

Relaciones entre la información de las imágenes infrarrojas del satélite GOES-12 y las lluvias de verano

Maydes Barcenas Castro [maydes.barcenas@insmet.cu]

Maritza Ballester Pérez

Instituto de Meteorología, Centro de Física de la Atmósfera

Resumen

Por la importancia que representa para Cuba el comportamiento de la variable precipitación y la carencia de un método de estimación de esta con técnicas satelitales, nos propusimos analizar las relaciones entre la información de las imágenes infrarrojas (IR) del satélite GOES-12 y las lluvias producidas por los sistemas característicos del verano en Cuba. Se caracterizó, estadísticamente, la intensidad, duración y hora de comienzo de las lluvias. Se relacionaron los niveles digitales (temperatura de los topes de las nubes) reflejados en las imágenes satelitales y la cantidad de lluvia caída en 10 min obtenidas de los pluviogramas, según las condiciones meteorológicas imperantes y se elaboraron imágenes producto que reflejen la intensidad de la lluvia. Los datos utilizados corresponden a días con lluvia en las nueve estaciones de las provincias habaneras y los de las imágenes satelitales fueron procesados por un programa creado para eso. Las mejores relaciones se obtuvieron para situaciones de lluvia local y de corto plazo, y no en los casos de fenómenos extremos, como los ciclones tropicales. Se encontró además, que los *cumulonimbus* (Cb) producidos por el calentamiento diurno generan lluvias de gran intensidad y los que conforman las bandas convectivas asociadas con los ciclones tropicales generan lluvias de variada intensidad. También se presenta una tabla de consulta que facilita la creación de imágenes producto de intensidades de lluvia, producidas por el calentamiento diurno de utilidad en el trabajo operativo.

Palabras claves: estimación, lluvia, satélite, imágenes infrarrojas

Introducción

Las imágenes de los satélites permiten el estudio de los sistemas nubosos, que reflejan el estado termodinámico de la atmósfera y el análisis comparativo de esta información con la convencional, lo cual arroja las características de la intensidad, distribución y tipo de precipitación.

La utilización de satélites meteorológicos es una herramienta de primera magnitud para la estimación de parámetros que afectan directamente al tiempo y al clima. La posibilidad de utilización de imágenes de satélites, con una gran densidad de información espacial y con una adecuada frecuencia temporal posibilita el seguimiento

en tiempo cuasi-real de determinadas variables y pueden servir de base para la obtención de parámetros que sirvan para una adecuada estimación de lluvias.

La estimación regional de las precipitaciones a partir de información satelital ofrece la ventaja de una adecuada cobertura regional, a la vez que permite capturar la variabilidad espacial de las precipitaciones, en particular durante el verano.

Los satélites geoestacionarios de la serie GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) del Servicio Meteorológico de los Estados Unidos y de METEOSAT de la Agencia Espacial Europea (ESA), proveen datos meteorológicos cada 30 min con una resolución de superficie de 1 y 4 km² por elemento

de la imagen (píxel). Los datos provistos por el satélite GOES están siendo utilizados en los Estados Unidos de Norteamérica desde la década de los 70, para la estimación de lluvias en áreas no cubiertas por información de superficie.

Básicamente, la metodología se fundamenta en la utilización del canal 4 en el rango espectral de 10,2 a 11,2 μm o infrarrojo (CIR) y del canal 1 en el rango de 0,52 a 0,72 μm o visible (VIS) de los satélites GOES y METEOSAT. Asimismo, han surgido otras técnicas que utilizan información de CIR y de microonda. Algunos investigadores en la década de los 80 y los 90 desarrollaron técnicas que combinan datos de CIR, radio sondeo y resultados de modelos numéricos de nubes.

La información satelital junto con la proveniente de redes pluviométricas está siendo utilizada, actualmente, en numerosos países, dado que aseguran una cobertura informática mucho más densa y adecuada.

En Cuba, los estudios encaminados a determinar la lluvia a partir de los datos satelitales datan desde mediados de la década de 1980. La mayoría de esos trabajos utilizaron imágenes de los satélites geoestacionarios de la serie GOES-E, recibidas a través del sistema de transmisión WEFAX, que permite obtener imágenes de resoluciones espacial (8 km) y temporal (cada 1 h) bajas. En la actualidad, el Instituto de Meteorología (INSMET) cuenta con una estación de trabajo para mostrar las imágenes satelitales creadas con datos GVAR (GOES VARIables Format). Para el área de Cuba, es posible recibir información con una resolución temporal de 15 min e imágenes del espectro visible con resolución de hasta 1 km y del espectro infrarrojo y vapor de agua de 4 km. La alta frecuencia con que se recibe la información permite relacionar casi, simultáneamente, los datos satelitales con los de lluvia presentados en los pluviogramas, lo que puede resultar en un mejor ajuste de los mismos. La mayor limitación que tiene Cuba para los estudios relacionados con las precipitaciones es la de no contar con información de microondas.

Como en Cuba no se hacen estimados de lluvia a partir de la información satelital, ya que las técnicas elaboradas con anterioridad no se aplican por las condiciones tecnológicas existentes de trabajo y debido a la importancia que representa para la Isla el comportamiento de la variable precipitación, se analizaron las relaciones entre la información de las imágenes IR del satélite GOES-12 y las lluvias producidas por los sistemas característicos del verano en Cuba. Los resultados de este trabajo pudieran ser aplicados en el Centro de Pronóstico del Instituto de Meteorología, tanto para monitorear como para pronosticar las lluvias a muy corto plazo.

Materiales y métodos

Muestra de trabajo

La muestra de trabajo comprende datos de precipitación de los meses de agosto y septiembre del año 2004 por estar inmersos en el período lluvioso, cuando se producen los mayores acumulados de precipitaciones en Cuba. El área de estudio se limitó a las provincias habaneras por la disponibilidad de los pluviogramas; se caracteriza por ser llana en su mayoría y presentar elevaciones pequeñas.

Se seleccionaron, primero, los días con lluvias de la base de datos del Centro del Clima del Instituto de Meteorología, correspondientes a las nueve estaciones habaneras representadas en la figura 1 y cuyas coordenadas aparecen en la tabla 1.

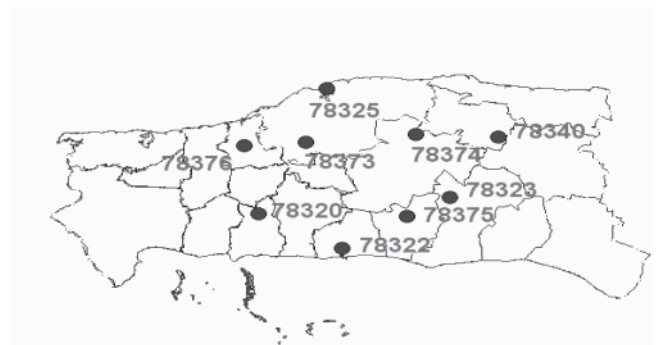


Fig. 1. Red pluviométrica del Instituto de Meteorología en las provincias habaneras.

Tabla 1. Coordenadas de las estaciones meteorológicas de las provincias habaneras

Nombre de la estación	Número	Latitud	Longitud
Güira de Melena	78320	22,83	82,51
Batabanó	78322	22,72	82,33
Güines	78323	22,91	82,02
Bainoa	78340	23,01	81,91
Tapaste	78374	22,95	82,12
Melena del Sur	78375	22,84	82,15
Bauta	78376	22,95	82,51
Casablanca	78325	23,13	82,33
Santiago de las Vegas	78373	22,93	82,42

En este estudio se consideraron las imágenes IR del canal 4 (10,7 μm) del satélite GOES-12 para tener la información de los datos nocturnos y así no limitarlo solamente a las horas diurnas. De las imágenes se tomó el valor del píxel o Nivel Digital (ND), siendo este dato el empleado en la comparación de imágenes de diferentes canales o para obtener imágenes producto.

