

Disdrómetro óptico de bajo costo para la determinación del tamaño y velocidad de las gotas de lluvia.

Nelson Falcón¹, Jessica Garzón¹, Orión Falcón² y Ramón Viñas-García³

¹Laboratorio de Física de la Atmósfera y el Espacio Ultraterrestre, Dpto. de Física, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Venezuela
<nelsonfalconv@gmail.com>

²Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

³Servicio de Meteorología de la Aviación Militar, Fuerza Armada Nacional Bolivariana, Venezuela

(Recibido: 20-Jun-2013. Publicado: 30-Sep-2013)

Resumen

El tamaño y la velocidad de caída de las gotas de lluvia es un factor importante para estudiar la erosión de los suelos. Los pluviómetros no permiten medir directamente estas magnitudes. Para superar estas limitaciones se emplean los disdrómetros que sirven además para calibrar los radares meteorológicos. Se diseñó y construyó un disdrómetro óptico de bajo costo, que puede emplearse como medidor universal de precipitaciones. El disdrómetro se elabora con dos LED IR333C como optocopladores infrarrojos de 940 nanómetros, junto a un amplificador operacional TL82 y un pulsador LM555. Se obtuvieron resultados preliminares para varios eventos de precipitación, logrando medir un tamaño medio de $1,6 \pm 0,25$ mm de diámetro, alcanzando una velocidad media de $5,4 \pm 1,8$ m/s. El disdrómetro elaborado mostró su efectividad para cálculos pluviométricos y cinemáticos de los eventos de precipitación en la estación de Valencia (Carabobo, Venezuela) durante las primeras lluvias del periodo lluvioso de julio de 2012.

Palabras clave: Disdrómetro, pluviómetro, gotas de lluvia, erosión.

Abstract

The size and fall speed of raindrops is an important factor to consider in soil erosion. Pluviometers do not measure these quantities directly. Disdrometers overcome these limitations and also serve to calibrate weather radars. We design and build a low cost optical disdrometer, which can be used as a universal precipitation meter. The disdrometer is built with two LED IR333C as infrared optocouplers of 940 nanometers, plus a TL82 operational amplifier and a LM555 push. Preliminary results were obtained for several precipitation events measuring averaged raindrop diameters of 1.6 ± 0.25 mm and average speed of 5.4 ± 1.8 m/s. The developed disdrometer showed its effectiveness in rainfall and kinematic calculations of precipitation events in the Valencia station (Carabobo, Venezuela) during the first rains of the rainy season in July 2012.

Key words: Disdrometer, rain gauge, rain drops, erosion.

1. Introducción

La intensidad de las precipitaciones tales como la lluvia, el rocío, la nieve y el granizo, entendida como la cantidad de condensación acuosa caída por unidad de superficie terrestre en un lapso determinado, es fundamental en la valoración del estado del tiempo atmosférico. Sin embargo, la determinación de la cantidad de lluvia a través de pluviómetros (Tokay *et al.*, 2001) no es un indicador completo de la intensidad de las precipitaciones; el tamaño y velocidad de las gotas puede ser diferente para la misma cantidad mensurable de lluvia. La velocidad y el tamaño de las gotas de lluvias son fundamentales en los procesos de erosión de suelo, puesto que el principal agente del disgregador del suelo es el impacto de las gotas de lluvia sobre él (Vega y Febles, 2006, y referencias en él).

Diversos métodos se han desarrollado para valorar indirectamente la intensidad de las precipitaciones a partir de las medidas pluviométricas (Febles y Vega, 2008), empero resultan insuficientes frente a los disdrómetros que miden directamente el tamaño y velocidad de las gotas de lluvia y el flujo acuoso precipitado sobre una región (Nin, 2008, y referencias allí citadas; Tokay *et al.*, 2003). Por otro lado la determinación del tamaño y velocidad de las gotas de lluvia en diferentes latitudes es necesaria para la calibración de los Radares Doppler meteorológicos (Zhang *et al.*, 2006; Ulbrich y Atlas, 2007) y de especial importancia en regiones tropicales, donde las lluvias y tormentas de gran intensidad presentan gotas de hasta 5 mm de diámetro máximo promedio a nivel de superficie (Villiermaux y Bossa, 2009).

Se han desarrollado diversas técnicas para medir las distribuciones de tamaños de las gotas de lluvia. La primera observación cuantitativa fue realizada por Wiesner en 1895. Actualmente se estima que las gotas de lluvia tienen rangos variables entre 0,1 y hasta 12 mm de diámetro promedio en su trayectoria atmosférica, donde sufren procesos estocásticos de disrupción y coalescencia que afectan a la evolución de las distribuciones de tamaño (Rogers, 1976). El diámetro promedio de gotas de lluvia líquida a nivel de superficie es de hasta 5 mm para las gotas grandes, de 1,6 a 3,2 mm para las medianas y menores de 1,5 mm para las más pequeñas (Seliga *et al.*, 1986).

