

Variabilidad espacial de la lluvia según las mediciones de cuatro grupos de pluviómetros digitales instalados en Camagüey, Cuba

Félix Gamboa-Romero* ⁽¹⁾, Alexei Gamboa-Moreira ⁽¹⁾, Carlos A. Pérez-Sánchez ⁽¹⁾
y Daniel Martínez-Castro ⁽²⁾

⁽¹⁾Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, Cuba, E-mail: felix.gamboa@insmet.cu, gamboa@cmw.insmet.cu

⁽²⁾Instituto de Meteorología, Cuba, E-mail: Daniel.martinez@insmet.cu

Recibido: septiembre 6, 2011

Aceptado: febrero 1, 2012

RESUMEN

El estudio de la variabilidad espacial de la lluvia utilizando información pluviométrica de alta densidad es un tema poco conocido en Cuba. Se analizaron los datos colectados por cuatro grupos de pluviómetros (cada uno integrado por cinco sensores digitales) que proporcionaron información de alta densidad en la provincia de Camagüey, Cuba. La variación espacial de la lluvia se aborda a través de los siguientes indicadores: la correlación entre pares de valores de láminas de 24 horas, sus diferencias cuadráticas y la relación entre cada medición y su correspondiente máximo valor areal, todos en función de las distancias entre dichos instrumentos, que osciló entre 1.23 y 4.2 km. Las variaciones de los tres indicadores evaluados fueron directamente proporcionales a la separación entre los sensores. Las diferencias, oscilaron entre 7.7 mm, (en los separados a 1.3 Km.) y 14.3 mm. (en aquellos cuya distancia fue de 4 Km.). Los registros de los pluviómetros incluidos a la distancia 1.3 Km. del acumulado máximo puntual del grupo pluviométrico, como media fueron un 34 % menor que éste, mientras que a 4 Km., como promedio, eran un 48 % menor que el mismo. Como resultado de esta variabilidad, la red pluviométrica por sí misma es incapaz de representar de forma precisa la distribución espacial de la lluvia, de modo que se recomienda la aplicación de un sistema combinado de estimación radar-red pluviométrica.

Palabras clave: Red pluviométrica, medición de lluvia, lluvia convectiva

Spatial variability of the rainfall according to the measurement of four digital rain gauge clusters installed in Camagüey, Cuba

ABSTRACT

Spatial variability of the rainfall, using high density raingauge measurements has not been sufficiently studied in Cuba. Data from four clusters of five raingages each, with a density of about 5 km² per raingauge, located in Camagüey, Cuba, were analyzed in this paper. To evaluate the spatial variability of rainfall, the following parameters were used: linear correlation coefficient between 24 hour rainfall depths for pairs of raingauges, their mean square differences and the ratio between each rainfall value and its corresponding maximum value. The dependence of these parameters on the mutual distance between raingauges, which ranged between 1.2 and 4.2 km was investigated. The ranges of variation of their three tested parameters were directly proportional to the distance between sensors. The differences ranged between 7.7 mm (for a separation of 1.3 km) to 14.3 mm (for a separation of 4 km). The mean of the depth values measured by the raingauges which distance from the maximum of a raingauge group was up to 1.3 km was 34% of the maximum, while the mean depth for the group up to 4 km from the maximum was 48% of its depth value. As a result of this variability, the raingauge network by itself is unable to represent the rainfall spatial distribution with enough accuracy, and a combined radar-raingauge network system should be applied for this purpose.

Key words: raingauge network, rainfall measurement, convective rainfall

1. Introducción

Las mediciones de lluvia (lo más cerca posible de la realidad) son muy importantes para muchas actividades humanas, entre ellas: la hidrología, los servicios meteorológicos y el incremento artificial la lluvia; para esta última, dicha aproximación es básica ya que se necesita evaluar el efecto de siembra. La medición de la lluvia caída resulta clave para conocer el incremento obtenido mediante mediciones con el menor grado de error posible, principalmente cuando se trata de la realización de experimentos de incremento artificial de la lluvia.

Para ese propósito, el instrumento convencional (pluviómetro), tiene ventajas y limitaciones, entre sus ventajas, están:

- a) Son capaces de medir la lluvia caída sobre la superficie en un punto.
- b) Es un instrumento barato.
- c) De fácil sostenimiento.

Su principal y más importante limitación es que no describe la variabilidad espacial de ésta, a no ser que se use una densa red pluviométrica, lo cual no es sostenible para una gran área, ni durante un largo período. Dicha limitación es una de las principales ventajas del radar meteorológico, el cual puede estimar la lluvia con una alta resolución espacio-temporal y para una gran área de hasta 200 km. de radio, con centro en el radar, por tanto, resulta muy útil combinar las ventajas de ambos sensores para lograr un sistema mejor y más económico que represente la estructura y evolución del campo de lluvia.

Wodley et al. (1975), ratificó la alta variabilidad de la lluvia convectiva, encontrando que a 2 km. del máximo valor de un área, podía haber una variación de hasta el 30 %, mientras que a 4 km. encontró variaciones de hasta el 50 %, lo que midió con una red de pluviómetros, cuya densidad era de un pluviómetro por 3 km².