Para la lectura de los niveles digitales se creó un software que permite cargar las imágenes en formato Tiff y a su vez hace el cálculo para la cantidad de estaciones que se desee de manera rápida, algo que manualmente era muy engorroso y menos preciso. Este software está diseñado, también, para visualizar la imagen que esté cargada en ese momento, permitiendo observar la situación sinóptica asociada en el instante del cálculo. En las figuras 2 y 3 se muestran las distintas ventanas del programa diseñado.

Metodología

Se realizó primero la lectura de los pluviogramas, tomando la cantidad de lluvia registrada desde el comienzo hasta 10 min después. De estos gráficos se extrajo la información correspondiente a la hora de comienzo y fin de las precipitaciones, así como la intensidad. Se calculó, además, el tiempo de duración de las

lluvias. Luego se estimaron los valores de los niveles digitales con ayuda del software mencionado en el epígrafe anterior. Las imágenes utilizadas para la lectura de los niveles digitales no se alejan del momento de comienzo en no más de 10 min y la mayoría coincide con el comienzo de la lluvia. En la figura 4 se muestra, como ejemplo, el pluviograma de la estación de Batabanó del día 24 de agosto de 2004, relacionado con la figura 3. Aquí se puede observar que el valor estimado de 15 mm entre las 16:28-16:38 h (21:28-21:38 UTC) le corresponde un valor del píxel de 200 a las 21:31 UTC. Este intervalo de lluvia tuvo una duración de 25 min y durante el resto del día hubo otros momentos con lluvias ligeras, para un acumulado en 24 h de 28,3 mm. Se debe señalar, que en los días que se registraron varios momentos con lluvia en una estación determinada, se consideró en el análisis solo el primer registro

Nombre	Latitud	Longitud	img1-21.31.TIF	img2-21.45.TIF	img3-22.01.TIF	img4-22.15.TIF
220	22,83	82,51	199 -33,74 10,4 190,7	196 -32,45 10,14 190,5	199 -33,74 10,4 201,7	201 -35,74 10,8 201,7
222	22,72	82,33	200 -35,07 10,06 200	207 -39,99 11,67 206	206 -39,26 11,52 206,2	209 -41,49 11,90 209,2
223	22,91	82,02	88 14,39 2,23 85,75	9 91 13,03 2,46 85 91	1 105 7,14 3,4 90,5	105 132 -2,55 4,94 115,5
240	23,01	81,91	73 21,93 0,92 88 89	73 21,93 0,92 74,5 76 74	21,38 1,02 75,25 7 78	13,27 1,39 86,75 1
274	22,95	82,12	97 10,42 2,88 93,5 97	101 8,75 3,15 98,5 10 104	7,54 3,34 104 104 134	-31,18 9,89 191 1
375	22,84	82,15	105 7,14 3,4 98,25 10	148 -8,92 5,87 134,5	1 201 -35,74 10,8 196,25	205 -38,54 11,37 204,5
276	22,95	82,51	193 -28,75 9,41 192,7	181 -23,71 9,45 187,7	186 -26,44 9,97 192 1	187 -27,81 9,07 192 1
325	23,13	82,33	73 21,93 0,92 70,75 7 72	22,48 0,82 71 72	7 76 20,31 1,21 74,75	7 79 18,76 1,48 78 79 7
373	22,93	82,42	176 -21,13 7,97 170,2	193 -30,56 9,77 191 2	197 -33,09 10,27 195	195 -31,81 10,01 194,2

Fig. 2. Ventana de salida de los datos del software para la lectura de los niveles digitales.

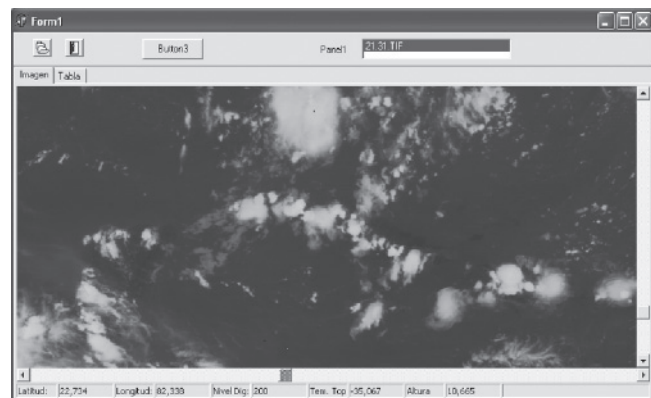


Fig. 3. Ventana del software con la imagen IR del día 24 de agosto de 2004 a las 21:31 UTC.

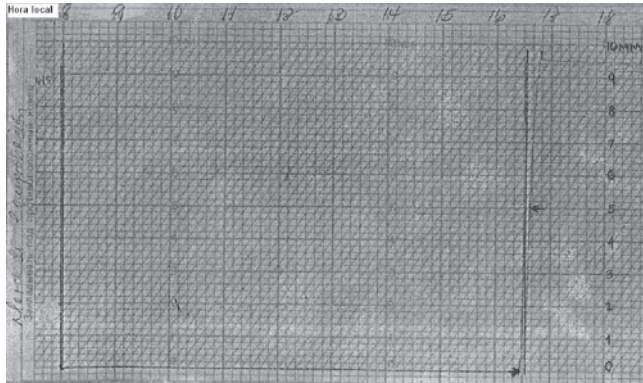


Fig. 4. Pluviograma de la estación meteorológica de Batabanó (78322), del día 24 de agosto de 2004.

para el comienzo de esta, mientras que para analizar la intensidad y la duración sí se tomaron todos los intervalos de lluvia.

La muestra de trabajo consta de 164 casos, la cual es representativa de las situaciones sinópticas típicas de los meses de verano. Esta muestra se dividió por grupos en dependencia de las condiciones meteorológicas predominantes en cada uno de los días estudiados. La fuente utilizada para esta clasificación fueron los resúmenes mensuales publicados en la página Web del INSMET (<http://www.insmet.cu>).

En el Grupo 1 (83 casos) se consideraron los casos de precipitaciones, provocadas por el calentamiento diurno, característico de los meses de verano. En estos casos, el sistema sinóptico imperante es el anticiclón subtropical del Atlántico. El Grupo 2 (50 casos) está conformado por los casos de lluvia asociados a situaciones sinópticas como hondonadas, bajas y ondas tropicales, entre otros. Mientras que en el Grupo 3 (31 casos) se encuentran las situaciones con influencia de bandas convectivas asociadas con los huracanes Charley e Iván. En la figura 5 se muestran ejemplos de condiciones sinópticas y patrones nubosos asociados a cada uno de los grupos mencionados, anteriormente.

El análisis de los tipos de nubosidad se hizo atendiendo a los resultados del método de clasificación automática de nubes, desarrollado por Lavastida (2005), el cual utiliza los datos de la estación receptora actual. Para los ajustes se incluyeron, en la muestra, algunos

valores de cero correspondientes a los píxeles menores de 70, los que se relacionan con áreas libres de nubosidad (Fig. 6).

Mediante un diagrama de dispersión se compararon los valores de los niveles digitales de las imágenes infrarrojas y las visibles correspondientes a los casos clasificados en el Grupo 3. La lectura de los niveles digitales de las imágenes visibles se realizó en un programa diseñado para eso, con los principios utilizados para la lectura de los píxeles de las imágenes IR y confeccionado por el mismo autor. Las imágenes visibles tienen una resolución espacial de 1 km y se trabajó con estas, ya que las de 4 km no se encontraban disponibles en el archivo del Grupo de Satélite perteneciente al Centro de Pronósticos.