Las mediciones del tamaño y velocidad de las gotas de lluvias se han realizado en varios países, empleando diversos tipos de disdrómetros, entre ellos el Disdrómetro Acústico (Nystuen, 2001), Disdrómetro Video Bidimensional (Kruger y Krajewski, 2002) y Disdrómetro Óptico fotoeléctrico (Löffler-Mang y Jürg, 2000; Nin, 2008). Las estaciones meteorológicas no siempre cuentan con disdrómetros comerciales (Distromet Ltd., 1997) porque su costo es elevado, como es el caso en Venezuela.

El objetivo de esta investigación es proponer un disdrómetro óptico de bajo costo para medir directamente el tamaño y la velocidad terminal de las gotas de lluvia (sección 2) y reportar los resultados previos para las precipitaciones ocurridas en el estado Carabobo (Venezuela) durante la temporada de lluvia de 2012 (sección 3). En la última sección se esbozan las conclusiones generales.

2. Materiales y Método

El diseño del disdrómetro óptico se fundamenta en la interrupción parcial de un haz de luz infrarroja por las gotas de lluvia. Parte de esa luz infrarroja se absorbe por los diferentes estados vibracionales y rotacionales característicos del agua. Como el agua líquida, en rangos de temperatura ambiente (entre los 283 y 310 K) presenta una absorbancia significativa (Coker *et al.*, 1982) para longitudes de onda entre 800 y 1000 nm (figura 1 izquierda), pueden emplearse diodos como el IR33C cuyo espectro de emisión-absorción se centra en los 940 nm (figura 1 derecha) como optosensores de las gotas de agua.

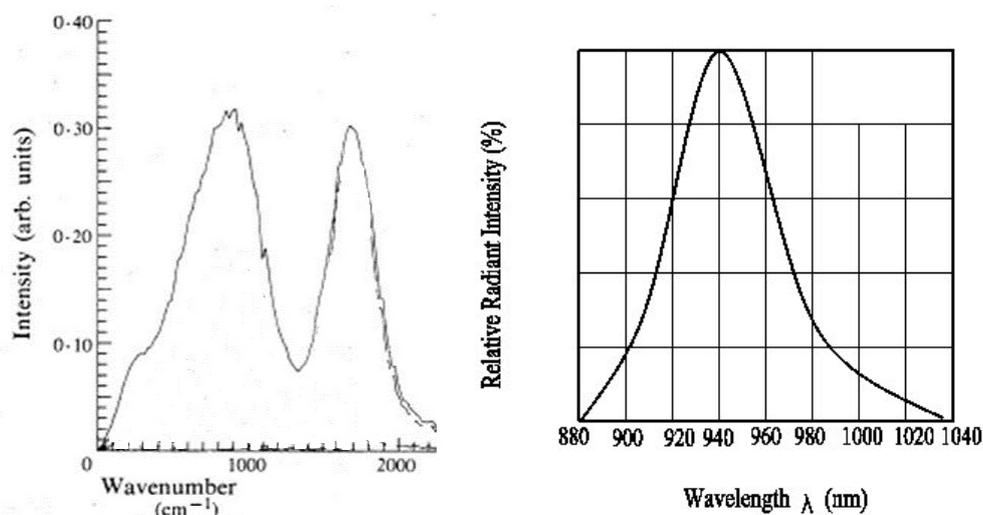


Fig. 1: Espectros característicos en el infrarrojo del agua (izquierda) y del Diodo IR333C (derecha; <http://www.everlight.com>).

2.1. Sistema óptico

Un haz de luz de 940 nm se focaliza en medio de lentes convergentes (L1 y L2) separadas a la distancia focal de 5,5 cm, y un sistema electrónico mide la intensidad de luz infrarroja cuando la gota de lluvia interrumpe el haz. El sistema óptico se dispone mediante un arreglo con tubos PVC como ilustra la figura 2, de modo que tanto el diodo emisor (DE) como el receptor (DR) queden a la distancia focal de las lentes. El tamaño del haz se limita a 1 cm de diámetro mediante diafragmas colocados en los extremos de los tubos PVC, para disminuir el área de la sección transversal del haz y garantizar que el dispositivo detecte el tamaño medio de una gota de lluvia en el orden de 0,5 cm (Löfller-Mang y Jürg, 2000).