Muchos han sido los proyectos que se han dedicado a la investigación de la variabilidad espacio-temporal de la lluvia, a través del uso de redes de alta densidad, por ejemplo: Amorcho et al. (1968), Brock et al. (1995), Volkmann et al. (2010), la mayoría coinciden en que para comprender la alta variabilidad de la lluvia, se impone el uso de la combinación radar-pluviómetros y que ésta depende del tipo de tormenta y las características locales y regionales del lugar de la medición.

Estados Unidos, Canadá, Japón, Australia, varios países asiáticos y muchos de los países europeos usan la información del radar, combinándola con la pluviometría para lograr obtener una mejor caracterización de la estructura espacial del campo de lluvia (Gjertsen, 2003)

Desde el 2005, se ejecuta en el Área Experimental de Camagüey (Fig. 1), (superficie con 150 km de radio y centro en el lugar de emplazamiento de radar de la provincia de igual nombre) el Experimento de Siembra Aleatorizada de Nubes Convectivas en Áreas Extensas (EXPAREX), dentro del marco de ejecución del proyecto: Incremento Artificial de la Lluvia por Siembra de Nubes, (Martínez et al., 2011), financiado por el Estado Cubano.

El objetivo de este trabajo es realizar una descripción del emplazamiento, ubicación, funcionamiento y primeros resultados sobre el análisis de la variabilidad espacial de la lluvia, medida a pequeña escala, por los pluviómetros antes mencionados, en la provincia de Camagüey, Cuba.

2. Materiales y métodos



Fig. 1: Ubicación Geográfica del Área Experimental de Camagüey

En **Fig. 1**, la ubicación del área estudiada. Para satisfacer las exigencias de la medición de lluvias en dicho experimento (dadas las limitaciones antes mencionadas, tanto en las mediciones pluviométricas, como con las estimaciones del radar), se impuso como mejor variante, el uso de las descripciones de campo de lluvia del radar ajustado a la pluviometría, para lo que se diseñó e implementó un sistema capaz de tener en cuenta lo mejor posible la variabilidad espacial de la lluvia.

Con el propósito de soportar las consideraciones teóricas de dicho sistema se instalaron en Camagüey 20 pluviómetros digitales, en cuatro grupos pluviométricos (**GP**), Entiéndase como GP, el subconjunto de 5 pluviómetros separados entre sí, como máximo a 5 km. En todos los casos, uno de dichos sensores fue ubicado, lo más cerca posible del centroide del área que ocupan. Todos a una distancia, en la cual, el radar ofreciera la información con la suficiente confiabilidad, como para hacer los estudios previos relacionados con la variabilidad espacio-temporal de la lluvia en el área, donde se van a desarrollar los ajustes de la lluvia estimada por el radar.

La información pluviométrica fue recogida en dos períodos: Desde el 18 de julio al 14 de octubre de 2006 y desde el 12 de julio al 31 de octubre de 2007; se lograron muestrear 61 y 92 días, respectivamente. Sin embargo, sólo se consideraron como días válidos, aquellos que tuvieron, al menos un GP con dos o más pluviómetros, cuya lámina diaria de precipitación fue superior a 0.25 mm ($G_{24} > 0.25$ mm), quedando incluidos en la muestra 40 y 76 días en las etapas 2006 y 2007, respectivamente (**Fig. 2**).

En ambos períodos prevalecieron las lluvias convectivas clásicas del trópico insular, asociadas a las condiciones físico-geográficas, el calentamiento diurno y el traslado de ondas del Este activas a su paso por nuestro archipiélago, así como la afectación de una perturbación ciclónica, cuyas características en cuanto a las precipitaciones no se alejaron de las presentadas por los fenómenos sinópticos y locales antes mencionados.

2.1 Algunas características de los sensores

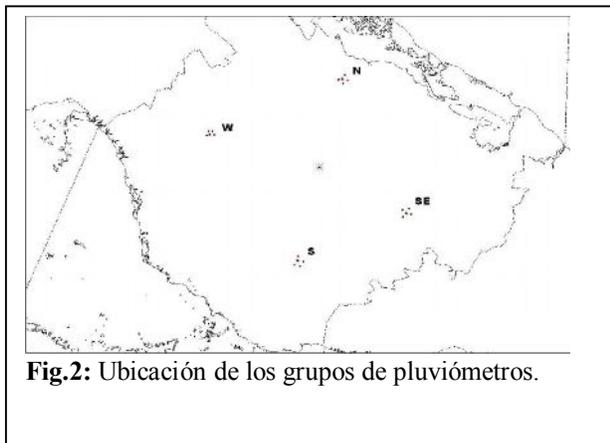


Fig.2: Ubicación de los grupos de pluviómetros.

Los pluviómetros utilizados son marca Fischer, el área de la sección transversal del orificio del embudo colector tiene 211 cm² y estuvieron ubicados a 1.2 m de altura sobre la superficie terrestre.

Cada pulso contabilizado en su registrador de datos, es nominalmente equivalente a la cantidad de lluvia 0.2 mm, estos equipos tienen un sistema configurable para la adquisición de los datos, que permite almacenar los pulsos para intervalos de tiempo desde 1 segundo hasta varios minutos.