A diferencia del software anterior, en este se tomó una matriz de 2 x 2, en la que se fijó el píxel (1,1) correspondiente a las coordenadas de cada estación. Así se extrajo el valor del píxel prefijado, la media, la mediana y el valor máximo de los cuatro píxeles que conformaban la matriz (Fig. 7) para compararlos con los ND de las imágenes IR.

Discusión de los resultados

Características estadísticas generales

En la tabla 2 se muestran las características estadísticas de cada uno de los grupos analizados. En general, los valores de la lluvia oscilan entre 0,1 y 15 mm/10 min, coincidiendo esta oscilación con la del Grupo 1. Esto mismo sucede con los valores extremos de los niveles digitales. El Grupo 1 es el que presenta el máximo valor medio de lluvia y la menor variabilidad, con un coeficiente de variación de 1,2. En el Grupo 3 es donde se presenta el mayor coeficiente de variación de 2,2.

Los niveles digitales oscilan entre 69 y 216, y prácticamente coinciden estas oscilaciones con todos los grupos. El Grupo 1 marcó una diferencia significativa de los valores medios de la lluvia respecto a los restantes grupos, siendo la mayor con el Grupo 2 ($p_{12} = 0,03$

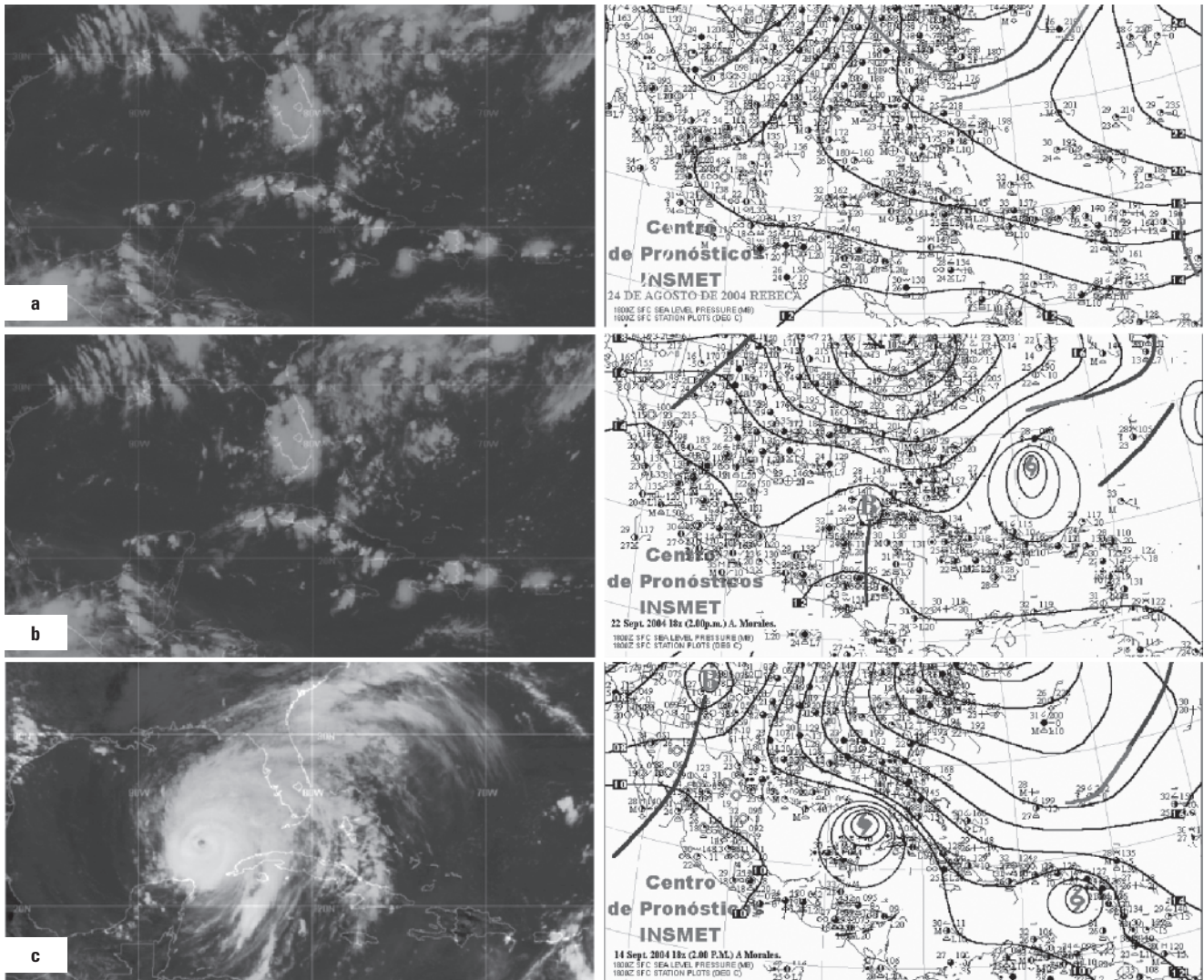


Fig. 5. Condiciones sinópticas y patrones nubosos asociados con cada grupo establecido: a) Imagen del día 24 de agosto de 2004 a las 21:31 UTC; b) Imagen del día 22 de septiembre de 2004 de las 19:45 UTC; c) Imagen del día 14 de septiembre de 2004 a las 17:02 UTC.

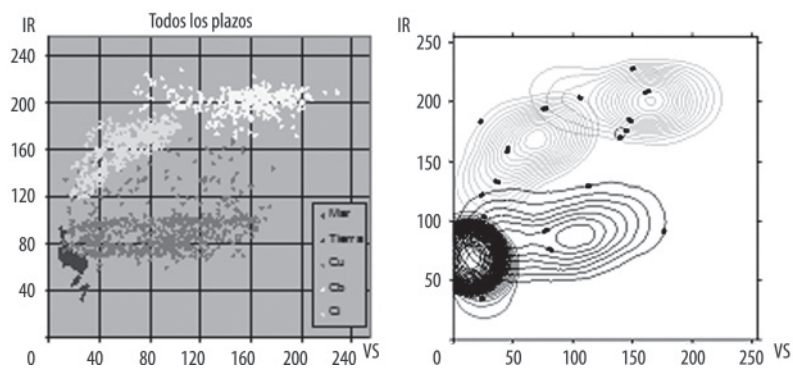


Fig. 6. Distribuciones de los pares de valores de píxeles VIS-IR y funciones de densidad de probabilidad, obtenidas para cada tipo de nube. Figura extraída de Lavastida (2005).

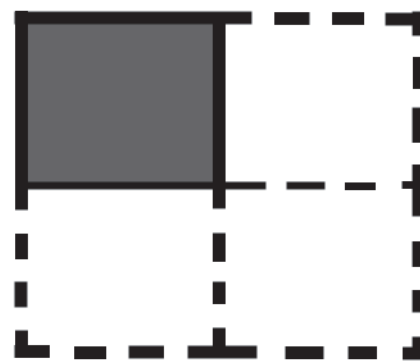


Fig. 7. Distribución de los píxeles utilizados para la lectura de los niveles digitales de las imágenes VIS. El píxel sombreado es el que se corresponde con la ubicación de la estación meteorológica.

%) y referente al Grupo 3 ($p_{13} = 2,4 \%$). Entre los Grupos 2 y 3 no se encontró diferencia significativa entre la media, al nivel prefijado de 5 %.