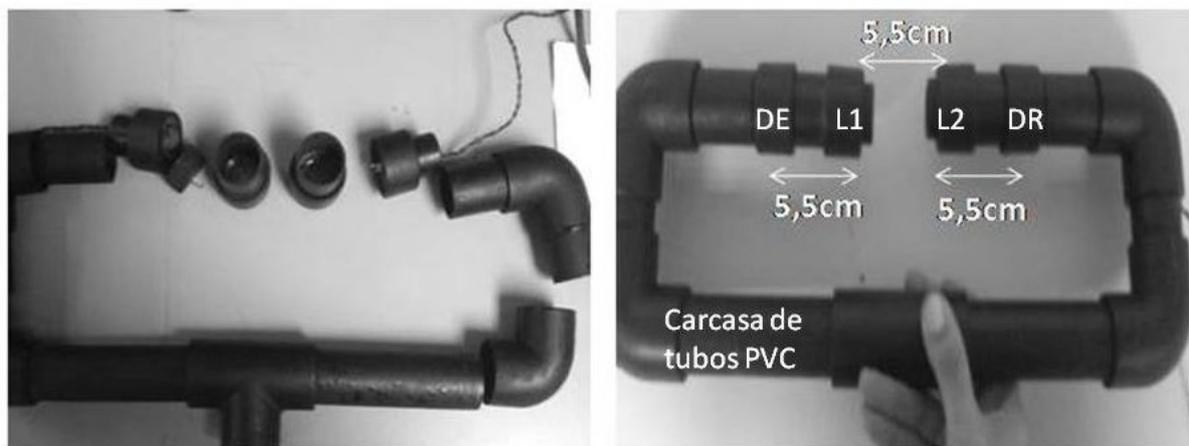


Fig. 2: Esquema general del disdrómetro óptico analógico.

La intensidad infrarroja colectada por el diodo sensor (DR) será disminuida por el tránsito de la gota de lluvia al atravesar el haz. La intensidad infrarroja colectada por el sensor es proporcional al voltaje. Si no hay gotas atravesando el haz, se recibe un voltaje de referencia V_0 . Análogamente, si una gota atraviesa el haz, ocasionará una atenuación ΔV . Por lo tanto la opacidad de la radiación es función del radio (r) de la gota y del coeficiente de absorción infrarroja del agua a temperatura ambiente (λ_{abs}). Partiendo de la ley de radiación de Kirchhoff, podemos inferir la relación:

$$\Delta V \simeq \lambda_{abs} 2r \quad (1)$$

Que expresa que, a mayor espesor de la gota, mayor será la atenuación de voltaje, y por tanto menor será el voltaje detectado.

2.2. Sistema electrónico

El sistema electrónico del disdrómetro consiste en dos circuitos separados, uno para el diodo emisor (DE) y otro para el diodo sensor (DR). El circuito emisor consta de un diodo infrarrojo IR333C y un temporizador LM555, en configuración monoestable, como generador de pulsos de la señal de emisión. La frecuencia está determinada por la R1 y C1 en la salida del pin 3 (ver figura 3 izquierda). Los Diodos 'si' (Silicio) y 'Ger' (Germanio) estabilizan el voltaje para el Diodo LED IR en 1 voltio. Los rangos de temperatura de operación son de -10 a 60 °C; para su implantación en estaciones pluviométricas permanentes se recomienda recubrir o proteger las cajas con circuitos con aislantes térmicos y/o ventilación adicional a fin de asegurar la estabilidad de los amplificadores operacionales.

Para el circuito receptor (DR), se emplea también un diodo infrarrojo IR333C como fotosensor conectado a la entrada de un amplificador operacional TL082, cuya función es aumentar y convertir la señal luminosa en señal de voltaje que va al osciloscopio (pin1). (Véase figura 3 derecha).