2.2. Ubicación geográfica de los grupos pluviométricos

Los sensores fueron distribuidos en 4 grupos (**Fig. 2**). La ubicación de las áreas escogidas para el emplazamiento de cada una de ellas, estuvo precedida por un análisis físico-

geográfico del área experimental, donde se tuvo en cuenta:

- a) Distancia entre los pluviómetros y el radar MRL-5M.
- b) Características espaciales de las precipitaciones en el área de cobertura del radar.
- c) Peculiaridades del relieve y de las cuencas hidrográficas.
- d) Otros factores logísticos se tuvieron en cuenta, tales como: Estado de las vías de acceso y posibilidades de protección física en cada emplazamiento.

Uno de los sensores del GP, se ubicó aproximadamente en el centroide del mismo y el resto entre 1.23 y 2.5 km del que ocupa la posición central. La distancia media entre los grupos y el radar es 39.5 km.

En el mapa cada uno está simbolizado por una letra que significa su posición geográfica respecto al radar, el cual se encuentra en el centroide del área de trabajo, señalado por un asterisco.

Los GPs: Oeste (W) y Sureste (SE) fueron ubicados sobre el relieve peniplanado del centro del territorio, mientras que el GP Norte estuvieron sobre la llanura septentrional del área y el GP Sur, sobre los llanos meridionales de Camagüey.

Los GPs: W y SE (**Fig. 2**), estuvieron situados dentro del área de convergencia de las brisas, sin embargo los del GP N, se ubicaron en una zona donde las lluvias fueron menos frecuentes en verano y los del SE, por la frecuencia de las precipitaciones ocuparon una posición intermedia.

2.3 Estrategia de medición

Se decidió contabilizar los pulsos cada minuto, lo que permitió (dada la capacidad de almacenamiento de los datos) hacer una recogida de información aproximadamente cada 10 días, sin que hubiese pérdida de información por ese concepto. La cercanía entre los sensores y la alta resolución temporal del régimen de captación de los datos, formó parte de la estrategia adoptada para obtener la información que pudiera considerarse confiable, para caracterizar la estructura y evolución del campo de lluvia en el área de cobertura del radar.

2.4 Procesamiento de los datos y control de su calidad

La información se adquirió con un software diseñado para tales efectos por el fabricante, el cual se instala en una computadora portátil. Este exporta los datos correspondientes a fecha, minuto y cantidad de pulsos, en varios formatos compatibles con otros programas, entre ellos CVS Y TIF.

Después de adquirir en cada sensor, la cantidad de pulsos por minutos, se procedió a convertir los mismos en lámina de lluvia y con dichos datos se calcularon los acumulados de la lluvia en 24 horas (G_{24}), para cada sensor.

Una vez depurada la información de los casos que no tenían parejas dentro de su GP y eliminados los errores introducidos por conteo de pulsos asociados a nieblas o mal manejo de sensor o el software en el instante de la extracción de los datos, se procedió a caracterizar estadísticamente las mencionadas láminas.

Posteriormente se crearon todas las combinaciones posibles de distancias entre sensores, según la posición de cada uno respecto al resto de los integrantes del GP, cuyos pares formados se usaron para determinar las diferencias cuadráticas entre sus mediciones, en función de las distancias entre sí y el acumulado de lluvia, así como evaluar la relación entre G_{24} y la lámina máxima registrada dentro del grupo pluviométrico.

Se conoce que la información de precipitación no sigue una distribución normal, no obstante se realizaron las pruebas: Kolmogorov-Smirnov y de Shapiro-Wilk. La primera es recomendada para realizar análisis de información cuantitativa de fenómenos naturales con características similares a la precipitación, cuya muestra sea grande y la segunda es una de las más potentes para el contraste de normalidad, sobre todo en muestras pequeñas ($n < 30$).

En el caso de la comparación del sensor digital con el convencional, se usaron ambas, ya que fueron analizados sólo 101 casos, si bien es mayor que 30, dada la característica de la variables se usó como complemento de la prueba Kolmogorov-Smirnov. En todos los casos se trabajó con un intervalo de confianza del 95 %.

La correlación fue calculada con el método de Spearman, después de haber estratificado los datos, según el movimiento de campo de lluvia.

Dada la importancia que tienen las diferencias respecto a la variabilidad espacial de las precipitaciones convectivas y las no convectivas, se decidió utilizar dos enfoques para el análisis de la información:

- a) Analizar toda las láminas superiores a 0.25 mm ($G_{24} > 0.25$ mm).
- b) Sólo las láminas con magnitudes iguales o superiores a 1.3 mm ($G_{24} \geq 1.3$ mm).

Con estos no se pretendió separar estrictamente las precipitaciones convectivas y no convectivas, pues dicha separación requeriría un análisis para el cual no estaban listos todos los datos, sino separar los acumulados superiores e iguales a 1.3 mm del resto de los casos, pues se conoce que en la mayoría de las ocasiones, las láminas inferiores a este valor se deben a la nubosidad estratiforme independiente o de porciones nubosas no convectivas, por otro lado, los mayores errores en la estimación de lluvia por el radar se producen cuando la lluvia es estratiforme.

Para evaluar la variabilidad de las precipitaciones se procedió a realizar todas las posibles combinaciones de pares de pluviómetros, estratificando las mediciones según la distancia entre sensores de un mismo GP, como resultado se formaron cuatro subconjuntos de datos. Ellos fueron:

1.4km: En este se incluyeron todas las mediciones realizadas por pluviómetros, cuya separación entre sí, estuvo desde 1.25 km. hasta 1.55 km.

2 km: Mediciones de los Separados entre 1.6 y 2.5 km.

