inclinação de 45 graus da superfície de entrada do pluviômetro, a velocidade da gota capaz de entrar no pluviômetro será a velocidade escalar do mesmo multiplicada 1,414.

3.3.2 OTT Parsivel²

A determinação da energia cinética e velocidade de impacto das gotas com o uso do disdrômetro é realizado de forma direta e obtidas a partir do

software OTT ASDO, que gera um histograma velocidade x diâmetro de gota (FIGURA 12).

Figura 12 - Histograma (diâmetro x velocidade das gotas) a partir do software OTT ASDO.



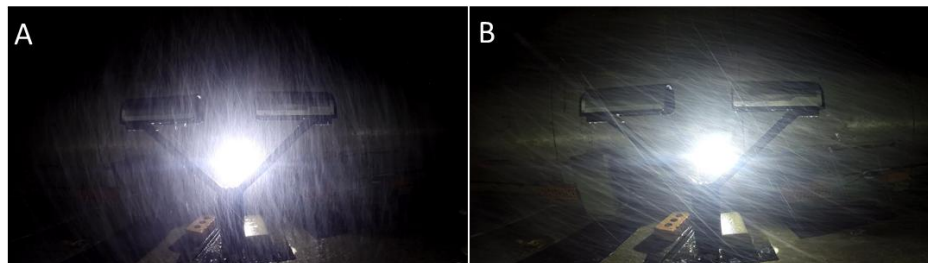
A apresentação dos dados pelo software era apenas via gráfica, porém, ao se posicionar o cursor em cada um dos retângulos apresentados no Gráfico 2, era mostrado o número de gotas com dada velocidade e diâmetro. Como cada retângulo é a representação de um intervalo entre duas velocidades e dois diâmetros, considerou-se para os cálculos os valores médios. Esta metodologia foi repetida em cada retângulo e em todos os histogramas gerados. Após isto, os dados obtidos foram levados a um software de planilha eletrônica para tratamento e obtenção do diâmetro e velocidade média das gotas.

3.3.3 Determinação do ângulo de trajetória da chuva simulada

Para determinação do ângulo de trajetória da chuva simulada, os testes foram filmados com uma câmera com detecção de 48 quadros por segundo instalada no interior do túnel durante os testes. Os vídeos foram transformados

em imagens, seis imagens para cada teste (FIGURA 13) e a partir do software Autodesk AutoCAD, aleatoriamente 12 trajetórias de gotas foram tracejadas dentro da área de detecção do OTT Parsivel².

Figura 13 - Exemplo de imagem a partir de teste com LASER-PP em condição sem vento (A) e com vento (B).



As filmagens ocorreram nos testes com o LASER-PP a uma distância de 1,25 m da barra com sprays e entre o quarto e quinto spray, nas situações com e sem vento e três pressões (1,00, 1,50 e 2,00 bar).


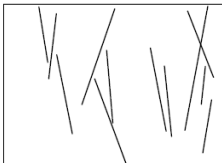
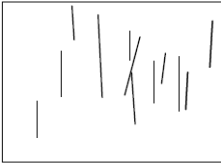
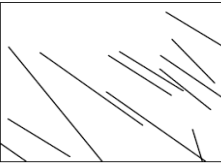
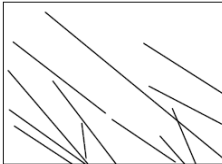

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 3 x 2 e os valores médios do ângulo de trajetória foram comparados através de análise de variância e teste Tukey (1953) ao nível de significância de 0,1%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ângulo de trajetória da chuva simulada

As chuvas simuladas entre o quarto e quinto spray foram fotografadas e o ângulo de trajetória em relação à vertical avaliado. A trajetória das gotas é apresentada na Figura 14 para diferentes pressões e condições de vento. Em cada tratamento foram avaliadas 12 trajetórias.

Figura 14 - Trajetória das gotas para diferentes pressões

Condição	1,00 bar	1,50bar	2,00bar
Sem Vento			
Com Vento			

Os valores médios do ângulo de trajetória em relação à vertical, comparados através de análise de variância e teste Tukey ao nível de significância de 0,1%, são apresentados na Tabela 1. As letras acompanhando os valores referem-se à diferença significativa entre linhas (maiúsculas) e linhas (minúsculas).

Tabela 1 - Valores médios do ângulo de trajetória em relação à vertical.

Condição	1,00 bar	1,50 bar	2,00 bar
Sem Vento	-1,30 aA	2,09 aA	-1,40 aA
Com Vento	47,30 aA	44,40 bA	46,80 bA

Para cada condição de pressão de serviço, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade estatística.

Os resultados obtidos se aproximam do observado por Gabriels et al. (1997), onde se percebe inclinação de 53° em relação ao plano vertical para chuvas simuladas no túnel de vento I.C.E., com gotas de 1,63 mm de diâmetro médio, velocidade de $4,64 \text{ m s}^{-1}$ e energia cinética de $2,47 \times 10^{-5} \text{ J}$ para ventos de 6 m s^{-1} . Essa inclinação aumenta à medida que a velocidade horizontal do vento aumenta, o diâmetro médio das gotas diminui e a velocidade aumenta, assim como a energia cinética.

Assunção et al. (2006) observaram uma correlação positiva entre inclinação média das chuvas e a velocidade média do vento, para eventos entre 2004 e 2005 no município de Jataí, GO e a uma variação entre 8 a 26° na inclinação média das chuvas.

4.2 Testes comparativos de média

Após a realização dos ensaios no túnel de vento I.C.E., os resultados foram analisados e avaliados estatisticamente.

4.2.1 Velocidade das gotas da chuva simulada

São apresentados na Tabela 2 a ANOVA relativa à variável velocidade de gotas. O método utilizado e a posição de instalação dos equipamentos no túnel foram fatores que influenciaram significativamente a velocidade das gotas para a situação do experimento a um nível de significância de 1% e a condição do vento à 5%.

Tabela 2 - ANOVA da variável velocidade de gotas da chuva simulada

FV	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Métodos	2	26.21	13.106**	11.783	4.40 e ⁻⁰⁵ *
Altura	1	0.25	0.251 ^{NS}	0.226	0.636 ^{NS}
Vento	1	6.22	6.225*	5.596	0.021 *
Posic	1	21.84	21.835**	19.63	3.76 e ⁻⁰⁵ *
PS	2	1.01	0.504 ^{NS}	0.453	0.637 ^{NS}
Resíduo	64	71.19	1.112		

* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade estatística. ** Significativo ao nível de 1% de probabilidade estatística. ^{NS} Não significativo.