Tabla 2. Valores medios (X_L), desviaciones estándar (σ_L), mínimos ($Mín_L$) y máximos ($Máx_L$) de lluvia caída en 10 min y valores extremos de los niveles digitales en los distintos grupos ($Mín_P$ y $Máx_P$).

Grupos	Número de casos	X_L (mm/10min)	σ_L (mm/10min)	$Mín_L$ (mm/10min)	$Máx_L$ (mm/10min)	$Mín_P$	$Máx_P$
General	164	1,9	2,8	0,1	15	69	216
1	83	2,7	3,3	0,1	15	69	216
2	50	0,9	1,3	0,1	6,8	75	216
3	31	1,2	2,6	0,1	14	75	211

Se realizaron los histogramas de frecuencia de los tres grupos para analizar el comportamiento de la intensidad de la lluvia. Como se muestra en la figura 8, las precipitaciones con intensidades menores a 1 mm/10 min son las más frecuentes para los tres grupos considerados. Se observa que, a medida que las precipitaciones son más intensas, la frecuencia en que ocurren es menor, siendo menos frecuentes las lluvias con intensidades superiores a los 3 mm/10 min.

Se hizo el mismo análisis a los casos con intensidades menores de 1 mm/10 minutos. En la figura 9 se

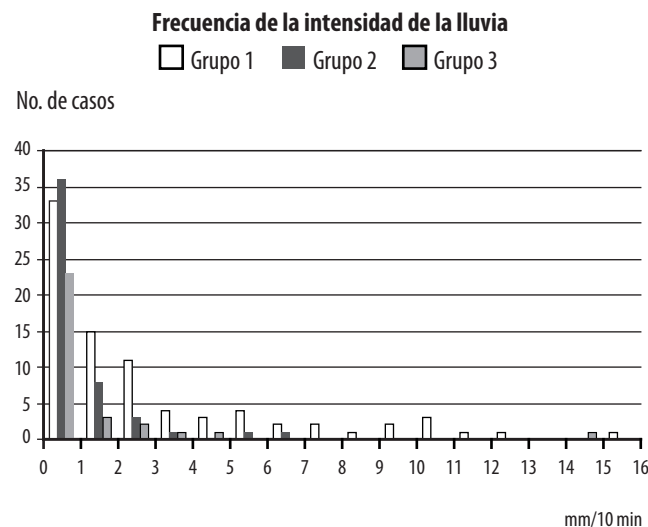


Fig. 8. Frecuencia de la intensidad de la lluvia de los tres grupos analizados.

muestra que la intensidad de mayor frecuencia es la de 0,3 mm/10 min, en todos los grupos. Las frecuencias correspondientes al Grupo 3 presentan una distribución más irregular que las distribuciones de los otros dos grupos.

Las duraciones de las lluvias oscilaron entre 5 min y 24 h. Los promedios de estas para los Grupos 1 y 2 fueron, aproximadamente, de 1,3 h. El Grupo 3 tuvo el mayor valor de 12,1 h y marcó una diferencia significativa en cuanto a los otros dos grupos ($p_{31} = p_{32} = 0 \%$). De éstos el que presenta la menor variabilidad es el tercero, con un coeficiente de variación de 0,77, los otros dos tienen valores de aproximadamente de 0,96.

Para poder observar la frecuencia de duración de las precipitaciones se realizó un histograma de frecuencia cada 1 h, como se muestra en la figura 10. Aquí se observa que la mayor frecuencia correspondió a los casos en que la precipitación duró menos de 1 h; esta muestra representó lluvias de corta duración. En los casos de los Grupos 1 y 2 solo se observaron lluvias con duraciones de hasta 4 y 5 h, respectivamente. En el tercero, la duración de las lluvias está dada por la influencia de las áreas de nublados asociadas con ciclones tropicales. A este grupo, lo mismo se le asocia precipitaciones de poca y mucha duración, como son los ocho casos en que estas superan las 23 h.

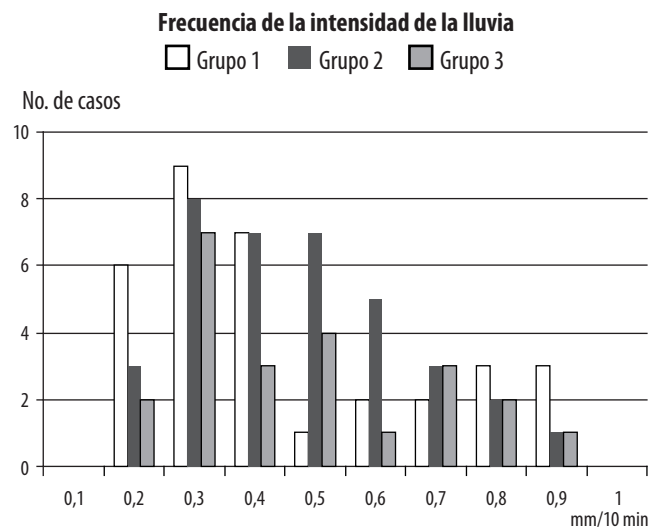


Fig. 9. Frecuencia de la intensidad de la lluvia menor de 1 mm/10 min de los tres grupos analizados.

Como la mayor frecuencia estaba dada por los casos con duraciones menores a una hora, se decidió hacer el mismo análisis para estos. Como se muestra en la figura 11, la mayor frecuencia en cuanto a la duración de estas se observa entre los 10-20 min para los tres grupos. Los Grupos 1 y 2 presentan una distribución similar, mientras que en el tercero las duraciones de las lluvias en este rango son menos frecuentes.

Las horas más frecuentes de comienzo de las precipitaciones (Fig. 12), considerando la muestra general fueron entre las 13:00 y 18:00 h locales. No obstante, la mayor probabilidad de ocurrencia es entre las 15:00 y 16:00 h.

Estos resultados, a pesar de haber sido con una pequeña muestra de datos, pero sí con la hora exacta de comienzo de la lluvia, no difieren de los encontrados por Álvarez (2006), en el estudio realizado sobre las tormentas eléctricas en Cuba, donde se obtuvo que el horario más frecuente de la ocurrencia de tormentas con lluvia es a las 16:00 h local.

Para determinar las horas más frecuentes de comienzo de las lluvias a cada grupo, se realizó el mismo análisis. Como se observa en la figura 13, para los casos pertenecientes al Grupo 1, los horarios más frecuentes que se obtuvieron son entre las 13:00 y 19:00 h, siendo el horario más frecuente entre las 16:00 y 17:00 (21:00-22:00 UTC), correspondiendo este resultado al obtenido por Álvarez (2006). Se puede apreciar que en este grupo la mayor frecuencia es en la tarde, debido a la convección incentivada fundamentalmente por calentamiento diurno y en los horarios nocturnos producto de convección tardía. Para el Grupo 2, los horarios más frecuentes de comienzo fueron entre las 14:00 y 16:00 h, con el máximo en ese último, pero se observa que las precipitaciones tienen origen en cualquier horario, lo que se relaciona con la influencia de sistemas migratorios de la zona tropical. Para los casos del Grupo 3 está en correspondencia con la aproximación de los organismos ciclónicos.