3 km: Mediciones de los Separados entre 2.6 y 3.5 km.

4 km: Mediciones de los Separados entre 3.6 y 4.2 km.

2.5 Comparación de un pluviómetro digital con uno convencional

Dado que en Cuba no se conoce de la existencia de mediciones de lluvia realizadas anteriormente por pluviómetros digitales marca Fischer, se decidió instalar al menos uno de éstos sensores, al lado de un pluviómetro convencional para comparar las mediciones de ambos. Con ese propósito se escogió el pluviómetro convencional (Standard USA de la Weather Bureau), instalado en la estación meteorológica de Florida, emplazado en el municipio de igual nombre. Perteneciente a la Red de Estaciones Meteorológicas de Camagüey, Cuba. Dicho equipo de medición está ubicado en los: -78.250278° Longitud Oeste y 21.517500° Latitud Norte.

Para tal comparación se lograron obtener 55 pares de datos (láminas acumuladas en 24 horas). De ellos, 14 en el 2006 (del 12 de agosto al 05 de octubre de 2006); el resto se adquirió entre el 25 de julio y el 31 de Octubre de 2007.

En el análisis de calidad, fue necesario eliminar de la muestra cinco pares de datos (debido a registros de precipitaciones de nieblas densas), obedeciendo el criterio de no utilizar los acumulados de lluvias menores o iguales que 0.25 mm, ya que el sensor convencional en su mejor ejecución, respecto a este tipo de precipitación sólo muestra las denominadas trazas, mientras que los digitales son capaces de registrar dicha precipitación. Además la máxima precisión de los pluviómetros convencionales es 0.2 mm.

3. Resultados y discusión

3.1 Resultados de la comparación entre el pluviómetro digital y el convencional

Se usaron 101 pares de datos (**Tabla I**); puede observarse que los estadígrafos de las mediciones de ambos sensores tienen muy pocas diferencias, lo cual se refleja en la descripción estadística de los errores cuadráticos y errores relativos.

Tabla I. Descripción de la comparación sensor convencional (SC) contra sensor digital (SD)

Estadígrafos	Láminas de 24 horas (mm)			
	SC	SD	Error Cuad.	Error Relat.
N	101	101	101	101
Media	12.5	12.6	3.6	13.2
Mediana	5.2	5	0.2	9.1
Mínimo	0.3	0.4	0	0
Máximo	97.3	96.2	82.8	61.5
P. Cuartil	2.3	2.2	0.02	3
T. Cuartil	18.4	17.1	1.6	18.2

El error relativo medio en esta comparación es 13.2 %, mientras que su valor mediano fue 7.9 % y el tercer cuartil, tuvo una magnitud de 18.2 %, resultado que concuerda con los encontrados por Woodley et al., (1975).

Tanto las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y de Shapiro-Wilk, como los correspondientes gráficos de distribuciones de frecuencias, corroboraron que las variables comparadas y sus diferencias cuadráticas, no siguieron una distribución normal, lo cual pudo ser afirmado con un nivel de significación del 5 %.

Según el diagrama de dispersión (**Fig. 3**) de los pares procesados (láminas acumuladas en 24 horas), ambos sensores midieron prácticamente los mismos valores hasta el 75 percentil de su muestra, excepto dos puntos que están alrededor de 20 mm.

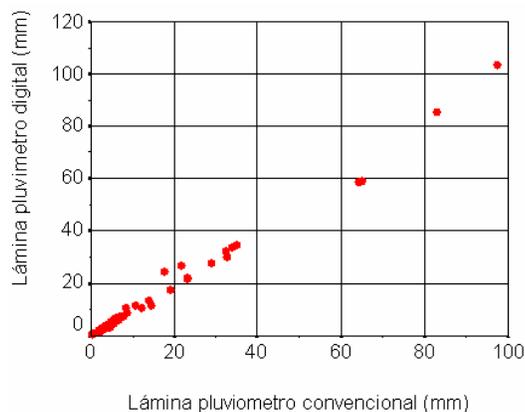


Fig. 3. Láminas registradas por los sensores comparados: el convencional y el digital

Para valores mayores que el tercer cuartil se observan algunas diferencias entre las mediciones, y fueron más grandes para los casos con magnitudes mayores que 43 mm., las cuales sólo representan el 7.2 % de la muestra.

Estas diferencias podrían relacionarse con las características de los sensores utilizados en la comparación, (el diámetro del embudo colector del sensor digital, mide 5 mm. menos que el del convencional). Especulativamente podríamos relacionar las diferencias en las mediciones con la pérdida de gotas fuera del embudo de menor área de colección, cuando las lluvias son fuertes, debido al incremento de la turbulencia asociada a la lluvia convectiva. Además los dos mecanismos de mediciones son diferentes.

Otro factor a considerar es que los pluviómetros convencionales son operados manualmente.

El error cuadrático medio (3.6 mm^2), la mediana de dichos errores (0.2 mm^2) y el coeficiente de determinación (R^2) de dicha comparación (0.998), también corroboraron que puede concedérsele un alto grado de confiabilidad a las mediciones realizadas con el pluviómetro digital instalado en la estación de Florida, Camagüey, máxime si la lluvia caída es menor que 20 mm., lo cual representa aproximadamente el 75 % de los casos estudiados, con acumulados iguales o superiores a 1.3 mm.