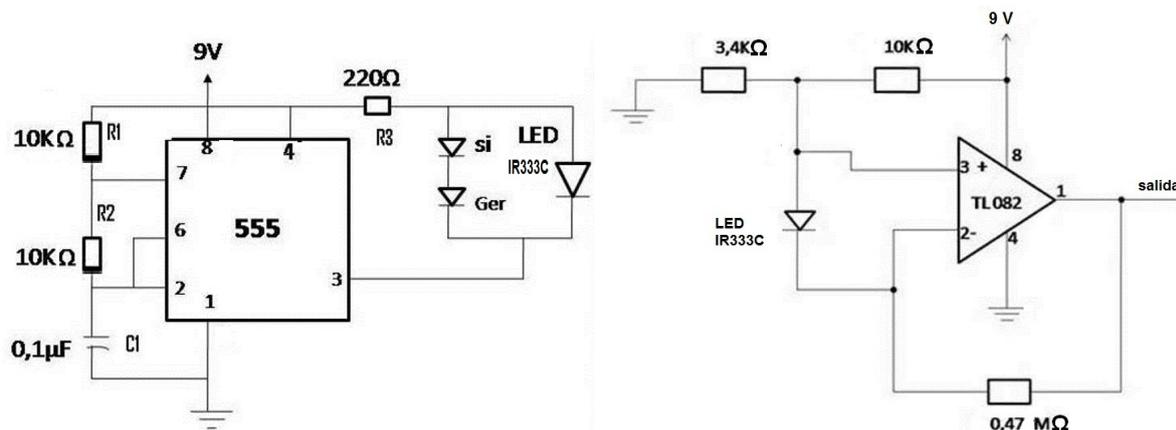


Fig. 3: Circuitos del sistema emisor (izquierda) y detector (derecha).

2.3. Calibración del disdrómetro

De acuerdo a la ecuación (1) la atenuación de voltaje detectado V depende del coeficiente de absorción infrarroja del agua a temperatura ambiente (λ_{abs}) y el radio de la gota de lluvia. Para usar el disdrómetro debe calibrarse previamente en el laboratorio con chorros de agua de espesor conocido y graficar la atenuación de voltaje en función del diámetro ($2r$). La pendiente de dicha gráfica representa el coeficiente de absorción (λ_{abs}). Se empleó agua servida, destilada y de lluvia, con el propósito de investigar qué tanto depende el coeficiente de absorción de la composición del agua, cuyos resultados se resumen en la figura 4. Para el agua de lluvia expresamente colectada se efectuaron medidas a 15 y 30 °C, y no se encontraron variaciones en el coeficiente de absorción infrarroja del agua en dicho rango.

La calibración con gotas y chorros de agua de sección transversal conocida posibilitan la determinación empírica del coeficiente de absorción IR del agua (λ_{abs}). La relación encontrada en la figura 4 (derecha) fue de $0,43 \pm 0,02$ V/mm para el agua servida, $0,47 \pm 0,02$ V/mm para el agua destilada y $0,46 \pm 0,02$ V/mm para el agua de lluvia, con un valor promedio de $\lambda_{abs} = 0,45 \pm 0,02$ V/mm. Obsérvese que el intercepto no nulo se interpreta como la variación de intensidad de luz infrarroja consecuencia del ambiente, que genera una señal de tensión (V) aún en ausencia de gotas de agua.

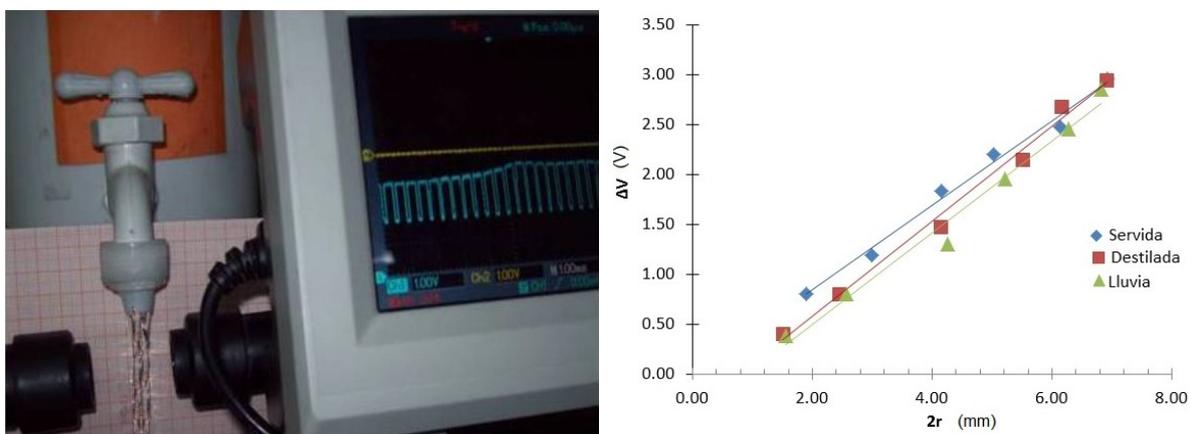


Fig. 4: Calibración del disdrómetro: montaje experimental (izquierda) y resultados (derecha).

3. Resultados y discusión

Las mediciones de campo se realizaron con dos prototipos de disdrómetros ópticos ubicados en los municipios Naguanagua (Estación 1) y San Diego (Estación 2) del Estado Carabobo, con el objetivo de determinar el comportamiento cinemático de las precipitaciones al inicio de la temporada de lluvias, en julio de 2012. En el primer prototipo el tamaño del haz es de $5 \pm 0,05$ mm de diámetro, mientras que en el segundo prototipo su diámetro equivale a $7 \pm 0,05$ mm.