A análise comparativa entre as velocidades médias levando em consideração os métodos utilizados é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise comparativa entre as médias das velocidades das gotas pelos diferentes métodos

Método	Velocidade das gotas (m s ⁻¹)
UFLA-DRGS	3,05 a
LASER-PP	2,80 b
LASER-PL	2,56 b

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Estatisticamente, os valores de velocidade de gota medidos com o equipamento OTT Parsivel², tanto na posição longitudinal quanto perpendicular à chuva, são iguais, enquanto que a velocidade média medida com o DGRS-UFLA é maior (3,05 m s⁻¹)

A chuva representa uma distribuição de diferentes tamanhos de gota com diferentes velocidades terminais (VAN DJIK; BRUIJNZEEL; ROSWELL, 2002). De uma forma geral, as velocidades médias das gotas calculadas através dos equipamentos e situação de teste estariam de acordo com a velocidade

terminal de uma chuva natural ou seja, seria de 2,4 a 11,1 m s^{-1} para gotas com diâmetro de 0,5 a 5,0 mm respectivamente (BEARD; PRUPPACHER, 1969; FOX, 2004; GUNN; KINZER, 1949; KELLER; BLIESNER, 1990; LAWS; PARSONS, 1943).

Houve diferença significativa entre as velocidades médias das gotas de chuva a partir da posição de instalação do método utilizado. Sendo que sob o quarto spray, a velocidade foi maior (2,99 m s^{-1}), conforme apresentado pela Tabela 4.

Tabela 4 - Médias de velocidades das gotas de chuva, em função da posição de instalação dos métodos de medição da chuva.

Posição de instalação	Velocidade das gotas (m s^{-1})
Sob quarto spray	2,99 a
Entre quarto e quinto spray	2,62 b

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Segundo Erpul, Gabriëls e Janssens (1998), a uniformidade de distribuição da chuva no túnel de vento I.C.E. é acima de 80% e para Cornelis, Erpul e Gabriëls (2004), é acima de 75%. Porém estas uniformidades foram calculadas com sprays a uma altura maior em relação à superfície de referência deste trabalho. Mesmo sendo estatisticamente diferente, a relação entre as velocidades pelos métodos em diferentes posições foi de aproximadamente 13%, estando dentro dos valores medidos por estes autores. Possivelmente, as menores alturas da barra de aplicação em relação aos medidores podem ter influenciado o raio de aplicação dos sprays.

A presença do vento influenciou significativamente a velocidade das gotas (TABELA 5), as maiores velocidades de gotas foram observadas em condição de vento. Tal influência é comentada por Gabriëls et al. (1997), que observaram aumento exponencial na velocidade das gotas com o aumento do

vento, no túnel de vento I.C.E. Já Assunção et al. (2006) observaram uma correlação positiva entre a velocidade do vento e a velocidade das gotas.

Tabela 5 - Médias de velocidades das gotas de chuva em condição de vento ou não.

Condição	Velocidade das gotas (m s ⁻¹)
Com vento	2,90 a
Sem vento	2,71 b

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade estatística.

4.2.2 Energia cinética das gotas

Assim como a velocidade das gotas, a energia cinética também foi estatisticamente influenciada pelos métodos testados, pela posição de instalação e condição do vento, como pode ser visto na ANOVA apresentada na Tabela 5.

Tabela 6 - Análise de variância da variável energia cinética das gotas de chuva simulada em túnel de vento.

FV	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Métodos	2	203,9	101,93**	10,624	0,000104*
Altura	1	0,5	0,47 ^{NS}	0,049	0,825753
Vento	1	64,4	64,35*	6,707	0,011874*
Posição	1	194,4	194,41**	20,262	2,92e ^{-05*}
P.S.	2	10,5	5,27 ^{NS}	0,549	0,58033
Resíduo	64	614	9,59		

* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade estatística. ** Significativo ao nível de 1% de probabilidade estatística. ^{NS} Não significativo.

A análise comparativa entre as energias cinéticas das gotas de chuva simuladas levando em consideração os métodos utilizados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Análise comparativa entre as médias das energias cinéticas das gotas pelos diferentes métodos

Método	Energia Cinética das gotas ($J\ kg^{-1}$)
UFLA-DRGS	4,71 a
LASER-PP	4,07 a
LASER-PL	3,33 b

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade estatística.

A fabricante do disdrômetro OTT Parsivel² recomenda a sua instalação no sentido perpendicular ao maior fluxo de vento, podendo os testes com o LASER-PL terem sido prejudicados pelo acúmulo de gotas na janela do eixo transmissor e repetidor, carregadas pelo vento, e mascarado o tamanho e as velocidades reais das gotas.

Notaram-se em alguns testes valores muito baixos na amplitude do sinal da faixa de LASER, que segundo a fabricante do disdrômetro varia de 0 a 15000. Testes com amplitude abaixo de 5000 foram descartados, pois a detecção do número de partículas era prejudicada. De maneira geral, relatos de problemas na determinação das características das chuvas com este equipamento já foram feitos na literatura. Como exemplo, Friedrich et al. (2013) notaram que em maiores velocidades de vento, o equipamento registrava gotas com diâmetro e velocidades irreais e Wong (2012) instalou o equipamento como recomenda o fabricante mas notou em certos períodos que o equipamento superestimava os resultados devido ao acúmulo de material sobre as lentes e conseqüentemente a diminuição do sinal da faixa do LASER, que voltava ao normal com o passar do tempo e limpeza da janela do receptor.

Em certos testes, o equipamento deixou de executar as medições, não detectando as partículas e não acusando a precipitação. O equipamento foi inspecionado e constatou-se a condensação do vapor de água sobre a face externa das lentes e em certos momentos sob a face interna, dentro das partes

blindadas do aparelho, sendo feitas as devidas limpezas, fato também relatado por Krajewski et al. (2006). Assim após longos períodos de testes em um ambiente fechado e com alta umidade este problema se repetia.

À 5% de significância estatística pelo teste de Tukey, gotas analisadas sob o quarto spray possuem energia cinética maior que as gotas observadas entre o quarto e quinto spray (TABELA 8). Pelo teste de média nota-se uma variabilidade espacial dentro do túnel ao se comparar a energia cinética em dois pontos.

Tabela 8 - Energia cinética das gotas de chuva devido à posição de instalação dos equipamentos

Posição de instalação do equipamento	Energia Cinética das gotas ($J\ kg^{-1}$)
Sob quarto spray	4,58 a
Entre quarto e quinto spray	3,49 b

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Nota-se pela análise da Tabela 9, que a energia cinética das gotas é maior na situação de vento. Erpul, Gabriels e Norton (2003) sugerem que o vento adiciona uma força horizontal à chuva desviando da verticalidade o ângulo de queda das gotas, aumentando a sua velocidade. Adicionalmente, a combinação da velocidade terminal, do ângulo de impacto e da frequência do impacto das gotas aos solos determina o nível de desprendimento de partículas do solo e a erosividade da chuva.