Si se tiene en cuenta el alto valor de R^2 y el bajo error relativo observado al comparar el pluviómetro digital con el convencional y además se asume que en el período de comparación todos los pluviómetros que forman los cuatro grupos tuvieron un comportamiento similar al sensor comparados con el convencional de la estación Florida (dado que todos proceden del mismo fabricante y tienen calibración similar), se puede inferir que las mediciones de los pluviómetros digitales resultaron lo suficientemente confiables para ser usadas en la elaboración de la metodología de ajuste de las estimaciones del radar a la pluviométrica.

Tabla II. Algunas características de la muestra utilizada

Estad.	Láminas de 24 horas (mm)	
	$G_{24} > 0.25$	$G_{24} \geq 1.3$
N	899	642
Media	11.4	14.3
Mediana	4.4	7.2
Mínimo	0.3	1.3
Máximo	140.7	140.7
P. Cuartil	1.6	3.2
T. Cuartil	14.9	19.8

3.2 Breve descripción estadística de las $G_{24} > 0.25$ mm y $G_{24} > 1.3$ mm, antes de realizar las diferentes combinaciones de distancia

Las características estadísticas elementales de la base de datos (**Tabla II**), antes de generar diferentes combinaciones de pares, según la distancia entre pluviómetros muestra, que se usaron en este trabajo 899 casos de $G_{24} > 0.25$ mm y entre ellos habían 642 con magnitud igual o superiores a 1.3 mm. El máximo valor de lámina registrada fue 140.7 mm, mientras que la mediana de todos los acumulados de lluvia analizados fue 4.4 mm, es decir que, menos de la mitad de los datos usados tuvieron valores superiores o iguales a 5 mm, lo cual es típico de la forma de distribución de frecuencia de las láminas de lluvia diaria en este territorio.

Tanto las pruebas Kolmogorov-Smirnov y de Shapiro-Wilk, como los correspondientes gráficos de distribuciones de frecuencias, evidenciaron que ninguno de los dos grupos de datos ($G_{24} \geq 0.25$ mm y $G_{24} \geq 1.3$ mm), tuvieron una distribución normal, esto puede inferirse también, al analizar el comportamiento de los parámetros expuestos en la **Tabla II**.

El 71 % de la muestra, tuvo un valor mayor e igual a 1.3 mm, lo que reforzó el interés de analizar en un subconjunto aparte las lámina mayores e iguales a 1.3 mm, independientemente de que fueran estudiadas dentro del conjunto de todos los casos.

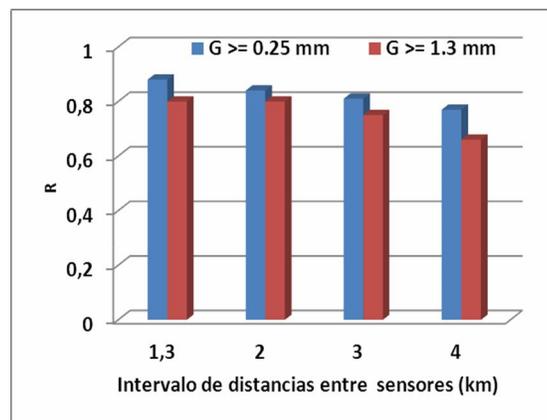


Fig. 4: Coeficientes de Correlación (R) para $G_{24} \geq 0.25$ Mm. y $G_{24} \geq 1.3$ Mm., en función de la distancia entre pluviómetros

El 50 % de todas las mediciones realizadas, registró láminas menores e iguales a 4.4 mm, también hay un 25 % de los casos con lluvias mayores e iguales a 14.9 mm, esta dispersión de valores, es una evidencia de la naturaleza variable de las lluvias convectivas, independientemente de que es muy raro encontrar en el archipiélago un sistema lluvioso que durante todo su tiempo de vida se mantenga como convectivo. Lo que generalmente sucedió fue que con la etapa de madurez de los sistemas, comenzaron su estratificación, convirtiéndose posteriormente en grandes masas nubosas con cúmulos embebidos, cuyas corrientes ascendentes cada vez fueron menos fuertes y las lluvias más débiles.

Al describir las láminas iguales o mayores que 1.3 mm, se observó una media de 14.3 mm (**Tabla II**), mientras que la mediana fue casi la mitad de ese valor (7.2 mm), el 25 % de la muestra tuvo valores iguales o superiores a 19.8 mm, su primer cuartil observado fue 3.2 mm. Ésto refleja cuan alejado de una distribución normal estuvo esa muestra de láminas diarias.