3.1. Diámetro de las gotas

Mediante la técnica de calibración del disdrómetro óptico, se determinó a temperatura ambiente el coeficiente de absorción infrarroja (λ_{abs}). Sustituyendo el coeficiente de absorción infrarroja del agua ($\lambda_{abs} \approx 0,45 \pm 0,02$ V/mm) en la ecuación empírica (ecuación 1) obtenemos el radio (r) de una gota de lluvia y su incertidumbre (δr).

$$r = \frac{\Delta V}{0,9(V/mm)} \pm \left(\frac{\delta V}{0,9} + \frac{\Delta V \delta \lambda_{abs}}{0,9^2} \right) \tag{2}$$

Los resultados muestran que el tamaño medio de una gota es de $1,60 \pm 0,05$ mm de diámetro, valores comparables con los reportados por Kostinski y Shaw (2009).

A guisa de ejemplo el oscilograma que se observa en la figura 5 corresponde al evento del 2012/07/19 entre las 19 y 19:30 HLV (TU-4:30) en la Estación 1 ($10,128611^\circ$ N, $68,016111^\circ$ W, y 481 msnm). En ella se aprecia una variación de voltaje de $0,60 \pm 0,10$ V, y por lo tanto el radio de la gota es de aproximadamente $0,70 \pm 0,14$ mm.

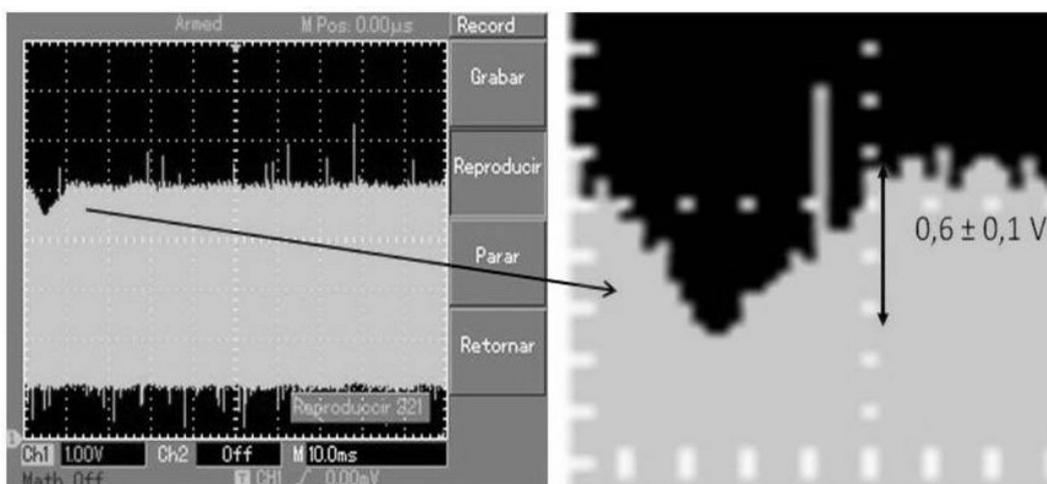


Fig. 5: Primera señal de una gota de lluvia del evento del 2012/07/19.

3.2. Velocidad de las gotas

El lapso de la interrupción del haz infrarrojo del disdrómetro es registrado por el osciloscopio, y resulta proporcional a la velocidad de la gota de lluvia:

$$v_{inst} = \frac{h}{t} \pm \left(\frac{\delta h}{t} + \frac{h \delta t}{t^2} \right) \tag{3}$$

Donde h es el tamaño del haz de luz del disdrómetro, t es el tiempo máximo de la interrupción del haz $\delta h=0,05$ mm la precisión del tamaño del haz de luz, y $\delta t=0,25$ ms la precisión del tiempo del osciloscopio.

Es claro que nos referimos a la componente vertical de la velocidad, que es la magnitud que mide el disdrómetro, soslayando los efectos del viento,

Como ejemplo se muestra el oscilograma de la figura 6, donde se aprecia que el tiempo que tarda una gota de lluvia al interrumpir el sensor equivale a $4,25 \pm 0,25$ ms, alcanzando una velocidad instantánea de aproximadamente $1,70 \pm 0,17$ m/s.