Tabela 9 - Energia cinética das gotas de chuva em condição presença e ausência de vento.

Condição	Energia Cinética das gotas ($J\ kg^{-1}$)
Com vento	4,35 a
Sem vento	3,72 b

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade estatística.

4.3 Análises dos resultados com interação entre os fatores

A interação entre os fatores posição de instalação dos equipamentos ao longo do túnel, altura de instalação, condição do vento, pressão de serviço e influência nas médias de velocidade das gotas e energia cinética da chuva simulada foram avaliadas estatisticamente.

4.3.1 Velocidade das gotas da chuva simulada

A influência da interação entre os diversos fatores testados nas médias de velocidade das gotas de chuva simulada foram avaliadas estatisticamente.

4.3.1.1 Velocidade das gotas variando a posição de instalação dos equipamentos

A medição da velocidade das gotas de chuva em função do posicionamento do equipamento em distintos pontos do simulador possibilita a ideia da uniformidade com que a chuva simulada é distribuída ao longo do túnel. Ao considerar como ambiente controlado e com gotas uniformemente distribuídas, não havendo uma variabilidade espacial, a velocidade e energia cinética das gotas da chuva simulada deveriam ser estatisticamente semelhantes independentes do ponto de instalação dos equipamentos. Erpul, Gabriëls e Janssens (1998) concluíram que o coeficiente de uniformidade mínimo para a área útil deste simulador em estudo é 80%, em situações distintas, utilizando pressão de serviço 0,75, 1,00 e 1,50 bar, com a barra de sprays a 2 metros de

altura em relação ao chão do simulador. Durante esta avaliação, os testes ocorreram com 1 spray, 5 sprays ou 7 sprays em uso. Já Cornelis, Erpul e Gabriels (2004) obtiveram 75% de coeficiente de uniformidade mínimo de distribuição de água no túnel de vento I.C.E. atingindo 93% com o aumento da pressão de serviço. Também foi observada pelos autores a influência do vento na distribuição da chuva simulada ao longo da área útil do túnel.

Com a barra de sprays em duas alturas: 0,85m e depois a 1,25m acima dos equipamentos e com os mesmos posicionados sob o quarto spray e entre o quarto e quinto spray, a 1,00 bar de pressão mediu-se a velocidade das gotas (TABELA 10).

Tabela 10 - Velocidade média das gotas de chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da posição dos métodos.

Condição	Método	Velocidade das gotas de chuva (m s ⁻¹)							
		¹ 1,25 m				² 0,85 m			
		³ S.S.		⁴ E.S.		S.S.		E.S.	
Sem Vento	UFLA-DRGS	2,95	aA	2,54	aB	2,75	aA	2,63	aA
	LASER-PP	2,93	aA	2,39	aB	3,25	bA	2,45	bB
	LASER-PL	3,20	aA	2,47	aB	2,40	cA	2,43	bA
Com Vento	UFLA-DRGS	3,38	abA	3,09	aB	3,27	aA	3,14	aA
	LASER-PP	3,61	aA	2,56	bB	3,29	aA	2,27	bB
	LASER-PL	2,73	bA	2,68	cA	1,94	bA	2,29	bB

¹Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays. ²Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays. ³Equipamento posicionado sob quarto spray.

⁴Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray.

Para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

A velocidade das gotas de chuva simulada com a barra de sprays em duas alturas: 0,85 m e depois a 1,25 m acima dos equipamentos a uma pressão 1,50 bar é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Velocidade média das gotas de chuva simulada à 1,50 bar de pressão de serviço em função da posição dos métodos.

Condição	Método	Velocidade das gotas de chuva (m s^{-1})							
		¹ 1,25 m				² 0,85 m			
		³ S.S.		⁴ E.S.		S.S.		E.S.	
Sem Vento	UFLA-DRGS	3,12	aA	2,50	aB	2,80	aA	2,80	aA
	LASER-PP	2,63	bA	2,34	bB	3,07	aA	2,48	bB
	LASER-PL	3,05	aA	2,37	bB	2,57	aA	2,49	bA
Com Vento	UFLA-DRGS	3,50	aA	3,31	aB	3,32	aA	3,21	aA
	LASER-PP	2,81	bA	2,58	cB	3,53	aA	2,36	bB
	LASER-PL	2,83	bA	2,75	bB	1,90	bB	2,31	bA

¹Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays. ²Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays. ³Equipamento posicionado sob quarto spray.

⁴Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray.

Para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Observa-se para as pressões de serviço de 1,00 e 1,50 bar uma mesma tendência na velocidade das gotas, porém com velocidades de gota distintas. Em condição sem vento, a posição em que os aparelhos foram instalados no túnel influenciou significativamente na velocidade média da chuva com a barra de sprays a 1,25 m acima dos equipamentos, para todos os métodos, sendo as maiores velocidades sob o quarto spray.

Comparando os métodos, para a altura de instalação com a barra de sprays 1,25 metros acima dos equipamentos, a 1,00 bar de pressão os resultados

observados para a velocidade média das gotas foram estatisticamente iguais entre os três equipamentos, nas duas posições testadas. O mesmo fato se repetiu para a altura de instalação de 0,85 metros e posicionados sob o quarto spray, com 1,50 bar de pressão de serviço.

Utilizando como pressão de serviço 2,00 bar, Tabela 12, diferentemente do que ocorreu nas diferentes pressões, há diferença significativa entre as posições para os testes sem vento para as duas alturas na maioria dos testes.

Tabela 12 - Velocidade média das gotas de chuva simulada a 2,00 bar de pressão de serviço em função da posição dos métodos.

Condição	Método	Velocidade das gotas de chuva (m s ⁻¹)							
		¹ 1,25 m				² 0,85 m			
		³ S.S.		⁴ E.S.		S.S.		E.S.	
Sem Vento	UFLA-DRGS	3,07	aA	2,62	aB	2,77	cA	2,76	aA
	LASER-PP	2,32	bB	2,81	aA	3,68	aA	2,32	bB
	LASER-PL	2,93	aA	2,24	bB	2,99	bA	2,32	bB
Com Vento	UFLA-DRGS	2,55	bB	3,31	aA	3,45	bA	3,38	aA
	LASER-PP	2,44	cA	2,44	cA	4,13	aA	2,59	bB
	LASER-PL	2,91	aA	2,71	bB	2,50	cA	2,43	bA

¹Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays. ²Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays. ³Equipamento posicionado sob quarto spray.