3.3. Variabilidad espacial de las lluvias en área estudiada, según las mediciones en cada grupo pluviométrico

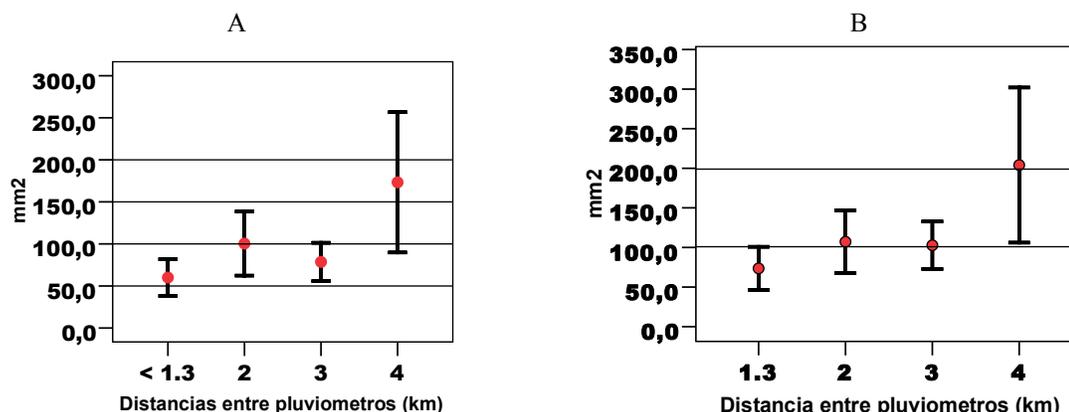


Fig. 5: Media de las diferencias cuadráticas entre las mediciones pluviométricas en función de la distancia. A: láminas iguales o superiores a 0.25 mm. B: solamente iguales o superiores a 1.3 mm.

3.3.1 La variabilidad espacial de las $G_{24} > 0.25$ mm y $G_{24} \geq 1.3$ mm, evaluados a través de la correlación (R)

Cuando se buscó la correlación entre todos los casos de $G_{24} \geq 0.25$ mm, en función de la distancia (Fig. 4), esta decreció a medida que la separación entre pluviómetro aumenta (desde 0.88 a 0.77), además el rango de los valores de correlaciones creció con el aumento de la convectividad de la lluvia (rango de $G_{24} > 0.25$ mm = 0.11 y de $G_{24} \geq 1.3$ mm = 0.14). Resultó interesante que para $G_{24} \geq 1.3$ mm, las correlaciones entre los pluviómetros que se encuentran entre 1.25 y 2.5 es igual 0.8), esta similitud con el intervalo anterior debe tomarse con precaución, pues cuando se valoró la variabilidad en base a la diferencias cuadráticas y la relación $G_{24} \geq 1.3$ mm/ G_{24Max} , no se observaron tales semejanzas (Fig. 5 y Fig.6, respectivamente).

3.3.2 Variabilidad espacial de las $G_{24} > 0.25$ mm y $G_{24} \geq 1.3$ mm, analizada a través de las diferencias cuadráticas

El comportamiento de las diferencias cuadráticas de las mediciones en función de las distancias entre pluviómetros (Fig. 5), nos muestra que tanto para todos los casos (A), como para el gráfico que presenta solamente las mediciones iguales o superiores a 1.3 mm (B), las diferencias son directamente proporcionales a las distancias entre sensores. Estos resultados están respaldados por el número de casos usados en dicho análisis (Tabla III).

Tabla III. Número de combinaciones en función de la distancia, utilizadas para determinar las diferencias cuadráticas

Distancias (km)	Láminas de 24 horas (mm)	
	$G_{24} > 0.25$	$G_{24} \geq 1.3$
1.4	233	184
2	964	731
3	411	307
4	246	173
Total	1854	1395

La raíces de las medias de las diferencias cuadráticas para las $G_{24} \geq 0.25$ mm, oscilan entre 7.7 mm y 13.2 mm (Tabla IV) mientras que cuando se procesan solamente los datos con magnitudes iguales o superiores a 1.3 mm, dichas raíces son mayores. Por ejemplo, las mediciones realizadas con una separación de 1.3 km, tienen una raíz de 8.6 mm y las mediciones separadas entre si a 4 km, la raíz media de sus diferencias cuadráticas es 14.3 mm. Este comportamiento podría asociarse al grado de convectividad de las precipitaciones, ya que en el subconjunto donde la lámina mínima es 1.3 mm hay menos lluvias estratiformes que en la muestra general y sus diferencias son mayores.

3.3.3 Variabilidad espacial de las $G_{24} \geq 1.3$ mm analizadas a través de la relación G_{24}/G_{24Max}

Tabla IV. Raíces de las medias de las diferencias cuadráticas en función de la distancia entre sensores

Distancias (km)	$G_{24} > 0.25$ mm	$G_{24} \geq 1.3$ mm
1.3	7.7	8.6
2.0	10	10.3
3.0	8.8	10.1
4.0	13.2	14.3

Otra forma de observar la variabilidad espacial de la lluvia fue mostrada a través de la razón G_{24}/G_{24Max} (Fig. 6), en función de las distancias, y en función de los acumulados de lluvia.

Esa relación expuso la variabilidad espacial de precipitaciones. En la Fig. 6 A, se observa que los registros de los pluviómetros incluidos a una distancia 1.3 km del acumulado máximo puntual del grupo pluviométrico (AMPGP), como media fueron un 34 % menor que éste, mientras que a 4 km del AMPGP el valor de ésta, es como promedio, un 48 % menor que el mismo.

Esta es una nueva forma de demostrar que la diferencias entre las mediciones de los sensores es directamente proporcional a la distancias entre estos.

Otra interesante característica de este análisis es que el decrecimiento con la distancia es casi lineal.

También se estratificó la información en función de la lámina diaria acumulada (Fig. 6 B), la cual mostró que la mayor variabilidad se encuentra en las precipitaciones con láminas máximas entre 6.1 y 31.3 mm, cuya variación es del 47 % aproximadamente. Estas características podrían relacionarse con el hecho de que dichas precipitaciones pudieron producirse en su mayoría por chubascos, con núcleos pequeños y gradientes de intensidades fuerte. El 50 % de los casos de la muestra usada, pertenece a dicho rango, de aquí se infiere el peso que tiene esa característica en los datos analizados.