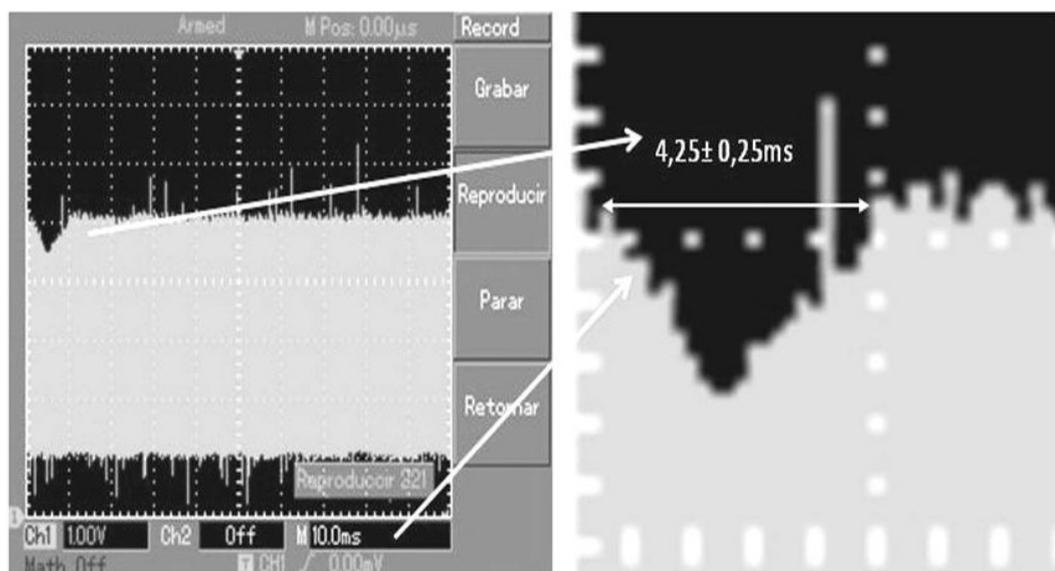


Fig. 6: Oscilograma de la velocidad de una gota de lluvia del día 19/07/2012.

Los valores medios arrojan $5,40 \pm 1,80$ m/s. Kostinski y Shaw (2009) reportan que el tamaño de las gotas de lluvia de 0,1 mm de diámetro alcanzan una velocidad terminal de 0,3 m/s, valores que extrapolados a gotas de lluvia de 1,6 mm de diámetro, darían valores de velocidad de hasta 4,8 m/s, en concordancia con los valores medios encontrados.

En la gráfica de la figura 7 se observa una relación empírica entre el radio medio de las gotas de lluvias y su velocidad terminal promedio, a nivel de superficie, para 14 eventos de pluviosidad en la estación 1, acaecidos entre el 5 y el 27 de julio del 2012.

La figura 7 exhibe una correlación lineal entre la velocidad de las gotas de lluvia y su tamaño, con pendiente de $5,42 \pm 0,11$ m/s/mm e intercepto de 0,69 m/s, que expresa los fenómenos de coalescencia y disrupción de las gotas de lluvia a nivel de superficie, según la cual las gotas de mayor tamaño exhiben una mayor rapidez final y las gotas con tamaño ínfimo tendrían una velocidad constante de al menos 0,69 m/s. La figura 7 muestra también una distribución de los radios medios de gota de las precipitaciones con mayor frecuencia de ocurrencia de entre 0,4 y 0,8 mm, y velocidades de entre 3 y 5 m/s.

Los oscilogramas de la cinemática de las lluvias permiten además estimar la distancia entre gota y gota a través de la relación:

$$\text{distancia entre gotas} = \text{velocidad de las gotas} * \text{frecuencia}^{-1} \quad (4)$$

Para el ejemplo mostrado en la figura 8, donde la velocidad media es de $4,60 \pm 0,11$ m/s y el periodo entre gota y gota es de $18 \pm 0,25$ ms, se obtiene que la distancia a que se encuentran las gotas es de aproximadamente $8,400 \pm 0,002$ cm.