⁴Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray.

Para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

4.3.1.2 Velocidade das gotas variando a altura de instalação dos equipamentos

A diferença estatística entre as velocidades das gotas observadas em duas alturas de instalação dos equipamentos em relação aos sprays é evidenciada

pela letra maiúscula na mesma linha, as gotas podem estar ganhando ou perdendo velocidade à medida que caem ou estarem estáveis, neste caso sendo possível compará-las com as características de uma chuva natural.

Com a pressão de serviço ajustada para 1,00 bar de pressão (TABELA 13) e sem influência do vento, percebe-se que não houve diferença significativa entre as alturas de instalação dos equipamentos na maioria dos ensaios.

Tabela 13 - Velocidade média das gotas de chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.

Condição	Método	Velocidade das gotas de chuva (m s ⁻¹)							
		¹ S.S.				² E.S.			
		³ 1,25 m		⁴ 0,85 m		1,25 m		0,85 m	
Sem Vento	UFLA-DRGS	2,95	aA	2,75	bA	2,54	aA	2,63	aA
	LASER-PP	2,93	aA	3,25	aA	2,39	aA	2,45	bA
	LASER-PL	3,20	aA	2,40	cB	2,47	aA	2,43	bA
Com Vento	UFLA-DRGS	3,38	abA	3,27	aB	3,09	aA	3,14	aA
	LASER-PP	3,61	aA	3,29	aA	2,56	cA	2,27	bB
	LASER-PL	2,73	bA	1,94	bB	2,68	bA	2,29	bB

¹Equipamento posicionado sob quarto spray. ²Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray. ³Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays. ⁴Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays.

Para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Uma situação diferente acontece quando a chuva sofre influência do vento, que soma mais um fator de força sobre as gotas e aumentando a velocidade das gotas. Fato comprovado por uma diferença estatística na velocidade das chuvas entre as alturas de instalação do equipamento. Em sua

maioria, a velocidade média das gotas foi maior quando os equipamentos estavam instalados a uma maior distância da barra de sprays, levando a crer que as gotas estão ganhando velocidade com a queda, diferentemente das gotas de chuva natural que chega ao solo a uma velocidade estável, velocidade terminal.

Para o sistema calibrado na pressão de serviço de 1,50 bar, as velocidades das gotas são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Velocidade média das gotas de chuva simulada à 1,50 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.

Condição	Método	Velocidade das gotas de chuva (m s ⁻¹)							
		¹ S.S.				² E.S.			
		³ 1,25 m		⁴ 0,85 m		1,25 m		0,85 m	
Sem Vento	UFLA-DRGS	3,12	aA	2,80	aB	2,50	aB	2,80	aA
	LASER-PP	2,63	bA	3,07	aA	2,34	bA	2,48	bA
	LASER-PL	3,05	aA	2,57	aB	2,37	bB	2,49	bA
Com Vento	UFLA-DRGS	3,50	aA	3,32	aB	3,31	aA	3,21	aA
	LASER-PP	2,81	bB	3,53	aA	2,58	cA	2,36	bB
	LASER-PL	2,83	bA	1,90	bB	2,75	bA	2,31	bB

¹Equipamento posicionado sob quarto spray. ²Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray. ³Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays. ⁴Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays.

Para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Na condição sem vento percebe-se a influência significativa da altura de instalação dos aparelhos, em relação à barra de sprays, na velocidade das gotas. Há aumento da velocidade das gotas sob o quarto spray, longo da queda. Com os equipamentos posicionados entre o quarto e quinto spray, pela diferença entre as

velocidades medidas em duas alturas de instalação nota-se que as gotas perderam velocidade ao longo deste percurso.

O vento com um vetor de força horizontal incrementa a velocidade das gotas que ganham velocidade ao longo da queda na maioria dos testes nas duas posições referência.

A velocidade das gotas com o sistema ajustado a uma pressão de serviço de 2,00 bar é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 - Velocidade média das gotas de chuva simulada a 2,00 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.

Condição	Método	Velocidade das gotas de chuva (m s ⁻¹)							
		¹ S.S.				² E.S.			
		³ 1,25 m		⁴ 0,85 m		1,25 m		0,85 m	
Sem Vento	UFLA-DRGS	3,07	aA	2,77	cA	2,62	aB	2,76	aA
	LASER-PP	2,32	bB	3,68	aA	2,81	aA	2,32	bB
	LASER-PL	2,93	aB	2,99	bA	2,24	bB	2,32	bA
Com Vento	UFLA-DRGS	2,55	bB	3,45	bA	3,31	aA	3,38	aA
	LASER-PP	2,44	cB	4,13	aA	2,44	cA	2,59	bA
	LASER-PL	2,91	aA	2,50	cB	2,71	bA	2,43	bB

¹Equipamento posicionado sob quarto spray. ²Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray. ³Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays.

⁴Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays.

Para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Para uma pressão de serviço de 2,00 bar, à presença de vento, houve uma tendência de as gotas de chuva perderem velocidade com a queda, independente da posição de instalação dos equipamentos. Adicionalmente,

percebe-se em três testes que as médias entre as alturas de instalação dos equipamentos foram estatisticamente iguais.

4.3.1.3 Velocidade das gotas variando condição do vento

Gotas de chuvas naturais caem verticalmente ao solo sob o efeito das forças gravitacionais e arraste, o vento gera uma força horizontal sobre as gotas desviando-as da trajetória vertical, alterando as características dinâmicas das mesmas. Assim, os testes na presença e ausência de vento podem caracterizar uma alteração que essa força horizontal causaria à velocidade das gotas simuladas.

As velocidades médias das gotas de chuva simuladas a 1,00 bar de pressão de serviço em função do incremento ou não do vento são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Velocidade média das gotas de chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da condição do vento.

Altura	Método	Velocidade das gotas de chuva ($m s^{-1}$)							
		¹ S.S.				² E.S.			
		Sem Vento		Com Vento		Sem Vento		Com Vento	
³ 1,25 m	UFLA-DRGS	2,95	aB	3,38	abA	2,54	aB	3,09	aA
	LASER-PP	2,93	aA	3,61	aA	2,39	bB	2,56	cA
	LASER-PL	3,20	aA	2,73	bB	2,47	abB	2,68	bA
⁴ 0,85 m	UFLA-DRGS	2,75	bB	3,27	aA	2,63	aB	3,14	aA
	LASER-PP	3,25	aA	3,29	aA	2,45	bA	2,27	bB
	LASER-PL	2,40	cA	1,94	bB	2,43	bA	2,29	bA

¹Equipamento posicionado sob quarto spray. ²Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray. ³Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays. ⁴Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays.