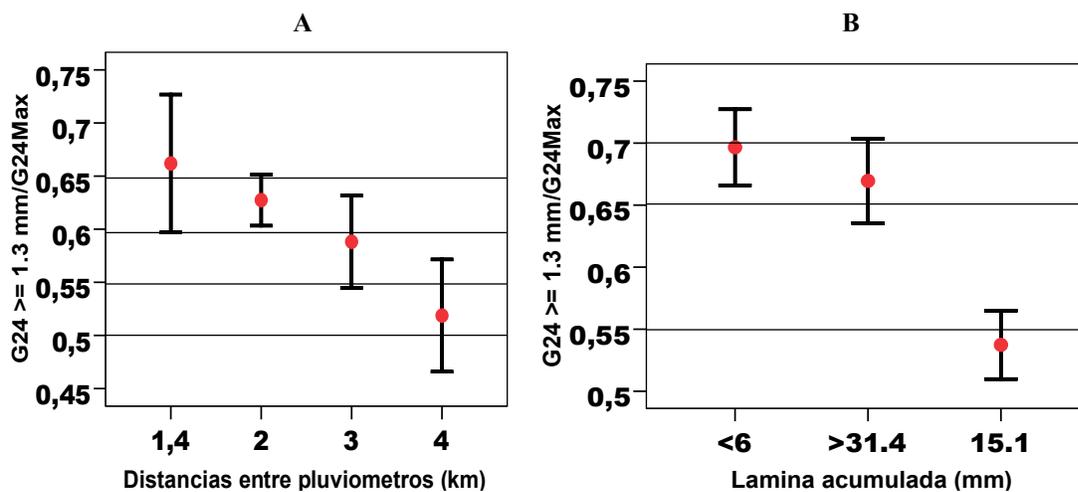


Fig. 6: Relación lámina puntual y su correspondiente lámina puntual máxima en el grupo pluviométrico. A en función de las distancias y B en función de los acumulados de lluvia

Los acumulados de lluvia mayores e iguales 31.4 mm, sólo tienen una variación media de 34 % y los inferiores a 6 mm tienen la menor variabilidad.

Especulativamente, se podría afirmar que el comportamiento, casi igual, de los dos últimos subconjuntos de datos mencionados pudo deberse a dos causas:

- Un alto porcentaje de las precipitaciones inferiores a 6 mm., pudieron ser estratiformes o como resultado de un chubasco de corta duración, por tanto puede afirmarse que de las tres categorías creadas, ésta es la que tiene la mayor probabilidad de estar asociadas a los procesos de estratificación de la nubosidad productora de la lluvia, donde las intensidades de precipitaciones disminuyen su dispersión.
- La principal contribución a las lluvias superiores a 31.4 mm., la hicieron los procesos convectivos, cuyos tamaño de núcleos que las producen son directamente proporcionales a su intensidad, recuérdese que la distancia máxima entre sensores fue 4.2 km. Un núcleo convectivo fuerte, puede tener un radio igual o superior a esa dimensión y su gradiente de intensidad no decrece tan rápido en los primeros 4 km., como cuando los núcleos sólo tienen uno o dos km. de diámetro.

El comportamiento anterior de los acumulados de lluvia es una prueba de que en el territorio estudiado no es recomendable ofrecer la estimación de lluvia puntual en píxeles, cuyas dimensiones sean superiores a 2 X 2 km

Esta información ha sido útil para entender las diferencias que en ocasiones se observan entre las mediciones de dos pluviómetros situados relativamente cerca entre sí, así como entre las estimaciones del radar (rejilla 1 X 1 km.) y la medición de un pluviómetro ubicado en el mismo píxel o contiguo a éste.

Por otro lado, dicha variabilidad demuestra que no es aconsejable (principalmente cuando se trata de lluvia convectiva), comparar la lámina puntual de un pluviómetro con la estimación areal del radar (el pluviómetro mide a 1,2 m. El radar, por lo general, realiza sus estimaciones con mediciones de reflectividad procedentes del nivel entre 1000 y 2000m de altura sobre la superficie terrestre).

Las mediciones realizadas corroboraron lo planteado por otros autores como Scott Sinclair, (2005), el cual señala que la variabilidad espacial es particularmente evidente en escala corta de tiempo, considerando como tal hasta varios días. Debido a esta característica, un simple método de interpolación espacial no evidencia el verdadero campo de lluvia, cuando se trabaja con datos de lluvias diaria o de menor intervalo de tiempo, todo lo cual, realza la necesidad de combinar las estimaciones del radar con las mediciones pluviométricas; consideración que bajo un adecuado control de los errores, muestra una mejor representación de la estructura espacial del campo de lluvia, pues se combinan las ventajas de ambos sensores.

Estos conocimientos sobre la correlación lineal, diferencias cuadráticas entre las mediciones pluviométricas y relación entre las láminas medidas y su máximo valor areal, pertenecientes a una red de alta densidad emplazada en Camagüey, formaron parte del soporte teórico de la selección del tamaño del píxel y las rejillas utilizadas, para hacer la combinación pluviómetro - radar, establecida en el esquema de ajuste de las estimaciones del radar a las mediciones pluviométricas (Gamboa. et al., (2011) y Gamboa-Moreira et al., (2011)).