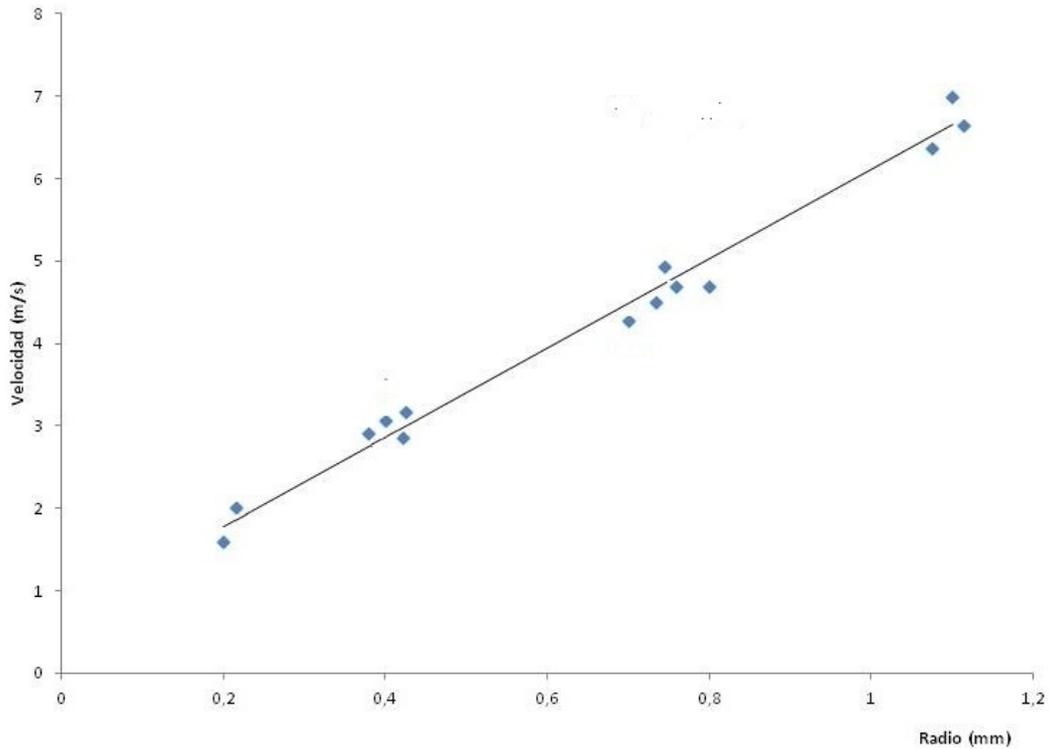


Fig. 7: Relación radio-velocidad de las gotas de lluvia en Valencia (Venezuela), en julio de 2012.

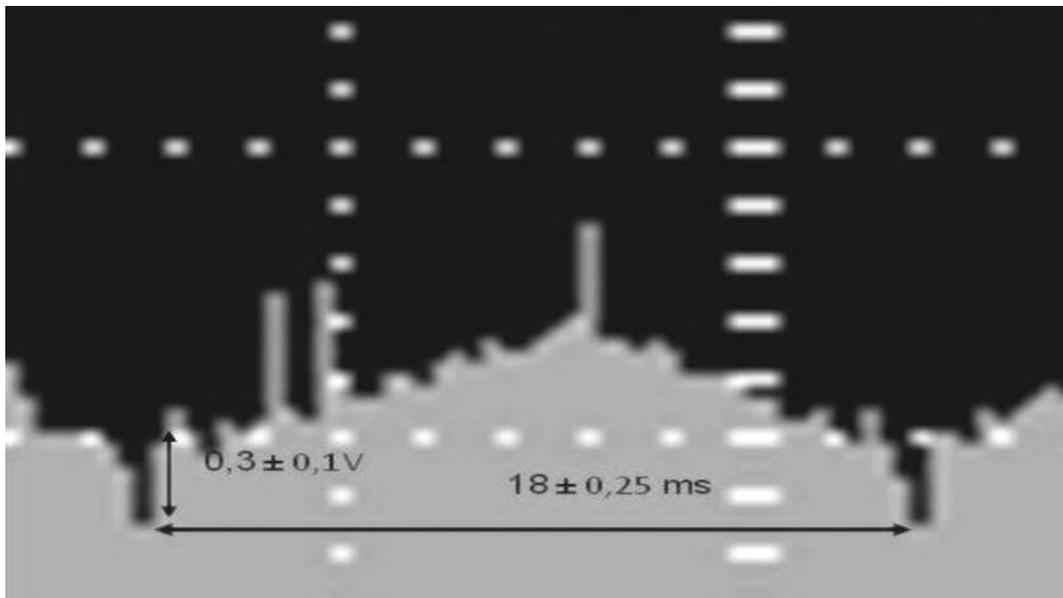


Fig. 8: Distancia entre gotas.

Teniendo el intervalo de tiempo total de la precipitación del evento del día 19/07/2012 fue de 34 minutos, y que se deposita una gota cada 18 ms, entonces el número total de gotas recolectadas en ese lapso de tiempo es de aproximadamente 1.130.000. Como quiera que ese es el número total de gotas recolectadas por sección transversal por el área del detector $A_d \approx 3,85 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, entonces en un área de 1 m^2 habrán $2,99 \cdot 10^8$ gotas/m². Por otro lado tenemos que, para este evento, el radio medio de la gota de