Para cada condição altura de instalação do equipamento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Percebe-se ao analisar a Tabela 16, que com o sistema ajustado para trabalhar com pressão de serviço de 1,00 bar, o fator vento interferiu significativamente na velocidade das gotas na maioria dos testes. Para o teste com os equipamentos instalados a 1,25 m de distância da barra de sprays e posicionados entre o quarto e quinto spray (E.S.), o vento agiu incrementando a velocidade das gotas, para os três equipamentos. Nas outras situações de posição, altura e equipamento testados, o vento influencia na maioria das velocidades observadas, porém não há uma tendência nos resultados, pois ora o vento age aumentando ora diminuindo a velocidade das gotas.

Com pressão de serviço ajustada em 1,50 bar (TABELA 17), a influência significativa do vento sobre a velocidade das gotas também é mais evidenciada. Observando os dados referentes aos testes com os equipamentos posicionados a 1,25 m de distância da barra de sprays fica mais claro a ação do vento agindo positivamente na velocidade das gotas. Com os equipamentos posicionados mais próximos aos sprays, 0,85 m de distância, essa tendência não é conclusiva. É notável a igualdade estatística entre as médias dos equipamentos em condição sem vento, a 1,25 de altura e sob o quarto spray.

Tabela 17 - Velocidade média das gotas de chuva simulada à 1,50 bar de pressão de serviço em função da condição do vento.

Altura	Método	Velocidade das gotas de chuva ($m\ s^{-1}$)							
		¹ S.S.				² E.S.			
		Sem Vento		Com Vento		Sem Vento		Com Vento	
³ 1,25 m	UFLA-DRGS	3,12	aB	3,50	aA	2,50	aB	3,31	aA
	LASER-PP	2,63	bB	2,81	bA	2,34	bB	2,58	cA
	LASER-PL	3,05	abA	2,83	bB	2,37	bB	2,75	bA
⁴ 0,85 m	UFLA-DRGS	2,80	aB	3,32	aA	2,80	aB	3,21	aA
	LASER-PP	3,07	aA	3,53	abA	2,48	bA	2,36	bA
	LASER-PL	2,57	aA	1,90	bB	2,49	bA	2,31	bB

¹Equipamento posicionado sob quarto spray. ²Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray. ³Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays.

⁴Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays.

Para cada condição altura de instalação do equipamento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Para 2,00 bar de pressão de serviço as velocidades das gotas de chuva são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Velocidade média das gotas de chuva simulada a 2,00 bar de pressão de serviço em função da condição do vento.

Altura	Método	Velocidade das gotas de chuva (m s ⁻¹)							
		¹ S.S.				² E.S.			
		Sem Vento		Com Vento		Sem Vento		Com Vento	
³ 1,25 m	UFLA-DRGS	3,07	aA	2,55	bB	2,62	aB	3,31	aA
	LASER-PP	2,32	bB	2,44	cA	2,81	aA	2,44	cB
	LASER-PL	2,93	aA	2,91	aA	2,24	bB	2,71	bA
⁴ 0,85 m	UFLA-DRGS	2,77	cB	3,45	bA	2,76	aB	3,38	aA
	LASER-PP	3,68	aB	4,13	aA	2,32	bA	2,59	bA
	LASER-PL	2,99	bA	2,50	cB	2,32	bB	2,43	bA

¹Equipamento posicionado sob quarto spray. ²Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray. ³Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays.

⁴Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays.

Para cada condição altura de instalação do equipamento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Ainda é observável a influência significativa do vento na maioria dos testes com equipamentos a 1,25 de distância da barra de sprays, ora a ação do vento é aumentada ora é diminui a velocidade das gotas. A uma menor distância dos sprays, há uma tendência de as gotas terem velocidades maiores na presença do vento.

4.3.2 Energia Cinética das gotas

A influencia da interação entre os diversos fatores testados nas médias de energia cinética das gotas de chuva simulada foram avaliadas estatisticamente.

4.3.2.1 Energia cinética das gotas variando a posição dos equipamentos

Para a pressão de serviço dos sprays regulada para 1,00 bar, (TABELA 19) observa-se que na ausência de vento a posição dentro do túnel interfere significativamente na energia cinética quando os equipamentos estão posicionados a 1,25 m de distância da barra de sprays.

Tabela 19 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da posição dos equipamentos.

Condição	Método	Energia cinética (J kg ⁻¹)							
		1,25 m				2,85 m			
		³ S.S.		⁴ E.S.		S.S.		E.S.	
Sem Vento	UFLA-DRGS	4,36	aA	3,23	aB	3,79	bA	3,45	aA
	LASER-PP	4,33	aA	2,86	aB	5,28	aA	3,00	bB
	LASER-PL	5,13	aA	3,06	aB	2,89	cA	2,94	bA
Com Vento	UFLA-DRGS	5,71	abA	4,77	aB	5,35	aA	4,92	aA
	LASER-PP	6,61	aA	3,29	cB	5,42	aA	2,57	bB
	LASER-PL	3,74	bA	3,61	bA	1,88	bB	2,63	bA

¹Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays. ²Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays. ³Equipamento posicionado sob quarto spray. ⁴Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray.

Para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Para esta mesma situação os três métodos geraram energias cinéticas estatisticamente semelhantes, sendo que a energia cinética foi maior quando instalados sob o quarto spray. Quando posicionados mais próximos aos sprays, a posição não interferiu estatisticamente na maioria dos resultados.

Ajustando a pressão de serviço em 1,50 bar, a posição de instalação dos equipamentos no túnel alterou significativamente todos os resultados obtidos com a barra de sprays a 1,25 m de distância dos equipamentos, independente da condição do vento (TABELA 20).

Tabela 20 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,50 bar de pressão de serviço em função da posição dos equipamentos.

Condição	Método	Energia cinética (J kg ⁻¹)							
		1,25 m				20,85 m			
		³ S.S.	⁴ E.S.	S.S.	E.S.	S.S.	E.S.	S.S.	E.S.
Sem Vento	UFLA-DRGS	4,88	aA	3,14	aB	3,92	aA	3,92	aA
	LASER-PP	3,46	bA	2,73	bB	4,74	aA	3,07	bA
	LASER-PL	4,65	aA	2,80	bB	3,30	aA	3,09	bA
Com Vento	UFLA-DRGS	6,12	aA	5,46	aB	5,51	aA	5,14	aA
	LASER-PP	3,96	bA	3,34	cB	6,23	aA	2,79	bB
	LASER-PL	4,00	bA	3,78	bB	1,81	bB	2,68	bA

¹Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays. ²Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays. ³Equipamento posicionado sob quarto spray.