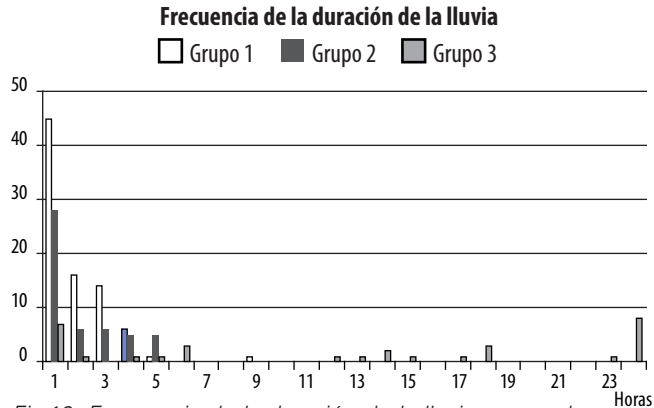


Fig. 10. Frecuencia de la duración de la lluvia para cada grupo analizado.

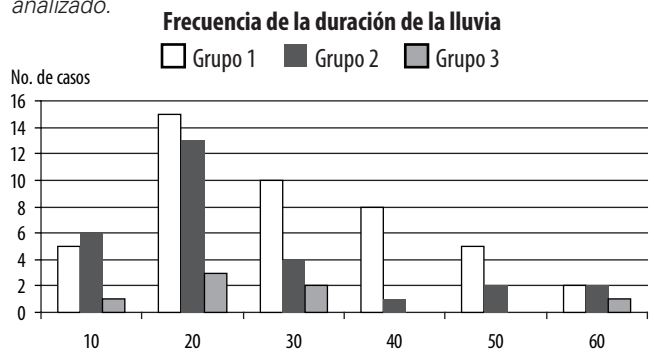


Fig. 11. Frecuencia de la duración de la lluvia para cada grupo analizado en una hora.

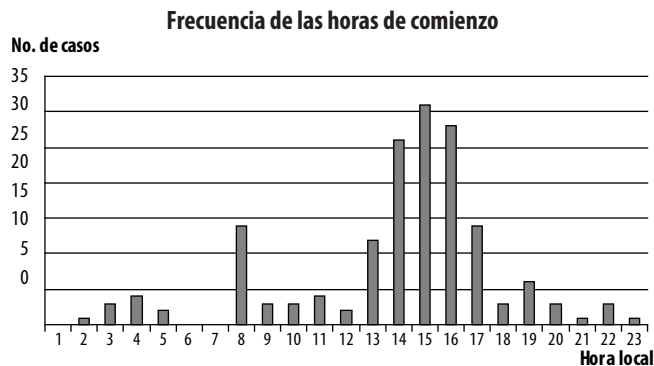


Fig. 12. Frecuencia de las horas de comienzo de las lluvias.

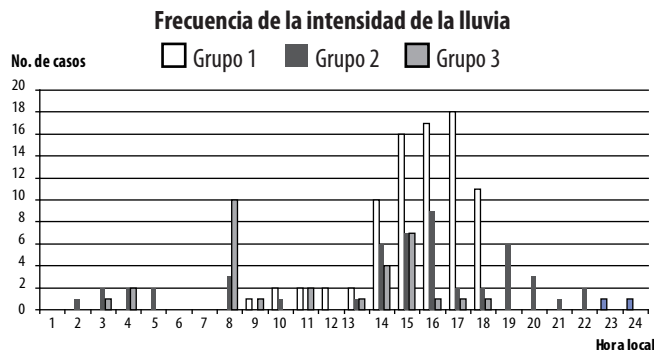


Fig. 13. Horas de comienzo de las precipitación por situación meteorológica.

Relación entre las imágenes infrarrojas y la lluvia

La primera relación analizada entre la precipitación y los niveles digitales de las imágenes infrarrojas (IR) fue con la muestra general, donde se incluyen varias condiciones sinópticas. El mejor ajuste que se obtuvo fue lineal ($y = a + bx$), con un error estándar $s = 2,60$ y un coeficiente de correlación $r = 0,36$, que fue bastante bajo.

Como se observa en la figura 14, existe mucha dispersión de los puntos, notándose que valores pequeños de intensidad de la lluvia asociados con valores altos del ND, alrededor de los 200 (temperaturas más frías), que suponen la presencia de Cb, según la Fig. 6.

Al dividir esta muestra por condiciones sinópticas, sugerida en estudios anteriores, mejoró los ajustes para los dos primeros grupos (Tab. 3). El Grupo 1 presenta el mejor coeficiente de correlación con un valor de 0,59, le sigue el Grupo 2 con 0,51 y el Grupo 3 mostró una correlación muy baja. Se debe señalar que en el caso de las lluvias originadas, fundamentalmente, por el calentamiento diurno, el ajuste polinomial de tercer grado encontrado no coincide con el lineal obtenido por Góngora (1999), para estas mismas condiciones, pero sí concuerda con el ajuste de la relación temperatura – ND.

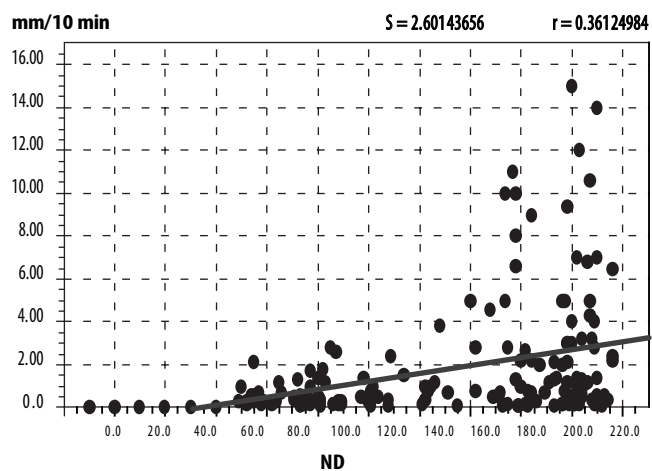


Fig. 14. Curva de ajuste de la muestra general.

Tabla 3. Curvas de ajustes, ecuación, coeficiente de correlación (r) y error estándar (S).

Grupos	Tipo de ajuste	Ecuación	r	S
Grupo 1	Polinomial 3er. grado	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,59	2,68
Grupo 2	Lineal	$y = a + bx$	0,51	1,04
Grupo 3	Geométrica	$y = ax(bx)$	0,25	2,52

Los valores de ND alrededor de 180, observados en la figura 15, pudieran corresponder a nubes altas o Cb. Los cirrus son nubes frías que no producen lluvias, pero pueden enmascarar la presencia de nublados de niveles más bajos y sobrestimar la lluvia producida por estos en algunos casos.

Como el Grupo 1 fue el mejor ajustado, se validó con una muestra independiente de 35 casos, que comprende los horarios nocturnos y un valor medio de 1,3 mm/10 min con un coeficiente de variación de 1,5, superior al de la muestra de trabajo. El error absoluto medio de la muestra dependiente era de 1,9 mm/10 min y el de la muestra independiente resultó ser de 1,3 mm/10 min.

En la figura 16 se presenta la relación existente para los casos del Grupo 2, donde se obtuvo un coeficiente de correlación más débil que en el Grupo 1. En esa figura se pueden observar valores de ND superiores a

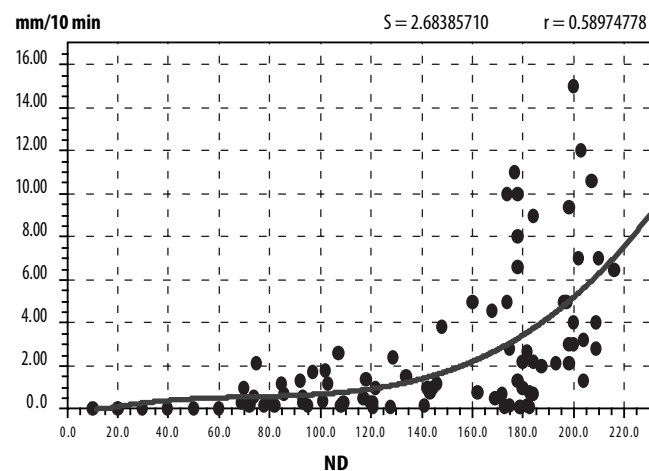


Fig. 15. Curva de ajuste de los casos del Grupo 1.