lluvia es de $0,33/2 \approx 0,16$ mm. Considerando una gota esférica, el volumen estimado es de aproximadamente $0,15 \text{ mm}^3$. El volumen de precipitación se obtiene multiplicando este valor por el total de gotas sobre un metro cuadrado de superficie: $4,35 \cdot 10^9 \text{ mm}^3$. Finalmente se estima que la cantidad de agua durante el evento de 34 minutos de precipitación es de aproximadamente $43,5 \text{ litros/m}^2$, vale decir $76,8 \text{ litros/m}^2/\text{hora}$. Por lo tanto el disdrómetro permite determinar el tamaño, velocidad y cantidad de lluvia, es decir, puede emplearse también como medidor pluviométrico. Resulta evidente por tanto que el ímpetu o impulso transferido por gota de lluvia al suelo es el producto de la masa de la gota por su velocidad terminal, en el orden de $6,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg m/s}$ por gota de lluvia, vale decir una transferencia de impulso, sobre unidad de superficie del suelo, del orden de $7,8 \text{ kgm/s}$ para las 1.130.000 gotas precipitadas en ese evento específico.

4. Conclusiones

El diseño y elaboración del disdrómetro óptico con características propias mostró su utilidad y eficiencia para determinar la distribución del tamaño y velocidad de las gotas de lluvia utilizando la absorbancia infrarroja del agua, partiendo de un modelo empírico análogo a la Ley de radiación de Kirchoff. Así se consiguió construir un sistema optoacoplador infrarrojo de 940 nm y lentes convergentes (plano-cóncavo) que permiten el registro de la atenuación de la intensidad al atravesar la gota de lluvia mediante un osciloscopio de almacenamiento digital.

Partiendo de las mediciones realizadas por los prototipos de disdrómetro óptico se pudo estudiar la cinemática de las precipitaciones locales y su variabilidad, específicamente en los municipios de San Diego y Naguanagua, al inicio de la temporada de lluvias de 2012. Para estos eventos el valor del tamaño medio de una gota es de $1,6 \pm 0,25$ mm de diámetro, y alcanza una velocidad promedio de $5,4 \pm 0,18$ m/s, valores comparables con los reportados por Kostinski y Shaw (2009). Finalmente se logró demostrar que el disdrómetro óptico también sirve como medidor pluviométrico y permite estimaciones sobre el impulso transferido por la lluvia en la erosión de los suelos.

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento a través del Proyecto Estratégico de la República Bolivariana de Venezuela FONACIT 2011-000326 "Caracterización de los fenómenos transitorios de la troposfera baja: Electrometeoros, litometeoros, microtornados y trombas marinas".

Bibliografía

- Coker DF, Reimers JR, Watts RO (1982): The Infrared Absorption Spectrum of Water. *Aust. J. Phys.*, 35:623-638.
- Distromet Ltd. (1997): Disdrometer RD-69. Instruction manual.
- Febles JM, Vega MB (2008): Aplicación del Nuevo Método de Evaluación de la Erosión de los Suelos (EVERC) y el Modelo MMF en Suelos de la subcuenca ganadera de la provincia Mampostón en La Habana, Cuba. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 42:305-311.
- Kostinski AB, Shaw RA (2009): Droplet dynamics: Raindrops large and small. *Nature Physics*, 5:624-625.
- Kruger A, Krajewski W (2002): Two-Dimensional Video Disdrometer: A Description. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19:602-617.
- Löffler-Mang M, Jürg J (2000): An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17:130-139.

- Nin R (2008): Tecnología del Riego por aspersión estacionario. Calibración y validación de un modelo de simulación“. Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, España.
- Nystuen J (2001): Listening to Raindrops from Underwater: An Acoustic Disdrometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18:1640-1657.
- Rogers R (1976): *Física de las Nubes*. Ed. Reverté S.A., España.
- Seliga TA, Aydin K, Direskeneli H (1986): Disdrometer measurements during an intense rainfall event in central Illinois: implications for differential reflectivity radar observations. *J. of Climate and App. Met.* 25:835-846.
- Tokay A, Kruger A, Krajewski WF (2001): Comparison of drop size distribution measurements by impact and optical disdrometers. *J. Appl. Meteor.*, 40:2083-2097.
- Tokay A, Wolff DB, Wolff KR, Bashor P (2003): Rain Gauge and Disdrometer Measurements during the Keys Area Microphysics Project (KAMP). *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20:1460-1477.
- Ulbrich CW, Atlas D (2007): Microphysics of Raindrop Size Spectra: Tropical Continental and Maritime Storms. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46:1777-1791.
- Vega MB, Febles JM (2006): Evaluation de la erosividad de la lluvia en regions agropecuarias en la Porción Central de la provincia de La Habana. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 40:215-220.
- Villermaux E, Bossa B (2009): Single-drop fragmentation determines size distribution of raindrops. *Nature Physics*, 5:697-702.
- Zhang G, Sun J, Brandes EA (2006): Improving Parameterization of Rain Microphysics with Disdrometer and Radar Observations. *J. Atmos. Sci.*, 63:1273-1290.