⁴Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray.

Para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Novamente, foi observada a tendência de a energia cinética ser maior sob o quarto spray com a presença do vento. Para a condição de instalação dos equipamentos a uma distância de 0,85 m da barra de sprays na ausência do vento, a posição não alterou significativamente os resultados da energia cinética, salientando que não houve também diferença significativa entre o resultado dos três métodos quando instalados sobre o quarto spray.

Com o aumento da pressão de serviço, as características das gotas modificam (TABELA 21).

Tabela 21 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 2,00 bar de pressão de serviço em função da posição dos equipamentos.

Condição	Método	Energia cinética (J kg ⁻¹)							
		¹ 1,25 m				² 0,85 m			
		³ S.S.	⁴ E.S.	S.S.	E.S.	S.S.	E.S.	S.S.	E.S.
Sem Vento	UFLA-DRGS	4,72	aA	3,44	aB	3,83	cA	3,81	aA
	LASER-PP	2,69	bB	3,96	aA	6,79	aA	2,69	bB
	LASER-PL	4,29	aA	2,50	bB	4,49	bA	2,70	bB
Com Vento	UFLA-DRGS	6,29	aA	5,47	aB	5,93	bA	5,73	aA
	LASER-PP	2,97	cA	2,98	cA	8,52	aA	3,39	bB
	LASER-PL	4,24	bA	3,67	bB	3,14	cA	2,95	bA

¹Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays. ²Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays. ³Equipamento posicionado sob quarto spray.

⁴Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray.

Para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Assim, para 2,00 bar de pressão no início da barra de sprays, a influência da posição de instalação dos equipamentos ao longo do túnel foi notada na grande maioria dos testes, sendo novamente perceptível uma maior energia cinética nos testes com os equipamentos posicionados sob o quarto spray.

Uma análise generalista dos dados demonstrou uma consistência entre os novos resultados gerados pelo UFLA-DRGS em todos os testes, pois independente da pressão de serviço usada, os resultados seguiram a tendência geral. Este fato demonstra significância ao fator posição dos equipamentos no túnel quando instalados a uma distância de 1,25m da barra de sprays, resultando

em uma energia cinética maior sob o quarto spray e a não significância do fator posição quando instalados a 0,85 m da barra de sprays.

4.3.2.2 Energia cinética das gotas variando a altura de instalação dos equipamentos

São apresentados na Tabela 22 os resultados obtidos pelos três métodos para a energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.

Tabela 22 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.

Condição	Método	Energia cinética (J kg ⁻¹)			
		¹ S.S.		² E.S.	
		³ 1.25 m	⁴ 0.85 m	1.25 m	0.85 m
Sem Vento	UFLA-DRGS	4,36 aA	3,79 bA	3,23 aA	3,45 aA
	LASER-PP	4,33 aA	5,28 aA	2,86 aA	3,00 bA
	LASER-PL	5,13 aA	2,89 cB	3,06 aA	2,94 bA
Com Vento	UFLA-DRGS	5,71 abA	5,35 aB	4,77 aB	4,92 aA
	LASER-PP	6,61 aA	5,42 aA	3,29 bA	2,57 bB
	LASER-PL	3,74 bA	1,88 bB	3,61 bA	2,63 bB

¹Equipamento posicionado sob quarto spray. ²Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray. ³Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays. ⁴Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays.

Para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Com análise da Tabela 22, observa-se que a energia cinética praticamente não foi alterada estatisticamente nos testes sem vento a 1,00 bar de pressão de serviço. Nessa situação os resultados dos três equipamentos foram

significativamente semelhantes quando posicionados a 1,25 m de distância da barra de sprays nos testes sem vento. Com a presença do vento a energia cinética foi em sua maioria maior quando os equipamentos estavam instalados a uma maior distância da barra de sprays, indicando que as gotas ganham energia ao longo desta trajetória analisada.

Os dados obtidos a partir do ajuste da pressão de serviço em 1,50 bar são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,50 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.

Condição	Método	Energia cinética (J kg ⁻¹)							
		¹ S.S.				² E.S.			
		³ 1.25 m		⁴ 0.85 m		1.25 m		0.85 m	
Sem Vento	UFLA-DRGS	4,88	aA	3,92	aB	3,14	aB	3,92	aA
	LASER-PP	3,46	bA	4,74	aA	2,73	bA	3,07	bA
	LASER-PL	4,65	aA	3,30	aB	2,80	bB	3,09	bA
Com Vento	UFLA-DRGS	6,12	aA	5,51	aB	5,46	aA	5,14	aA
	LASER-PP	3,96	bB	6,23	aA	3,34	cA	2,79	bB
	LASER-PL	4,00	bA	1,81	bB	3,78	bA	2,68	bB

¹Equipamento posicionado sob quarto spray. ²Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray. ³Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays.

⁴Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays.

Para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Para a situação com pressão de serviço de 1,50 bar, a influência da altura se torna mais evidente na maioria das situações. Interessante observar que na ausência do vento, a energia cinética das gotas sob o quarto spray foi maior ao final da trajetória. Já com os equipamentos posicionados entre sprays observou-

se o inverso, a energia cinética foi maior no início da trajetória das gotas na maioria dos casos.

Ainda sem vento, deve-se salientar para a igualdade estatística da energia cinética através dos três métodos quando posicionados sob o quarto spray a 0,85m de distância da barra de sprays.

Com o vento, fica evidenciada a influência da altura de instalação dos equipamentos sobre a energia cinética das gotas. A energia cinética tende a ser significativamente maior ao final da trajetória das gotas, não havendo influência da posição, neste caso.

A caracterização das gotas quanto à energia cinética para a pressão de serviço em 2,00 bar é apresentada a seguir (TABELA 24):

Tabela 24 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 2,00 bar de pressão de serviço em função da altura de instalação dos equipamentos.

Condição	Método	Energia cinética (J kg ⁻¹)							
		¹ S.S.				² E.S.			
		³ 1.25 m		⁴ 0.85 m		1.25 m		0.85 m	
Sem Vento	UFLA-DRGS	4,72	aA	3,83	cA	3,44	aA	3,81	aB
	LASER-PP	2,69	bB	6,79	aA	3,96	aA	2,69	bB
	LASER-PL	4,29	aA	4,49	bA	2,50	bB	2,70	bA
Com Vento	UFLA-DRGS	6,29	aA	5,93	bB	5,47	aA	5,73	aA
	LASER-PP	2,97	cB	8,52	aA	2,98	cA	3,39	bA
	LASER-PL	4,24	bA	3,14	cB	3,67	bB	2,95	bB

¹Equipamento posicionado sob quarto spray. ²Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray. ³Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays.