200 (Cb, según la Fig. 6), asociados con intensidades de precipitaciones similares a las producidas por nubes de menor desarrollo vertical.

La figura 17 representa el ajuste del Grupo 3, correspondiente a los ciclones tropicales. Aquí se observa que en la mayoría de los casos, la lluvia estuvo asociada a nubes con topes fríos y fue de variada intensidad. Los diagramas de dispersión resultantes de las combinaciones de la información IR con las cuatro variantes de las VIS reflejaron distribuciones semejantes. En la figura 18, que presenta la distribución de los valores ND de los espectros IR y VIS, se puede corroborar que, con la excepción de dos casos, el resto correspondía a Cb, donde las intensidades de las lluvias fueron tanto fuertes como débiles. Con respecto a los dos casos aislados, el de menor intensidad se encuentra en el área de mayor probabilidad de ocurrencia de nubes altas, según la figura 6, mientras que el de mayor intensidad se halla en la zona correspondiente a las nubes bajas.

En la figura 19 se presentan dos imágenes RGB correspondientes a la tarde del 12 de agosto de 2004, cuando el huracán Charley se encontraba al sudeste de Punta del Este, Isla de la Juventud. Sobre las provincias habaneras influían las bandas convectivas asociadas con ese organismo. Según el análisis visual, la nubosidad sobre esas provincias es del tipo Cb. Estos casos constituyen un ejemplo concreto de lo expresado con anterioridad sobre cuán variable puede ser la intensidad de la lluvia en presencia de nublados convectivos densos y fríos asociados en este caso con ciclones tropicales. A las 21:00 UTC, las estaciones meteorológicas de Batabanó, Güines y Bainoa reportaban tormenta eléctrica débil o moderada con lluvia en el momento de la observación (código 95) y se registraron intensidades entre 0,2 – 03 mm/10 min, comenzando entre las 20:00–20:05 UTC, mientras que en Santiago de las Vegas reportaba el mismo tiempo presente con una intensidad registrada de 4,3 mm/10 min, que comenzó a las 20:35 UTC.

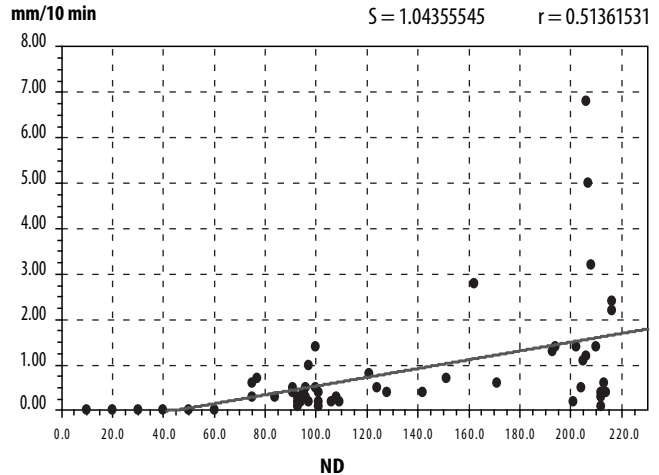


Fig. 16. Curva de ajuste de los casos del Grupo 2.

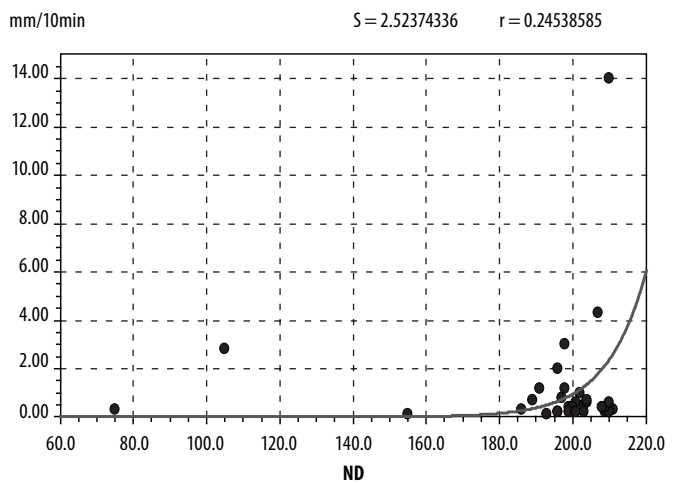


Fig. 17. Curva de ajuste de los casos del Grupo 3.

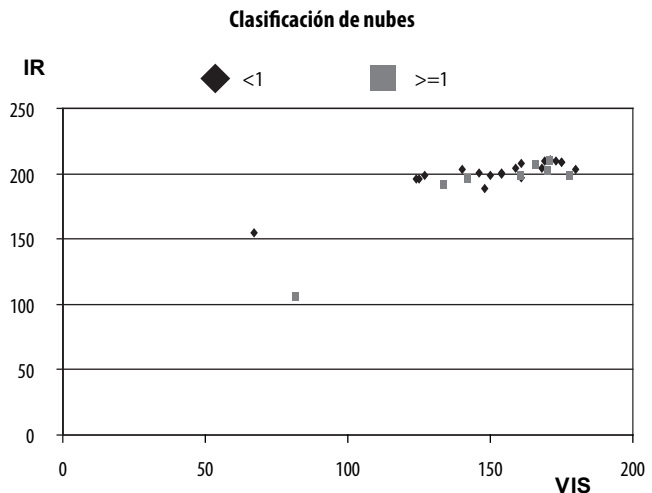


Fig. 18. Diagrama de dispersión VIS/IR con los casos clasificados, según la intensidad de las lluvias.

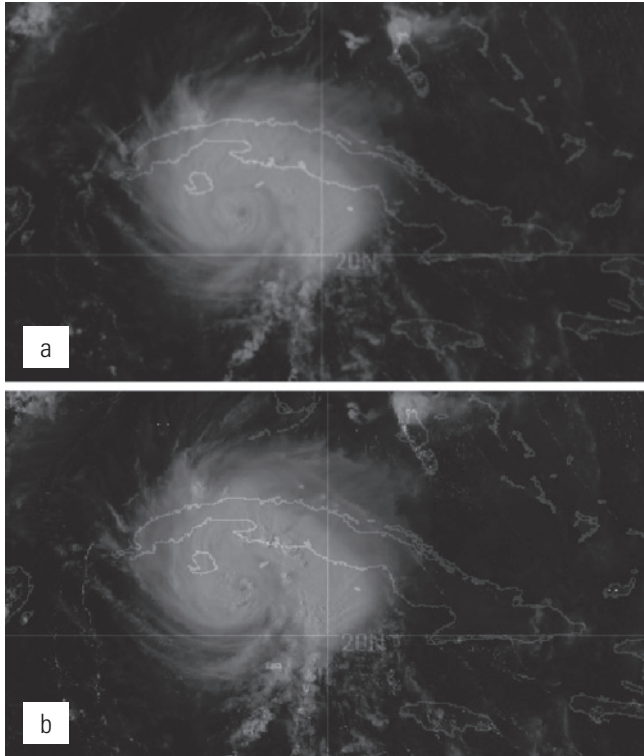


Fig. 19. Imagen RGB del día 12 de agosto de 2004 a las 20:02 UTC (a) a las 20:32 UTC (b).