Conclusiones

En los resultados preliminares de las primeras mediciones digitales realizadas por los cuatro grupos de pluviómetros instalados en Camagüey, Cuba, se destaca que:

- Los sensores utilizados proporcionan mediciones de lluvia con suficiente confiabilidad como para ser usados en análisis hidrológicos detallados como el ajuste de lluvia estimada por radar, la entrada de información en modelos hidrometeorológicos, de producción agropecuaria y otros.
- Se ha demostrado que la correlación lineal, las diferencias cuadráticas entre las mediciones y la relación lámina puntual acumulada con su correspondiente máximo areal, son directamente proporcionales a la separación entre sensores y tienen importantes variaciones a escala igual o inferior al tamaño de un cúmulo y a la distancia mínima entre pluviómetros de la red convencional.
- Las mayores diferencias entre la lámina puntual y su correspondiente máximo en el agrupamiento como media pueden alcanzar hasta un 47 %, valores observados en las láminas correspondientes al intervalo 6.1 y 31.3 mm, los cuales representaron el 50 % de la muestra.
- Los resultados de este trabajo pueden ser ilustrativos de la caracterización espacial de la variabilidad de las lluvias de verano en otros territorios de la Isla de Cuba; donde la naturaleza de las lluvias y el medio ambiente en general sea similar a la región de estudio.
- Las mediciones realizadas corroboran lo planteado por otros autores como Scott Sinclair, (2005), respecto a la variabilidad espacial de la lluvia cuando se trabaja con datos de pequeña escala temporal, donde los métodos de

interpolación espacial directa no muestran la estructura del verdadero campo de lluvia, imponiéndose el uso de la combinación de las ventajas del pluviómetro y el radar para mostrar un campo de lluvia más cercano a la realidad.

Referencias

- Amorocho, J., A. Brandstetter and D. Morgan,(1968):** The effects of density of recording rain gauge networks on the description of precipitation patterns. iahs.info/redbooks/a078/iahs_078_0189.pdf
- Brock F. V., K. C. Crawford, Elliott R. L., G. W. Cuperrus, S. J. Stadler, H. L. Johnson, and M. D. Eilts, (1995):** The Oklahoma mesonet: A technical overview. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Volume 12. PP. 5-19.
- Gamboa, F. A. Gamboa-Moreira, C. A. Pérez, E. M. Rodríguez y C. Álvarez, 2011:** Estimación de la Precipitación por Radar Dentro del Proyecto de Incremento Artificial de Precipitación en Cuba. *Memorias del VI Congreso Cubano de Meteorología*. ISBN 978-959-7167-29-7.
- Gamboa-Moreira A., F. Gamboa, D. Martínez, R. Vásquez y A. Del Risco, 2011:** Esquema del Control de la Calidad de los Datos del Radar Usados por el Sistema Ajuste. *Memorias del VI Congreso Cubano de Meteorología*. ISBN 978-959-7167-29-7.
- Martínez, D., C. A. Pérez, B. Koloskov, V. V. Korneev, V. Petrov, M. Struinin, F. Gamboa y S. Novo, 2011:** Randomized Convective Cloud Seeding Experiment IN Extended Areas IN Cuba (EXPAREX). *Revista Brasileira de Meteorología*, V.26, N.4, 287 - 294, 2011.
- Gjertsen, 2003:** Gauge-adjustment of radar-based precipitation estimates-A Review. www.smhi.se/cost717/doc/WDD_02_200310_1.pdf
- Kolokov, B.; B. Zimin, V. Beliaev, Y. Seregin, A. Chernikov, V. Petrov, M. Valdés, D. Martínez, C. A. Pérez, and G. Puente, 1996:** Results of Experiments on Convective Precipitation Enhancement in the Camagüey Experimental Area, Cuba. *Journal of Applied Meteorology*. 35. 1524 – 1534.
- Pérez, C., Martínez, D. and Petrov, V. (1992):** Microstructure, mixing and turbulence in cumulus clouds over Cuba and the Caribbean Sea. In: *Proceedings WMO Workshop on Cloud Microphysics and Application to Global Change*, Toronto, 1992. WMP Report No. 19 WMO/TD 537. pp. 245-256.
- Pérez, C.; Oms, M.; Martínez, D. and Petrov, V. (1994):** Phase composition and seedability of cumulus clouds in the Camagüey Meteorological Site, Cuba. *Sixth WMO Scientific Conference on Weather Modification*, Paestum. WMP Report No. 22. WMO/TD No. 596. Vol. 2, pp.379-282.
- Scott Sinclair, 2005:** Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging. *Atmospheric Science Letters*. Vol. 6, ISSUE 1. 19-22. Online: 22 Feb. 2005.
- Volkman, T. H. M., S. W. Lyon, H. V. Gupta and P. A. Troch, 2010:** Multicriteria design of rain gauge networks for flash flood prediction in semiarid catchments with complex terrain. *Water Resources Research*, Vol. 46, W11554, 16 PP., 2010.
- Woodley, W. L., A. R. Olsen, and V. Wiggert, 1975:** Comparison of Gage and Radar Methods of Convective Rain Measurement. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 14. 909 – 928.