⁴Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays.

Para cada condição de vento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Para essa pressão de serviço e condições, não se pode observar um comportamento comum entre as gotas. Ora a energia cinética das gotas foi significativamente maior ao início da trajetória, ora foi menor.

4.3.2.3 Energia cinética das gotas variando a condição do vento

Com o simulador com pressão de ajuste a 1,00 bar, Tabela 25, o vento aumentou estatisticamente a energia cinética das gotas na maioria dos testes quando os equipamentos estavam situados a uma maior distância da barra dos sprays, 1,25 m.

Tabela 25 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,00 bar de pressão de serviço em função da condição do vento.

Altura (m)	Método	Energia cinética (J kg ⁻¹)							
		¹ S.S.				² E.S.			
		Sem Vento		Com Vento		Sem Vento		Com Vento	
³ 1,25	UFLA-DRGS	4,36	aB	5,72	abA	3,24	aB	4,78	aA
	LASER-PP	4,33	aA	6,61	aA	2,86	aB	3,29	cA
	LASER-PL	5,13	aA	3,74	bB	3,06	aB	3,61	bA
⁴ 0,85	UFLA-DRGS	3,79	bB	5,35	aA	3,46	aB	4,93	aA
	LASER-PP	5,28	aA	5,42	aA	3,00	bA	2,57	bB
	LASER-PL	2,89	cA	1,88	bB	2,94	bA	2,63	bA

¹Equipamento posicionado sob quarto spray. ²Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray. ³Equipamento instalado a 1,25 m de distância da barra de sprays.

⁴Equipamento instalado a 0,85 m de distância da barra de sprays.

Para cada condição altura de instalação do equipamento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Quando instalados a essa distância da barra e sem o vento, a energia cinética calculada foi estatisticamente igual para os métodos tanto sob, como

entre sprays. O vento alterou também a energia cinética das gotas ao se analisar os dados dos equipamentos instalados a 0,85 m da barra de sprays, porém em algumas situações a energia cinética aumentou e em outras diminuiu.

Assim como foi observado na Tabela 25, vê-se na Tabela 26 a influência do vento na energia cinética. Fica evidenciada a diferença significativa entre a presença ou não dos ventos na energia cinética, quando os equipamentos estavam a 1,25 m de distância da barra de sprays sendo que há uma tendência de a energia cinética ser maior com o vento.

Mais próxima à barra de sprays, observa-se também diferença estatística entre a energia cinética das gotas de chuva no ambiente com ausência e presença do vento, porém influenciando ora aumentando, ora diminuindo a energia cinética. O mesmo pode estar agindo na velocidade como no tamanho e forma das gotas. Vale ressaltar a igualdade estatística entre a energia cinética calculada através dos três equipamentos para a situação sem vento, sob o quarto spray e a 0,85 m da barra de spray.

Tabela 26 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 1,50 bar de pressão de serviço em função da condição do vento.

Altura	Método	Energia cinética (J kg ⁻¹)							
		¹ S.S.				² E.S.			
		Sem Vento		Com Vento		Sem Vento		Com Vento	
³ 1,25 m	UFLA-DRGS	4,89	aA	6,12	aB	3,14	aA	5,46	aB
	LASER-PP	3,46	bA	3,96	bB	2,73	bA	3,34	bB
	LASER-PL	4,65	aA	4,00	bB	2,80	bA	3,78	cB
⁴ 0,85 m	UFLA-DRGS	3,92	aA	5,51	aB	3,92	aA	5,14	aB
	LASER-PP	4,74	aA	6,23	aA	3,07	bA	2,79	bA
	LASER-PL	3,30	aA	1,81	bB	3,09	bA	2,68	bB

¹Equipamento posicionado sob quarto spray. ²Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray. ³Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays.

⁴Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays.

Para cada condição altura de instalação do equipamento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre sí pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Como nas situações anteriores, observa-se na Tabela 27 que o vento age de maneira positiva sobre a energia cinética das gotas.

Tabela 27 - Energia cinética das gotas da chuva simulada a 2,00 bar de pressão de serviço em função da condição do vento.

Altura	Método	Energia cinética (J kg ⁻¹)							
		¹ S.S.				² E.S.			
		Sem Vento		Com Vento		Sem Vento		Com Vento	
³ 1,25 m	UFLA-DRGS	4,72	aA ⁽¹⁾	6,29	aB	3,44	aA	5,47	aB
	LASER-PP	2,69	bA	2,97	bB	3,96	aA	2,98	bB
	LASER-PL	4,29	aA	4,24	cA	2,50	bA	3,67	cB
⁴ 0,85 m	UFLA-DRGS	3,83	aA	5,93	aB	3,81	aA	5,73	aB
	LASER-PP	6,79	bA	8,52	bB	2,69	bA	3,39	bA
	LASER-PL	4,49	cA	3,14	cB	2,70	bA	2,95	bB

¹Equipamento posicionado sob quarto spray. ²Equipamento posicionado entre o quarto e quinto spray. ³Equipamento instalado a 1,25m de distância da barra de sprays.

⁴Equipamento instalado a 0,85m de distância da barra de sprays.

Para cada condição altura de instalação do equipamento, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e para cada condição de distância a barra de sprays, médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem entre sí pelo teste Tukey a 5% de probabilidade estatística.

Na maioria dos testes sob estas condições, apresentaram-se diferenças significativas na energia cinética entre a chuva com presença do vento e com a ausência do fator, com tendência para maiores energias cinéticas das gotas nas chuvas com vento.

5 CONCLUSÃO

O aparelho Dynamic Rain Gage System (UFLA-DGRS) se mostra promissor para a determinação da energia cinética das gotas, sendo seus resultados estatisticamente similares ao disdrômetro a LASER OTT Parsivel².

O Dynamic Rain Gage System (UFLA-DGRS) apresentou resultados mais consistentes em comparação ao disdrômetro a LASER OTT Parsivel² a partir das análises de índices estatísticos. A situação em que os equipamentos apresentaram melhor índice de confiança foi para os tratamentos com 1,0 e 1,50 bar entre o quarto e quinto spray em condição sem vento.

Entretanto, há muito a se melhorar no equipamento Dynamic Rain Gage System (UFLA-DGRS), principalmente quanto a sua operacionalidade para possibilitar registros eletrônicos em tempo real.

Os dados das médias das velocidades das gotas devem ser analisados em conjunto com seus respectivos diâmetros para melhor caracterizar a chuva simulada pelo túnel de vento I.C.E. e compará-la com a chuva natural.