Imagen producto de la intensidad de lluvia

Como el Grupo 1 fue el mejor ajustado, se decidió crear imágenes producto. Para eso se evaluó la ecuación de ajuste con los 256 ND y se confeccionó la tabla de consulta. En la tabla 4 se muestran los rangos de ND (temperatura) e intensidades de lluvia, para cada uno de estos, expresadas en milímetros por minutos, además de los tipos de nubosidad, tomando en cuenta la clasificación de Lavastida (2005).

Tabla 4. Colores, valores de píxeles e intensidad de la precipitación (I) empleados en el tratamiento de imágenes

Colores	ND (temperatura °C)	I mm/min	Nubosidad
Negro	0 - 69 (56,8 / 22,3)	0	
Gris oscuro	70 -104 (21,8 / 4,8)	$0,01 \leq I < 0,07$	Superficie/ nubes bajas
Gris claro	105 -176 (4,3 / -31,2)	$0,07 \leq I < 0,3$	Nubes bajas- altas
Amarillo	177 -189 (-32,2 / -44,2)	$0,3 \leq I < 0,4$	Cirrus / Cb
Verde	190 - 200 (-45,2 / -55,2)	$0,4 \leq I < 0,5$	Cb / Cirrus
Rojo	201 - 210 (-56,2 / -66,2)	$0,5 \leq I < 0,6$	Cb / Cirrus
Blanco	211 - 225 (-66,2 / -80,2)	$0,6 \leq I < 0,8$	Cb / Cirrus
Negro	226 - 255 (-81,2 / -110,2)	$I \geq 0,8$	Cb / Cirrus

En la figura 20 se muestra la imagen inicial correspondiente al día 24 de agosto de 2004, a las 21:31 UTC, y la ventana que trabaja con la tabla de consulta.

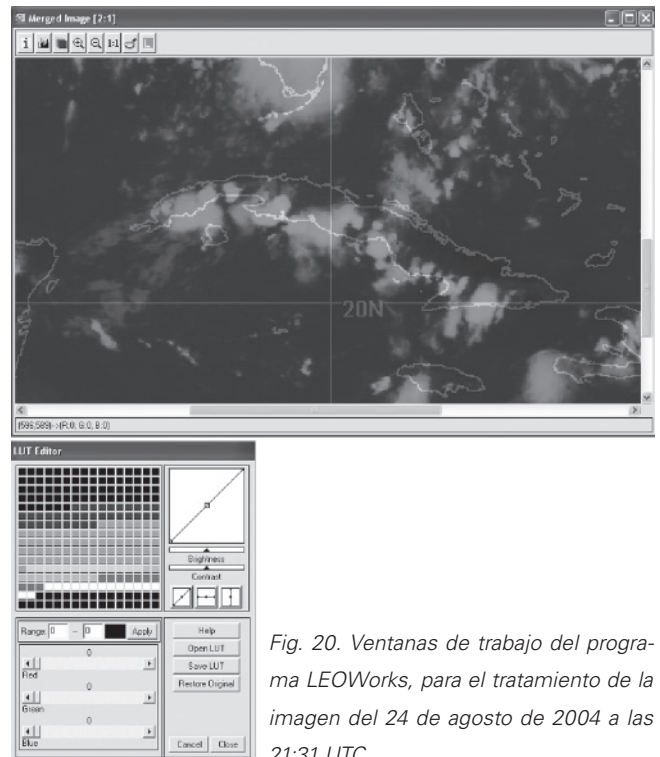


Fig. 20. Ventanas de trabajo del programa LEOWorks, para el tratamiento de la imagen del 24 de agosto de 2004 a las 21:31 UTC.

En la figura 21 se refleja la imagen producto, representativa de lluvias originadas por el calentamiento diurno. Los colores rojo y blanco reflejan las áreas de lluvias intensas, las que se aprecian en varias localida-

des de la costa sur de Cuba; las fuertes se ubican en Matanzas y Granma.

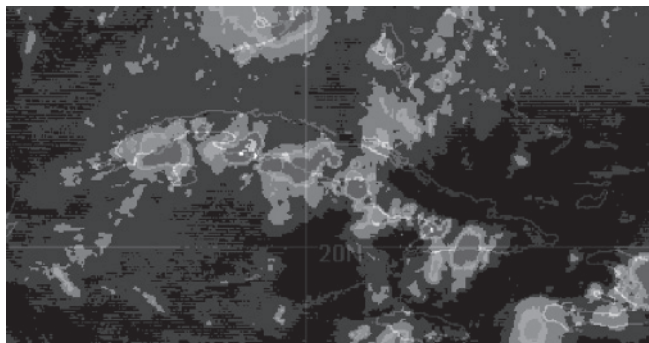


Fig. 21. Imagen producto de la intensidad de la lluvia del 24 de agosto, de 2004 a las 21:31 UTC.

Conclusiones y recomendaciones

La duración de la lluvia, en su mayoría, fue inferior a 1 h; los tiempos más comunes fueron entre 10 y 20 min, y la mayor frecuencia de ocurrencia de las intensidades fueron inferiores a 0,1 mm/min, más preciso alrededor de los 0,03 mm/min.

La muestra de trabajo se caracterizó por tener una frecuencia alta de las horas de comienzo de las lluvias en los horarios de la tarde, típico de los meses de verano, con la excepción de los días que influyó sobre el área de estudio algún sistema meteorológico migratorio de la zona tropical.

Se corroboró que para el análisis de las relaciones entre la lluvia y la información satelital se debe trabajar con muestras seleccionadas, según la condición meteorológica existente a la hora del registro de la lluvia.

La mejor correlación entre las lluvias y las imágenes IR se obtuvo para las originadas por el calentamiento diurno. Esto confirma que la mayoría de las técnicas que emplean imágenes IR funcionan mejor en situaciones de lluvia local y de corto plazo, y no en los casos de fenómenos extremos, como los ciclones tropicales. Sería útil realizar ajustes utilizando la información de radares meteorológicos.

Por lo general, los Cb producidos por el calentamiento diurno generan lluvias con intensidades superiores

a los 0,4 mm/min, mientras que en el umbral donde predominan las nubes altas se pueden presentar intensidades inferiores a 0,1 mm/min, lo que indica que en esos casos se enmascaran los nublados de niveles más bajos y se puede sobreestimar la lluvia producida por estos. Esto ratifica que las técnicas infrarrojas son más fructíferas para los regímenes convectivos (tormentas eléctricas de corta duración), pero menos satisfactorias en presencia de cirrus densos.

Los Cb que conforman las bandas convectivas asociadas con los ciclones tropicales generan lluvias de variada intensidad, las que se relacionan con niveles digitales superiores a 190 (temperaturas inferiores a -45 °C).

Se confeccionó una tabla de consulta para facilitar la creación de imágenes por las intensidades de lluvia, producidas por el calentamiento diurno; lo cual es útil para el pronóstico inmediato (0-3 h) de las precipitaciones, durante el período lluvioso. De manera operativa, se realizaría su evaluación en tiempo real.

Se recomienda incrementar el tamaño de la muestra de trabajo y extender el estudio a los meses del período poco lluvioso y a zonas montañosas, para ver el comportamiento de esta relación, teniendo en cuenta las lluvias incentivadas por la influencia orográfica.

Bibliografía

- Adler, F. and A. Negri (1988): "A satellite infrared Technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall", *J. Appl. Meteor.*, 27, 30-51.
- Álvarez, L. (2006): *Estudio de la localización espacial de las tormentas eléctricas en Cuba y su tendencia*. Tesis presentada para obtener el grado de doctor en Ciencias Meteorológicas, UDICT, Instituto de Meteorología, 149 pp.
- Ballester, M. y G. Sjirtladze (1991): *Relación entre las áreas de nubosidad y las precipitaciones medias diarias. Dinámica y Estructura de los Ciclones Tropicales y su interacción con el medio circundante*, Informe final, Instituto de Meteorología, pp. 184-194.