Durante os testes percebeu-se uma variabilidade espacial ao longo do túnel que influencia na velocidade e energia cinética das gotas.

De acordo com a situação testada, o vento influenciou estatisticamente na energia cinética, velocidade e inclinação das gotas, com variações de mais de 45° no ângulo de incidência.

REFERÊNCIAS

ANGULO-MARTINEZ, M.; BARROS, A. Measurement uncertainty in rainfall kinetic energy and intensity relationships for soil erosion studies: an evaluation using PARSIVEL disdrometers in the Southern Appalachian Mountains. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 228, p. 28-40, Jan. 2015.

ANTÔNIO, M. A. Energia cinética da precipitação estimada por radar de tempo ajustado por medida disdrométrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 41-48.

ASSUNÇÃO, H. F. et al. Uso de pluviômetros vetoriais para estimar a energia cinética das chuvas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBMET/UFSC, 2006. 1 CD-ROM.

BEARD, K. V.; PRUPPACHER, H. R. A determination of the velocity and drag of small water drops by means of a wind tunnel. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 26, p. 1066-1072, 1969.

CASSOL, E. A. et al. Erosividade, padrões hidrológicos, período de retorno e probabilidade de ocorrência das chuvas em São Borja, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 1239-1251, maio/jun. 2008.

CORNELIS, W.; ERPUL, G.; GABRIELS, D. The I.C.E. wind tunnel for wind and water interaction research: wind and rain interaction in erosion. In: VISSER, S.; CORNELIS, W. (Ed.). **Tropical resource management papers**. Wageningen: Wageningen University and Research Centre, 2004. chap. 13, p. 195-224.

DE PLOEY, J.; GABRIELS, D. Measuring soil loss and experimental studies. In: KIRKBY, M. J.; MORGAN, R. P. C. (Ed.). **Soil erosion**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1980. p. 63-108.

EIGEL, J. D.; MORE, I. D. A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 26, n. 4, p. 1079-1084, 1983.

ERPUL, G.; GABRIËLS, D.; JANSSENS, D. Assessing the drop size distribution of simulated rainfall in a wind tunnel. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 45, n. 3/4, p. 455-463, 1998.

ERPUL, G.; GABRIELS, D.; NORTON, L. D. The combined effect of wind and rain on interrill erosion processes, lecture given on soil physics. **College on Soil Physics**, Trieste, p. 174-182, Mar. 2003.

FOSTER, G. R. et al. Conversion of the universal loss equation to SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 36, p. 355-359, 1981.

FOX, N. I. Technical note: the representation of rainfall dropsize distribution and kinetic energy. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 8, n. 5, p. 1001-1007, 2004.

FRIEDRICH, K. et al. Articulating and stationary PARSIVEL disdrometer measurements in conditions with strong winds and heavy rainfall. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, Boston, v. 30, p. 2063-2080, Sept. 2013.

GABRIELS, D. et al. The I.C.E. wind tunnel for wind and water erosion studies. **Soil Technology**, Lansing, v. 10, p. 1-8, 1997.

GUNN, R.; KINZER, G. R. Terminal velocity of water droplets in stagnant air. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, Boston, v. 6, n. 1, p. 243-248, Jan. 1949.

HILLS, D. **Advanced Sprinkler irrigation**. Davis: Davis University of California, 1988. Course Notes.

KATHIRAVELU, G.; LUCKE, T.; NICHOLS, P. Rain drop measurement techniques: a review. **Water**, Pittsburgh, v. 8, n. 1, 2016. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2073-4441/8/1/29/htm>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

KELLER, J.; BLIESNER, R. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: V. N. Reinhold, 1990. 652 p.

KING, B. A.; BJORNEBERG, D. L. Characterizing droplet kinetic energy applied by moving spray-plate center pivot irrigation sprinklers. **Transactions of the ASABE**, Saint Joseph, v. 53, n. 1, p. 137-145, 2010.

KRAJEWSKI, W. F. et al. DEVEX - Disdrometer Evaluation Experiment: basic results and implications for hydrologic studies. **Advances in Water Resources**, Southampton, v. 29, n. 2, p. 311-325, Feb. 2006.

LAL, R. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. et al. (Ed.). **Soil erosion research methods**. Washington: Soil and Water Conservation Society, 1988. p. 141-160.

LAWS, J. O.; PARSONS, D. A. The relationship of raindrop size to intensity. **Transactions American Geophysical Union**, Washington, v. 24, n. 2, p. 452-460, Apr./June 1943.

LIMA, L. A. et al. Sistema dinâmico de pluviometria para medir velocidade e Energia Cinética de gotas de chuva natural ou artificial. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE INGENIERÍA AGRÍCOLA, 9.; CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39., 2010, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2010. v. 1, p. 1-7.

LIMA, L. A. et al. Sistema dinâmico de pluviometria para medir velocidade de gotas de chuva. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2014, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 2014. v. 1, p. 1-3.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3rd ed. Oxford: Blackwell, 2005. 299 p.

NIU, S. et al. Distributions of raindrop sizes and fall velocities in a semiarid plateau climate: convective versus stratiform rains. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, Boston, v. 49, n. 4, p. 632-645, Apr. 2010.

OTT MESSTECHNIK GMBH & CO. KG. **Operating instruction**: present weather sensor parsivel. Kempten, 2008. 48 p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Version 2.15.1. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2009. Software.

SALLES, C.; POESEN, J.; SEMPERE-TORRES, D. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 257, n. 1/4, p. 256-270, Feb. 2002.

SEGINER, I. Tangential velocity of sprinkler drops. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 8, n. 1, p. 90-93, Jan./Feb. 1965.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms**. Madison, 2008. 88 p.

TUKEY, J. W. **The problem of multiple comparisons**. Princeton: Mimeographs Princeton University, 1953.

VAN DJIK, A. I. J. M.; BRUIJNZEEL, L. A.; ROSWELL, C. J. Rainfall intensity kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 261, n. 1/4, p. 1-23, Apr. 2002.

WAGNER, C. S.; MASSAMBANI, O. Análise da relação intensidade de chuva-energia cinética de Wischmeier & Smith e sua aplicabilidade à região de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 3, p. 197-203, set./dez. 1988.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58 p. (USDA AH, 537).

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v. 39, n. 2, p. 285-291, 1958.

WONG, K. Performance of several present weather sensors as precipitation gauges. In: WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION: TECHNICAL CONFERENCE ON METEOROLOGICAL AND ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS AND METHODS OF OBSERVATION, 2012, Brussels. **Proceedings...** Brussels: WMO, 2012. p. 1-25.