- Barrett, E. (1970): "The estimation of monthly rainfall from satellite data", *Mon. Wea. Rev.*, 98, 322-327.
- (1993): "Precipitation measurement by satellites: Towards community algorithms. Adv.", *Space Res.*, 13(5), 119-136.
- Barrett, E. and D. Martin (1981): *The use of satellite data in rainfall monitoring*, Academic Press, Londres, Inglaterra, 340 pp.
- Barrett, E. and M. Beaumont (1994): "Satellite rainfall monitoring: an overview", *Rem. Sens. Rev.*, 11, 23-48.
- Barrett, E., P. Brown and M. Todd (1996): *Rainfall monitoring in the humid tropics using a multisource method*, Proc. Of the IAHS Symposium on Hydrology in Humid Tropical Environments, Kingston, Jamaica, 11-17.
- Bellon, A., A. Kilambi, G. Austin and M. Duncan (1992): *A satellite and radar rainfall observational and forecasting system. Pre-print volume*, Amer. Meteor. soc. 6th Conference on satellite Meteorology and Oceanology, Atlanta, GA, 110-116.
- Dewhurst, N., E. Barrett, M. Beaumont and M. Tood (1996): *Satellite monitoring of rainfall and surface water balance- in search of the optimum rain: no rain boundary*, Progress in environmental remote sensing research and application, Parlow (ed.) Balkema, Rotterdam, 393-398.
- Follansbee, W. (1973): *Estimation of average daily rainfall from satellite cloud photography*, NOAA Technical Memorandum NESS-44, Washington D: C., 39.
- (1976): *Estimation of daily precipitation over China and the USSR using satellite imagery*, NOAA Technical Memorandum NESS-44, Washington D: C., 30.
- Góngora, C. (1999): *Estimación de la precipitación convectiva a partir de las imágenes satelitales*, Tesis para obtener el título académico de master en Ciencias Meteorológicas, Instituto de Meteorología, 50 pp.
- Griffith, C. and W. Woodley (1975): "On the variation with height of the top brightness of precipitating convective clouds", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 12, pp. 1086-1089.
- Griffith, C., W. Woodley and P. Grube (1978): "Rain estimation from geosynchronous satellite imagery-visible and infrared studies", *Monthly Weather Review*, Aug, 1978, vol. 106, pp. 1153-1171.
- Griffith, C. et al. (1978): "Rain estimates from geosynchronous satellite imagery: visible and infrared studies", *Mon. Wea. Rev.*, 106, 1153-1171.
- (1976): *Rainfall estimation from geosynchronous satellite imagery during daylight hours*, NOAA Tech Rep. ERL356 WMPO 7, Boulder, Co., 106 pp.
- Lavastida, L. (2005): *Estimación de flujos de radiación solar a partir de imágenes de satélite GOES*, Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en ciencias Meteorológicas, INSMET, 34 pp.
- Lovejoy, S. and G. Austin (1979): "The sources of error in rain amount estimating schemes from GOES visible and IR data", *Monthly Weather Review*, vol. 107, pp. 1048-1054.
- Mellado, Q., I. Borrajero y O. González (1995): *Sistema de Procesamiento de imágenes meteorológicas TIROS*, Tesis para obtener el título de máster en Informática Aplicada, IPSJAE, 58 pp.
- Milford J. and G. Dugdale (1990): "Estimation of rainfall using geostacionary satellite data", *Applications of Remote Sensing in Agriculture* (M. D. Steven and J. A. Clarck, eds.) Butterworths, Londres, 97-110.
- Mojena, E. e I. Núñez (1986): "Utilización de las imágenes de satélite para la estimación de las precipitaciones de verano" *Revista Orbita: Meteorología por satélite*, t. 2., ACC, Ciudad de la Habana, pp. 188-192.
- Mojena, E. et al. (1997): Determinación de la intensidad de las tormentas locales severas a partir de las imágenes IR de los satélites GOES, CITMA, INSMET, 20 pp.
- (2003): "Determinación de las áreas de tormentas y las condiciones de severidad asociadas mediante el empleo de imágenes IR de los satélites GOES", *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 10,

- no.1. pp. 48-53.
- Negri A. and R. Adler (1980): Relation of Satellite - Based Thunderstorm Intensity to Radar-Estimated Rainfall. *Journal of Applied Meteorology*. Vol 20.No3 pp 288-300.
- and ----- (1993): An intercomparison of three satellite infrared rainfall techniques over Japan and surrounding waters. *J. Appl. Meteor.*, 32(2), 357-373.
- , ----- and P. Wetzel (1984): Rain estimation from satellites: An examination of the Griffith-Woodley technique. *J. Clim. And Appl. Meteor.*, 23, 102-116.
- OMM (2000): Técnicas de satélite para estimar la cantidad de lluvia asociada a los ciclones tropicales. Documento técnico OMM/DT- N° 975, 77-114pp.
- Richards F. and P. Arkins (1981): On the Relationship between Satellite- Observed Cloud Cover and Precipitation. *Monthly Weather Review*. 5: pp1081-1093.
- Sikdar D. (1972): ATS-3observed cloud brightness field related to a meso brightness field
related to a meso brightness field related to a meso brightness field related to a meso brightness field related to a meso- to- subsynoptic scale rainfall pattern. *Tellus*, 24, pp400-412.
- Stout J. and D. Martin (1979): Estimation GATE rainfall with geosynchronous satellite images. *Monthly Weather Review*. Vol.107 No5, pp 585-598.
- Theon J. (1992): The tropical rainfall measuring mission (TRMM). In the global role of tropical rainfall (J.S. Theon et al, ed) Deepak, Hampton, VA, 245-260.
- Todd M., E. Barrett and M. Beaumont (1995): Satellite identification of rain days over the upper Nile river basin using an optimum infrared rain/ no rain threshold temperature model. *J. Appl. Meteor.*, 35, 2600-2611.
- Wilheit T., A. Chang, M. Rao, E. Rodgers y J. Theon (1977): A satellite technique for quantitatively mapping rates over the ocean. *Journal of Applied Meteorology*. Vol 16 pp 551-560.
- Wylie D. (1979): An application of Geostationary Satellite rain estimation technique to an extratropical area. *Journal of Applied Meteorology*. Vol 12 pp 1640-1648.
- (1983): The impacts of different satellite data on rain estimation schemics. *Journal of Applied Meteorology*. Vol 22 pp 1271-1281.

Abstract

Due to the importance of variable precipitation for Cuba and the lack of a method to estimate it with satellite technology, it is the objective of this work to analyze the relationship between the information of the images IR of the satellite GOES-12 and the amount of precipitation produced by the typical summer systems in Cuba. The time, intensity, and the beginning of the rains were characterized. A relationship was seen between the digital levels of rain projected in satellite images and the quantity of rain that precipitated in ten minutes obtained from pulviograms, according to the previous mentioned meteorological circumstances and images that reflected the intensity of the rain were developed. The data used corresponds to days with rain on nine local weather stations of the Havana province and those of satellite images created by a program to research them. The best relationships were obtained for situations of local rain and of short term and not in the cases of extreme phenomena, such as tropical cyclones. In addition, the Cb produced by the diurnal warming generated rains of great intensity, and those that shape the convective bands associated with the tropical cyclones generate rains of varied intensity. Also one presents a consultation chart that facilitates the creation of images product of intensities of rain produced by the diurnal warming that is very useful with the operative work.

Keywords: estimation, rain, satellite, infrared images.